

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

TRỊNH BIÊN THÙY

NGHIÊN CỨU KẾT CẤU ROTOR ĐỂ CẢI THIỆN
ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ PHÒNG NỔ
ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG
TRỰC TIẾP SỬ DỤNG TRONG MỎ HÀM LÒ

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN

HÀ NỘI - 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

TRỊNH BIÊN THÙY

**NGHIÊN CỨU KẾT CẤU ROTOR ĐỂ CẢI THIẾN
ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ PHÒNG NỔ
ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG
TRỰC TIẾP SỬ DỤNG TRONG MỎ HÀM LÒ**

Ngành: Kỹ thuật điện

Mã số: 9520201

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS ĐỖ NHƯ Ý
2. TS LÊ ANH TUẤN

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nghiên cứu và tính toán trình bày trong luận án là trung thực, khách quan và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình khoa học nào khác.

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2026

Người cam đoan

Trịnh Biên Thùy

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành luận án này, tác giả trước tiên bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc nhất đến hai thầy giáo hướng dẫn khoa học trực tiếp là PGS.TS Đỗ Như Ý và TS Lê Anh Tuấn, những người đã luôn dành nhiều thời gian, công sức để quan tâm, động viên và tận tình hướng dẫn nghiên cứu sinh trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tác giả chân thành cảm ơn Bộ môn Điện khí hóa, Khoa Cơ - Điện và Phòng Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã tạo mọi điều kiện thuận lợi nhất cho nghiên cứu sinh về thời gian và cơ sở vật chất trong quá trình thực hiện luận án.

Tác giả cũng bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc tới Ban Giám hiệu và toàn thể thầy cô trong Khoa Điện – Điện tử, Trường Cao đẳng Việt – Hàn Quảng Ninh là nơi tác giả đang công tác, đã tạo điều kiện thuận lợi về thời gian học tập và nghiên cứu luận án.

Tác giả trân trọng cảm ơn Công ty Cổ phần Chế tạo Điện cơ Hà Nội (HEM) đã tạo mọi điều kiện cho tác giả trong công tác gia công và chế tạo mẫu thử nghiệm Ex-LSPMSM.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn tới bạn bè và đồng nghiệp đã động viên, giúp đỡ về mọi mặt, góp phần vào sự thành công của luận án.

Cuối cùng, tác giả dành lời cảm ơn tới bố mẹ, vợ và các con đã luôn động viên và hỗ trợ về vật chất và tinh thần cho tác giả những lúc khó khăn, mệt mỏi nhất để tác giả yên tâm trong quá trình nghiên cứu, góp phần không nhỏ vào thành công của luận án.

Tác giả luận án

Trịnh Biên Thùy

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC BẢNG.....	v
DANH MỤC HÌNH ẢNH	vii
DANH MỤC VIẾT TẮT	xi
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU.....	6
1.1. Tổng quan về động cơ Ex-LSPMSM	6
1.1.1. Cấu tạo động cơ Ex-LSPMSM.....	7
1.1.2. Đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM	11
1.1.3. Ứng dụng động cơ Ex-LSPMSM trong khai thác than mỏ hầm lò.....	12
1.2. Tổng quan nghiên cứu về LSPMSM	17
1.2.1. Tổng quan các nghiên cứu trong nước	17
1.2.2. Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới	21
1.3. Khoảng trống của nghiên cứu.....	33
1.4. Kết luận.....	34
CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH TOÁN ĐỘNG CƠ Ex-LSPMSM.....	36
2.1. Mô hình toán Ex-LSPMSM.....	36
2.2. Mô hình hóa Ex-LSPMSM bằng phương pháp phần tử hữu hạn.....	40
2.2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM).....	41
2.2.2. Các phần mềm FEM phổ biến trong nghiên cứu máy điện.....	45
2.2.3. Mô hình hóa Ex-LSPMSM trên phần mềm ứng dụng FEM	48
2.3. Phân tích lựa chọn kết cấu rôto bằng phương pháp phần tử hữu hạn.....	51
2.3.1. Lựa chọn loại hình dạng thanh nam châm	51
2.3.2. Lựa chọn kết cấu rãnh bố trí nam châm vĩnh cửu	56
2.4. Kết luận.....	71

CHƯƠNG 3. PHÂN TÍCH LỰA CHỌN THÔNG SỐ NAM CHÂM VĨNH CỬU	
Ex-LSPMSM.....	73
3.1. Khử từ của nam châm vĩnh cửu.....	73
3.1.1. Nam châm vĩnh cửu.....	73
3.1.2. Phân tích quá trình khử từ của nam châm vĩnh cửu.....	76
3.1.3. Điều kiện đảm bảo không bị khử từ NCVC của Ex-LSPMSM	89
3.2. Phân tích lựa chọn tham số của nam châm vĩnh cửu.....	91
3.2.1. Phương pháp phân tích tham số	91
3.2.2. Ứng dụng phương pháp phân tích tham số để lựa chọn thông số NCVC.....	93
3.3. Phân tích kiểm tra lựa chọn loại NCVC	105
3.3.1. Mật độ từ thông do NCVC sinh ra trong khe hở không khí.....	105
3.3.2. Phân tích lựa chọn loại NCVC	108
3.4. Kết luận.....	113
CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ	115
4.1. Chế tạo, lắp ráp động cơ Ex-LSPMSM.....	115
4.2. Mô hình thí nghiệm.....	116
4.3. Kết quả thực nghiệm.....	119
4.4. Kết luận.....	122
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	123
1. Kết luận.....	123
2. Kiến nghị.....	124
DANH MỤC CÁC BÀI BÁO, CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ	125
ĐÃ CÔNG BỐ	125
Tiếng Việt	125
Tiếng Anh	125
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	127
Tiếng Việt	127
Tiếng Anh	129
PHỤ LỤC.....	142

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Thông số của quạt gió hiệu suất cao TYB của Trung Quốc.....	13
Bảng 1.2. Thông số của động cơ Ex-IM và động cơ Ex-LSPMSM	16
Bảng 1.3. Bảng so sánh mức độ đóng góp của luận án với các hướng nghiên cứu tiêu biểu về động cơ LSPMSM	31
Bảng 2.1. Thông số động cơ Ex-LSPMSM công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút ..	48
Bảng 2.2. Kết quả tính toán thông số động cơ $P_{dm} = 15 \text{ kW}$	49
Bảng 2.3. Các thông số cơ bản của Ex-LSPMSM 15 kW	51
Bảng 2.4. Kết quả tính toán THDi.	55
Bảng 2.5. So sánh mật độ từ thông khe hở không khí và sức điện động không tải giữa giá trị tham chiếu thiết kế và kết quả mô phỏng FEM.....	64
Bảng 2.6. Đặc tính mômen xoắn của động cơ	67
Bảng 2.7. Đặc tính dòng điện của động cơ	69
Bảng 3.1. Giá trị của mỗi điểm được chọn	82
Bảng 3.2. Vị trí và mức độ suy giảm từ	86
Bảng 3.3. Hiệu suất của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ ở một cặp NCVC đối xứng	88
Bảng 3.4. Thông số động cơ Ex-LSPMSM	97
Bảng 3.5. Thời gian khởi động.....	98
Bảng 3.6. Điểm làm việc nhỏ nhất trong quá trình khởi động của các thanh NCVC	101
Bảng 3.7. Biên độ sức điện động ngược không tải của Ex-LSPMSM 15 kW.....	103
Bảng 3.8. Hiệu suất làm việc của Ex-LSPMSM ở trạng thái vận hành xác lập	104
Bảng 3.9. Các thông số đặc trưng của nam châm vĩnh cửu	108
Bảng 3.10. Giá trị hiệu suất và hệ số công suất của động cơ.....	110
Bảng 3.11. Đặc tính mômen của Ex-LSPMSM.	111
Bảng 3.12. Kết quả tính toán đặc tính dòng điện và sức điện động ngược.....	112
Bảng 4.1. Thông số động cơ	117
Bảng 4.2. Thông số của máy phát điện	117
Bảng 4.3. Bảng so sánh kết quả dòng điện, sức điện động, hiệu suất khi thực nghiệm .	121
Bảng A.1. Thông số của động cơ IM cơ sở được đưa ra trong bảng sau.....	143

Bảng A.2. Ký hiệu vỏ.....	170
Bảng A.3. Ký hiệu loại hỗn hợp nổ	170
Bảng A.4. Khe hở và chiều dài đường rò.....	172
Bảng A.5. Kết quả tính toán thông số động cơ Ex-LSPMSM 15 kW	178

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Cấu tạo động cơ Ex-LSPMSM	8
Hình 1.2. Các bộ phận chính của động cơ	8
Hình 1.3. Cấu tạo lõi thép stato.....	9
Hình 1.4. Cấu tạo dây quấn stato	9
Hình 1.5. Phân động của động cơ Ex-LSPMSM	10
Hình 1.6. Sơ đồ nguyên lý hoạt động động cơ.....	11
Hình 1.7. Từ trường quay rôto	12
Hình 1.8. Tỷ lệ tiêu thụ điện năng của các khâu trong khai thác mỏ.....	12
Hình 1.9. Quan hệ phụ thuộc giữa mức hiệu suất và công suất động cơ	14
Hình 1.10. Hiệu quả giữa động cơ tiêu chuẩn và động cơ hiệu suất cao	15
Hình 1.11. Kết cấu rôto dạng thanh động cơ LSPMSM 3,7 kW–3.000 vòng/phút .	21
Hình 1.12. Kết cấu rôto động cơ LSPMSM 37 kW – 3.000 vòng/phút	22
Hình 1.13. Kết cấu hình khuyên và kết cấu chữ L của động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút	22
Hình 1.14. Kết cấu rôto động cơ LSPMSM – 3.000 vòng/phút	23
công suất 5,5 kW; 7,5 kW	23
Hình 1.15. Kết cấu LSPMSM 1,5 kW - 3.000 vòng/phút	23
Hình 1.16. Kết cấu hình cánh quạt động cơ LSPMSM 7,5 kW–3.000 vòng/phút	24
Hình 2.1. Sơ đồ mạch điện thay thế trực d của Ex-LSPMSM.	39
Hình 2.2. Sơ đồ mạch điện thay thế trực q của Ex-LSPMSM	39
Hình 2.3. Thông số kích thước stato	49
Hình 2.4. Thông số kích thước rôto	50
Hình 2.5. Cấu hình điển hình Ex-LSPMSM NCVC 3.000 vòng/phút.....	52
Hình 2.6. Cấu hình Ex-LSPMSM – 2 cực.	53
Hình 2.7. Phân bố trường điện từ.....	53
Hình 2.8. Đường cong tốc độ khởi động với cấu hình 2 thanh, 3 thanh và 4 thanh.	54
Hình 2.9. Đường cong dòng điện chế độ ổn định.	54

Hình 2.10. Phân tích FFT của dạng sóng dòng điện với các cấu hình khác nhau của nam châm vĩnh cửu.	55
Hình 2.11. Cấu hình rôto của Ex-LSPMSM được đề xuất	56
Hình 2.12. Cấu trúc của rôto:	57
Hình 2.13. Mô hình tương đương của phân bố mật độ từ thông khe hở không khí .	57
Hình 2.14. Các mô hình mạch từ theo phương pháp xếp chồng: (a), (b) Mô hình dựa trên NCVC1; (c), (d) Mô hình dựa trên NCVC2.	58
Hình 2.15. Đường cong B–H của thép Steel 1008 dùng cho lá tôn.	61
Hình 2.16. Phân bố từ trường trong động cơ không có cầu từ.....	63
Hình 2.17. Từ thông khe hở không khí (a) và sức điện động không tải B-EMF (b)	64
Hình 2.18. Phân bố từ trường trong động cơ có cầu từ.....	65
Hình 2.19. Đặc tính khởi động của động cơ	66
Hình 2.20. Đặc tính mômen xoắn của động cơ.....	67
Hình 2.21. Đặc tính dòng điện ở chế độ vận hành trạng thái ổn định	68
Hình 2.22. Phân tích FFT sóng hài dòng điện:	69
Hình 2.23. Đặc tính sức điện động không tải.....	70
Hình 2.24. Công suất điện từ và công suất cơ trong quá trình mô phỏng Ex-LSPMSM.	71
Hình 3.1. Đường cong từ trễ và các đặc trưng của vật liệu từ cứng.	74
Hình 3.2. Cấu hình rôto Ex-LSPMSM 3.000 vòng/phút	78
Hình 3.3. Đường cong đặc tính khử từ của NCVC NdFeB-N38	79
Hình 3.4. Đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM.....	80
Hình 3.5. Phân bố mật độ từ thông ở 150 ms.	81
Hình 3.6. Điểm khảo sát mật độ từ thông làm việc của NCVC.....	81
Hình 3.7. Mật độ từ thông của điểm N1 trên NCVC1 theo thời gian.....	81
Hình 3.8. Đặc tính tốc độ của động cơ bị khử từ một phần không đối xứng.....	83
Hình 3.9. Đặc tính dòng điện của động cơ bị khử từ một phần.	84
Hình 3.10. Công suất điện từ và công suất cơ của Ex-LSPMSM.	84
Hình 3.11. Một số kịch bản suy giảm từ của NCVC	85

Hình 3.12. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM ở dạng suy giảm từ ở một cặp NCVC đối xứng nhau.....	86
Hình 3.13. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ ở hai cặp NCVC đối xứng nhau.....	87
Hình 3.14. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ của87 NCVC ở hai dạng một và hai cặp NCVC đối xứng nhau	87
Hình 3.15. Công suất điện từ và công suất cơ trong quá trình mô phỏng Ex-LSPMSM trong trường hợp 1.....	88
Hình 3.16. Khử từ do dòng điện quá cao.	89
Hình 3.17. Minh họa khái quát về tập nghiệm của bài toán phân tích tham số.	93
Hình 3.18. Chiều dài một vòng dây quấn stato	94
Hình 3.19. Cấu hình Ex-LSPMSM thực nghiệm 15 kW, $2p = 2$	97
Hình 3.20. Đặc tính tốc độ khởi động của Ex-LSPMSM 15 kW, $2p = 2$	98
Hình 3.21. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCVC1.	99
Hình 3.22. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCVC2;	100
Hình 3.23. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCVC3;	100
Hình 3.24. Đường cong khử từ của vật liệu NdFeB-N38 của Arnold Magnetic Technologies	102
Hình 3.25. Dạng sóng B-EMF của Ex-LSPMSM 15 kW, $2p=2$ với $w_M = 35$ mm.	103
Hình 3.26. Đặc tính hiệu suất ở trạng thái vận hành xác lập của Ex-LSPMSM; ...	104
Hình 3.27. Hiệu suất và điểm làm việc nhỏ nhất theo sự thay đổi của w_M	105
Hình 3.28. Sơ đồ mạch từ thay thế của Ex-LSPMSM ở chế độ không tải	105
Hình 3.29. Đặc tính làm việc của nam châm vĩnh cửu	106
Hình 3.30. Phân bố từ trường trong động cơ.	109
Hình 3.31. Đặc tính khởi động và mômen của Ex-LSPMSM.	111
Hình 3.32. Đặc tính dòng điện và đặc tính sức điện động ngược (B-EMF)	112
của Ex-LSPMSM.	112
Hình 4.1. Kết cấu rôto sau khi chế tạo	115
Hình 4.2. Mô hình thử nghiệm trong phòng thí nghiệm:	119

Hình 4.3. Đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM trên máy hiện sóng.....	120
Hình 4.4. Kết quả đo sức điện động của Ex-LSPMSM	120
Hình 4.5. Đặc tính hiệu suất của Ex-LSPMSM	121
Hình A.1. Rãnh stato	147
Hình A.2. Rãnh rôto và vành ngăn mạch	149
Hình A.3. Kích thước vòng dây stato.....	152
Hình A.4. Kích thước rãnh rôto	153
Hình A.5. Kích thước rãnh rôto	155
Hình A.6. Rãnh làm mát động cơ.....	165
Hình A.7. Kích thước gân tản nhiệt ngoài vỏ máy	168
Hình A.8. Cụm hộp cực động cơ phòng nổ	175
Hình A.9. Cấu tạo quạt gió động cơ.....	175
Hình A.10. Trục rôto	178

DANH MỤC VIẾT TẮT

TT	Ký hiệu	Tên gọi	Đơn vị
1	η	Hiệu suất	%
2	τ	Bước cực, bước đủ	cm
3	α	Góc vùng pha	độ
4	Φ	Từ thông trong khe hở không khí	Wb
5	δ	Khe hở không khí	cm
6	γ	Hệ số quy đổi rôto về stato	
7	ξ	Tham số khởi động xét đến hiệu ứng mặt ngoài	
8	α_δ	Hệ số cung cực từ	
9	$\Sigma\lambda_1$	Hệ số từ dẫn tản stato	
10	$\Delta\lambda_{1bh}$	Độ suy giảm hệ số từ tản rãnh stato bão hòa	
11	$\Sigma\lambda_{1bh}$	Tổng hệ số từ tản stato khi xét đến bão hoà	
12	$\Sigma\lambda_2$	Hệ số từ dẫn tản rôto	
13	$\Sigma\lambda_{2\xi}$	Tổng hệ số từ dẫn rãnh rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài	
14	$\Sigma\lambda_{2\xi bh}$	Tổng hệ số từ tản rôto khi xét đến bão hòa mạch từ tản và hiệu ứng mặt ngoài	
15	$\Delta\lambda_{2bh}$	Độ suy giảm hệ số từ tản rãnh rôto bão hòa	
16	φ'_2	Góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện rôto	độ
17	α'_n	Hệ số tản nhiệt trên nắp sau	W/cm ² °C
18	α''_n	Hệ số tản nhiệt trên nắp trước không có gió thổi	W/cm ² °C
19	θ_0	Độ chênh nhiệt giữa vỏ máy với môi trường	°C
20	v_1	Hệ số từ tản miệng rãnh stato	
21	θ_1	Độ tăng nhiệt của dây quấn stato	°C
22	ρ_{115}	Điện trở suất dây quấn stato quy về tiêu chuẩn	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

23	v_2	Hệ số từ tản miệng rãnh rôto	
24	ρ_{Al}	Điện trở suất dây quấn rôto quy về tiêu chuẩn	$\Omega mm^2/m$
25	λ_{d1}	Hệ số từ tản phần đầu nối stato	
26	λ_{d2}	Hệ số từ tản phần đầu nối rôto	
27	γ_{Fe}	Khối lượng riêng của tôn silic	kg/dm^3
28	ρ_{Fe}	Suất tổn hao	W/kg
29	Δk_E	Sai số hệ số sức điện động	%
30	ΣP	Tổng tổn hao trong động cơ	kW
31	v_R	Vận tốc gió ở đầu cánh quạt rôto	m/s
32	λ_{r1}	Hệ số từ dẫn tản rãnh stato	
33	λ_{r1bh}	Hệ số từ dẫn tản tạp stato khi xét đến bão hoà	
34	λ_{r2}	Hệ số từ dẫn tản rãnh rôto	
35	$\lambda_{r2\xi}$	Hệ số từ dẫn tản rãnh rôto xét đến hiệu ứng mặt ngoài	
36	$\lambda_{r2\xi bh}$	Hệ số từ tản rãnh rôto khi xét đến bão hoà mạch từ tản và hiệu ứng mặt ngoài	
37	λ_{t1}	Hệ số từ tản tạp stato	
38	λ_{t1bh}	Hệ số từ tản tạp stato khi xét đến bão hoà	
39	λ_{t2}	Hệ số từ tản tạp rôto	
40	λ_{t2bh}	Hệ số từ tản tạp rôto khi xét đến bão hoà	
41	v_v	Vận tốc gió ở cuối thân stato	m/s
42	A	Tải đường	A/cm
43	a	Chiều cao tính toán thanh dẫn khi khởi động	cm
44	a_1	Số mạch nhánh song song	nhánh
45	B_δ	Mật độ từ thông trong khe hở không khí	T
46	b'_{z1}	Chiều rộng răng stato sơ bộ	cm
47	b'_{z2}	Chiều rộng răng rôto sơ bộ	cm

48	b_{11}	Chiều rộng phía trên rãnh stato	cm
49	b_{12}	Chiều rộng phía dưới rãnh stato	cm
50	b_{21}	Chiều rộng phía trên rãnh rôto	cm
51	b_{22}	Chiều rộng phía dưới rãnh rôto	cm
52	b_{41}	Chiều rộng miệng rãnh stato	cm
53	b_{42}	Chiều rộng miệng rãnh rôto	cm
54	B_{g1}	Mật độ từ thông trong gông stato	T
55	B_{g2}	Mật độ từ thông trong gông rôto	T
56	B_{Z1}	Mật độ từ thông trong răng stato	T
57	b_{Z1}	Chiều rộng răng stato trung bình	cm
58	b_{Z11}	Chiều rộng răng stato phía trên	cm
59	b_{Z12}	Chiều rộng răng stato phía dưới	cm
60	B_{Z2}	Mật độ từ thông trong răng rôto	T
61	b_{Z2}	Chiều rộng răng rôto trung bình	cm
62	b_{Z21}	Chiều rộng răng rôto phía trên	cm
63	b_{Z22}	Chiều rộng răng rôto phía dưới	cm
64	$\cos\varphi$	Hệ số công suất	
65	D	Đường kính trong stato	cm
66	D_v	Đường kính tâm vành chập	cm
67	D'	Đường kính ngoài rôto	cm
68	d'	Đường kính sơ bộ dây quấn stato	mm
69	d_1	Đường kính dây quấn stato thứ nhất	mm
70	d_2	Đường kính dây quấn stato thứ hai	mm
71	D_n	Đường kính ngoài lõi thép stato	cm
72	D_t	Đường kính trục	cm
73	E_1	Sức điện động sóng cơ bản	V
74	E_x-IM	Động cơ không đồng bộ phòng nổ	

75	Ex-LSPMSM	Động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới	
76	f	Tần số nguồn cấp, tần số lưới điện	Hz
77	F	Sức từ động toàn mạch từ	A
78	F_{δ}	Sức từ động trong khe hở không khí	A
79	FEM	Phương pháp phần tử hữu hạn	
80	F_{g1}	Sức từ động trên gông stato	A
81	F_{g2}	Sức từ động trên gông rôto	A
82	F_{Z1}	Sức từ động trên răng stato	A
83	F_{Z2}	Sức từ động trên răng rôto	A
84	F_{Zbh}	Sức từ động trung bình của một rãnh stato khi xét đến bão hòa	A
85	G_{g1}	Trọng lượng gông stato	kg
86	G_{g2}	Trọng lượng gông rôto	kg
87	G_{Z1}	Trọng lượng răng stato	kg
88	G_{Z2}	Trọng lượng răng rôto	kg
89	h'_{g1}	Chiều cao gông stato sơ bộ	cm
90	h'_{g2}	Chiều cao gông rôto sơ bộ	cm
91	h_{41}	Chiều cao miệng rãnh stato	cm
92	h_{42}	Chiều cao miệng rãnh rôto	cm
93	h_{g1}	Chiều cao gông stato	cm
94	H_{g1}	Cường độ từ trường trong gông stato	A/cm
95	h_{g2}	Chiều cao gông rôto	cm
96	H_{g2}	Cường độ từ trường trong gông rôto	A/cm
97	h_{r1}	Chiều cao rãnh stato	cm
98	h_{r2}	Chiều cao rãnh rôto	cm
99	H_{Z1}	Cường độ từ trường trong răng stato	A/cm
100	H_{Z2}	Cường độ từ trường trong răng rôto	A/cm

101	I_{μ}	Dòng điện từ hóa	A
102	I'_2	Dòng điện trong thanh dẫn rôto đã quy đổi	A
103	I_1	Dòng điện định mức stato	A
104	I_{1r}	Dòng điện tác dụng stato	A
105	I_{1x}	Dòng điện phản kháng stato	A
106	I_2	Dòng điện rôto	A
107	I_{dbr}	Dòng điện từ hóa tác dụng	A
108	I_{dbx}	Dòng điện từ hóa phản kháng	A
109	I_k	Bội số dòng điện khởi động	lần
110	I_k	Dòng điện khởi động	A
111	$I_{n\xi}$	Dòng điện ngắn mạch khi chỉ xét đến hiệu ứng mặt ngoài	A
112	$I_{nbh\xi}$	Dòng điện ngắn mạch khi xét đến bão hòa và hiệu ứng mặt ngoài	A
113	IPMSM	Động cơ đồng bộ rôto nam châm gắn chìm	
114	I_{td}	Dòng điện chạy trong thanh dẫn rôto	A
115	I_v	Dòng điện chạy trong vành ngắn mạch	A
116	J'_1	Mật độ dòng điện sơ bộ dây quấn stato	A/mm ²
117	J'_2	Mật độ dòng điện sơ bộ trong thanh dẫn rôto	A/mm ²
118	k_{δ}	Hệ số khe hở không khí	
119	k_{μ}	Hệ số bão hòa toàn mạch từ	
120	$k_{\delta 1}$	Hệ số khe hở miệng rãnh stato	
121	$k_{\delta 2}$	Hệ số khe hở miệng rãnh rôto	
122	k_{bk}	Hệ số bão hòa mạch từ	
123	k_D	Tỷ số đường kính trong trên ngoài stato	
124	k_d	Hệ số dây quấn	
125	k_{δ}	Hệ số lấp đầy	

126	k_E	Tỷ số giữa sức điện động cảm ứng trên điện áp nguồn	
127	k_{gcg}	Hệ số gia công gông	
128	k_{gcZ}	Hệ số gia công răng	
129	k_I	Hệ số dòng điện	
130	k_r	Hệ số quán rã	
131	k_R	Hệ số tăng điện trở khi khởi động	
132	k_s	Hệ số sóng	
133	k_y	Hệ số bước ngắn	
134	k_Z	Hệ số bão hòa răng	
135	l_δ	Chiều dài lõi thép tính toán	cm
136	l_1	Chiều dài lõi thép stato	cm
137	L_1	Chiều dài một pha dây quấn stato	m
138	l_2	Chiều dài lõi thép rôto	cm
139	l_{d1}	Chiều dài dây quấn stato phần đầu nối	m
140	L_{g1}	Chiều dài mạch từ phần gông stato	cm
141	L_{g2}	Chiều dài mạch từ phần gông rôto	cm
142	l_{tb}	Chiều dài trung bình một vòng dây quấn stato	m
143	m	Số pha	Pha
144	m_k	Bội số mômen khởi động	lần
145	m_{max}	Bội số mômen max	lần
146	n_1	Số sợi chập loại dây quấn thứ nhất	sợi
147	n_2	Số sợi chập loại dây quấn thứ 2	sợi
148	n_c	Số cánh tản nhiệt	cánh
149	NCVC	Nam châm vĩnh cửu	
150	n_{dm}	Tốc độ từ trường quay, tốc độ đồng bộ	vòng/phút
151	p	Số đôi cực hay số cặp cực	Cặp
152	P'	Công suất tính toán	VA

153	p_0	Tổn hao không tải	W
154	P_1	Công suất điện vào	W
155	P_2	Công suất ra trên trục động cơ	W
156	p_{bm1}	Tổn hao trung bình trên một đơn vị bề mặt	W
157	p_{co}	Tổn hao cơ	W
158	p_{cu1}	Tổn hao dây quấn stato	W
159	p_{cu2}	Tổn hao dây quấn rôto	W
160	$P_{đm}$	Công suất đầu ra, công suất định mức	W
161	$p_{đm}$	Tổn hao đập mạch trên răng rôto	W
162	p_f	Tổn hao phụ	W
163	p_{Fe}	Tổng tổn hao trong lõi sắt	W
164	p_{Fe1}	Tổng tổn hao sắt trong lõi sắt stato	W
165	p_{Feg1}	Tổn hao sắt trong gông stato	W
166	p_{FeZ1}	Tổn hao sắt trong răng stato	W
167	q_1	Số rãnh của một pha dưới một cực	rãnh
168	Q_{Cu1}	Tổn hao đồng trên stato thay thế	W
169	Q_{Fe}	Tổn hao sắt stato thay thế	W
170	Q_R	Tổn hao trên rôto thay thế	W
171	r_v	Điện trở vành ngắn mạch	Ω
172	R_α	Nhiệt trở bề mặt ngoài vỏ máy	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
173	r_1^*	Điện trở dây quấn stato theo đơn vị tương đối	
174	r_2^*	Điện trở dây quấn rôto theo đơn vị tương đối	
175	R'_α	Nhiệt trở đặc trưng cho độ chênh nhiệt giữa không khí nóng bên trong và vỏ máy	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
176	r_2'	Điện trở dây quấn stato quy đổi về stato	Ω
177	$r_{2\xi}'$	Điện trở rôto quy đổi kể đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
178	r_1	Điện trở dây quấn stato	Ω
179	r_2	Điện trở rôto	Ω

180	$r_{2\xi}$	Điện trở rôto xét đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
181	R_c	Nhiệt trở trên lớp cách điện rãnh	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
182	R_d	Nhiệt trở phần đầu nối dây quấn stato	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
183	R_{Fe}	Nhiệt trở trên mặt lõi sắt stato	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
184	$r_{n\xi}$	Điện trở ngắn mạch xét đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
185	$r_{n\xi bh}$	Điện trở ngắn mạch khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài và sự bão hòa	Ω
186	r_{ns}	Điện trở tại hệ số trượt s	Ω
187	r_{td}	Điện trở thanh dẫn rôto	Ω
188	$r_{td\xi}$	Tham số của động cơ kể đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
189	s'_v	Tiết diện vành ngắn mạch sơ bộ	mm^2
190	S'_1	Tiết diện sơ bộ dây quấn stato	mm^2
191	S'_n	Diện tích tản nhiệt trên nắp trước	m^2
192	s'_{td}	Tiết diện thanh dẫn sơ bộ	mm^2
193	S''_n	Diện tích tản nhiệt trên nắp sau	m^2
194	S_1	Tiết diện dây quấn stato	mm^2
195	S_d	Tổng diện tích chiếm chỗ của dây quấn stato	mm^2
196	S_d	đường kính quạt gió	cm
197	s_{dm}	Hệ số trượt định mức	%
198	s_m	Hệ số trượt max	%
199	s_r	Diện tích rãnh stato	mm^2
200	s_{r2}	Tiết diện thanh dẫn rôto	mm^2
201	s_v	Tiết diện vành ngắn mạch	mm^2
202	S_v	Diện tích tản nhiệt của vỏ máy kể cả gân	m^2
203	T_1	Bước răng stato	cm
204	T_2	Bước răng rôto	cm
205	U_1	Điện áp định mức nguồn cấp	V
206	u_{r1}	Số cạnh tác dụng dây quấn stato trong một rãnh	phần tử

207	w_1	Số vòng dây nối tiếp của một pha	vòng
208	x^*_1	Điện kháng stato theo đơn vị tương đối	
209	x^*_{12}	Điện trở kháng hồ cảm theo đơn vị tương đối	
210	x^*_2	Điện trở kháng rôto theo đơn vị tương đối	
211	x'_2	Điện kháng dây quấn rôto quy đổi về stato	Ω
212	$x'_{2\xi}$	Điện kháng rôto kể đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
213	$x'_{2\xi bh}$	Điện kháng rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài và sự bão hòa	Ω
214	x_1	Điện kháng dây quấn stato	Ω
215	x_{12}	Điện kháng hồ cảm	Ω
216	X_{1bh}	Điện kháng stato khi xét đến bão hoà	Ω
217	x_2	Điện kháng dây quấn rôto	Ω
218	$x_{n\xi}$	Điện kháng ngắn mạch khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
219	$x_{n\xi bh}$	Điện kháng ngắn mạch khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài và sự bão hòa	Ω
220	x_{ns}	Điện kháng tại hệ số trượt s	Ω
221	y	Bước dây quấn stato	Rãnh
222	Z_1	Số rãnh stato	rãnh
223	Z_2	Số rãnh rôto	rãnh
224	Z_{ns}	Tổng trở tại hệ số trượt s	Ω
225	Z_{nx}	Tổng trở ngắn mạch kể đến hiệu ứng mặt ngoài	Ω
226	Z_{nxbh}	Tổng trở ngắn mạch khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài và sự bão hòa	Ω
227	β	Hệ số dây quấn	

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Hiện nay, công suất và độ sâu khai thác mỏ ngày càng tăng, dẫn đến việc máy móc được sử dụng ngày càng nhiều trong khai thác mỏ nhằm thay thế sức lao động của con người. Điển hình như một số mỏ trực thuộc Tập đoàn Công nghiệp Than Khoáng sản Việt Nam: mỏ Hà Lâm trang bị lò chợ cơ giới hóa công suất 1,2 triệu tấn than và lò chợ cơ giới hóa công suất 600.000 tấn than, mỏ Núi Béo trang bị lò chợ cơ giới hóa đồng bộ công suất 600.000 tấn than/năm... Việc cơ giới hóa khai thác dẫn tới sử dụng điện năng trong khai thác mỏ ngày một tăng, làm cho tỉ trọng giá thành điện năng trên một tấn than khai thác ngày càng lớn.

Giảm thiểu chi phí điện năng nhằm nâng cao hiệu quả sản xuất là nhiệm vụ cấp bách không chỉ đối với các ngành công nghiệp nói chung mà còn đặc biệt quan trọng đối với ngành khai thác mỏ hiện nay. Trong những năm qua ngành khai thác mỏ đã triển khai, áp dụng nhiều các giải pháp kỹ thuật để tiết kiệm điện năng như sử dụng biến tần để điều chỉnh quá trình làm việc, sử dụng khởi động mềm, sử dụng hệ thống giám sát đo đếm điện năng...

Các giải pháp trên đã phát huy tác dụng nhất định trong việc sử dụng năng lượng tiết kiệm và hợp lý. Tuy nhiên phần lớn điện năng tiêu thụ trong khai thác mỏ thuộc về các hệ truyền động điện. Động cơ điện là thiết bị động lực được dùng để tạo ra các truyền động của các khâu khai thác mỏ. Trong khai thác mỏ ở Việt Nam năng lượng điện được tiêu thụ bởi các động cơ chiếm hơn 75% tổng điện năng tiêu thụ của mỏ, việc sử dụng các động cơ hiệu suất cao để thay thế trực tiếp cho các động cơ không đồng bộ truyền thống có hiệu suất thấp trong khai thác mỏ vẫn chưa được triển khai. Để tiết kiệm năng lượng, một giải pháp thay thế động cơ không đồng bộ phòng nổ (Ex-IM) là sử dụng động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới (Ex-LSPMSM). Ex-LSPMSM có ưu điểm hiệu suất cao, hệ số công suất lớn và không cần bộ khởi động đi kèm, tuy nhiên có nhược điểm là mômen khởi động thấp nên chỉ phù hợp với các khâu công nghệ có yêu cầu mômen khởi động nhỏ, Ex-

LSPMSM có thể thay thế các động cơ Ex-IM truyền thống trong các hệ thống thông gió và bơm thoát nước mỏ.

Đối với Ex-LSPMSM mặc dù được khẳng định là động cơ có hiệu suất, hệ số công suất cao nhưng nếu thiết kế không tốt thì các thông số vận hành sẽ không đảm bảo, làm tăng chi phí sản xuất, thậm chí hiệu suất có thể còn không đạt được các tiêu chuẩn của Ex-IM. Việc thiết kế Ex-LSPMSM chủ yếu liên quan đến kết cấu của rôto nhất là kết cấu của nam châm vĩnh cửu được thiết kế lắp đặt trên rôto để đảm bảo cải thiện được các đặc tính làm việc của động cơ và chi phí sử dụng nam châm vĩnh cửu là hợp lý. Do vậy đề tài **“Nghiên cứu kết cấu rôto để cải thiện đặc tính làm việc của động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp sử dụng trong mỏ hầm lò”** có ý nghĩa cấp thiết và thực tiễn cao.

2. Mục tiêu của luận án

a. Mục tiêu tổng quát

Đề xuất được kết cấu rôto khi chuyển đổi Ex-IM thành Ex-LSPMSM có đặc tính làm việc và hiệu suất cao.

b. Mục tiêu cụ thể:

- Cải hoán thành công Ex-IM loại chiều cao tâm trục 160 mm thành Ex-LSPMSM.
- Cải thiện các thông số: đặc tính khởi động, đặc tính dòng điện của động cơ Ex-LSPMSM nhưng vẫn đảm bảo hiệu suất thiết kế của động cơ.
- Giảm thiểu chi phí giá thành sản xuất qua việc lựa chọn hợp lý nam châm vĩnh cửu sử dụng trong động cơ Ex-LSPMSM.

3. Tính mới và những đóng góp của nghiên cứu

** Về khoa học*

- Đề xuất kết cấu rôto với ba thanh NCVC không có cầu từ cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút phù hợp cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.
- Phân tích đánh giá tác dụng của dòng điện khởi động đến hiện tượng khử từ đối với NCVC trong quá trình khởi động.

- Lựa chọn hợp lý thông số của nam châm vĩnh cửu cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút nhằm cải thiện đặc tính làm việc khi xét đến điều kiện khử từ.

** Về thực tiễn*

- Cải hoán động cơ Ex-IM công suất 15 kW, thành động cơ Ex-LSPMSM 15 kW - 3.000 vòng/phút có đặc tính làm việc phù hợp với các tải quạt gió, bơm nước trong khai thác mỏ hầm lò để nâng cao hiệu quả sử dụng điện năng. Giải pháp kỹ thuật đưa ra sẽ giúp ích cho các nhà thiết kế, chế tạo từng bước cải tiến để đưa động cơ Ex-LSPMSM vào trong khai thác mỏ.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu là: Động cơ Ex-LSPMSM có chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút được cải hoán từ động cơ Ex-IM có cùng thông số (công suất 15 kW, số cực từ $2p = 2$) và có cùng chiều cao tâm trục 160 mm.

- Phạm vi nghiên cứu của luận án: Luận án tập trung vào việc nghiên cứu thiết kế cấu trúc và kích thước NCVC trong rôto động cơ, các thông số còn lại của động cơ được giữ nguyên.

5. Nội dung nghiên cứu

- Tổng quan vấn đề nghiên cứu
- Mô hình toán động cơ Ex-LSPMSM
- Xác định kết cấu rôto để cải thiện đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM
- Thực nghiệm và đánh giá kết quả

6. Phương pháp nghiên cứu

Để thực hiện mục tiêu của Luận án, tác giả sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

- Phương pháp nghiên cứu lý thuyết;
- Mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn.
- Phương pháp thực nghiệm.

7. Những điểm mới của luận án.

- Đề xuất kết cấu rôto với ba thanh NCVC không có cầu từ cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút phù hợp cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.

- Lựa chọn hợp lý thông số của nam châm vĩnh cửu cho Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút nhằm cải thiện đặc tính làm việc khi xét đến điều kiện khử từ.

- Chế tạo thử nghiệm thành công động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút trong phòng thí nghiệm ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.

8. Kết quả của luận án

Luận án gồm phần mở đầu, 4 chương, kết luận và kiến nghị, cùng phụ lục. Nội dung luận án được triển khai theo trình tự từ tổng quan cơ sở lý thuyết và thực tiễn, xây dựng mô hình nghiên cứu, phân tích lựa chọn kết cấu rôto và thông số nam châm vĩnh cửu, đến chế tạo mẫu và kiểm chứng thực nghiệm đối với Ex-LSPMSM dùng trong khai thác mỏ hầm lò.

Chương 1 trình bày tổng quan về động cơ Ex-LSPMSM, bao gồm cấu tạo, nguyên lý làm việc, đặc tính vận hành cơ bản và khả năng ứng dụng của loại động cơ này trong các hệ truyền động điện. Trên cơ sở phân tích đặc điểm tiêu thụ điện năng trong khai thác than hầm lò, chương này đã làm rõ tiềm năng ứng dụng của động cơ Ex-LSPMSM đối với các phụ tải như quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò. Bên cạnh đó cũng đã tổng hợp và phân tích các công trình nghiên cứu trong nước và ngoài nước liên quan đến thiết kế, tối ưu hóa và ứng dụng Ex-LSPMSM, từ đó xác định khoảng trống nghiên cứu của luận án. Kết quả của chương cho thấy các nghiên cứu hiện có chủ yếu tập trung vào động cơ công suất nhỏ hoặc trung bình, tốc độ khoảng 1.500 vòng/phút, trong khi các nghiên cứu đối với động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút, cải hoán từ động cơ không đồng bộ và hướng tới ứng dụng trong mỏ hầm lò còn hạn chế. Đây là cơ sở để xác lập mục tiêu và hướng nghiên cứu của luận án.

Chương 2 xây dựng mô hình toán của động cơ Ex-LSPMSM trên cơ sở lý thuyết máy điện trong hệ tọa độ d–q, đồng thời sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng và phân tích các đặc tính điện từ của động cơ nghiên cứu. Trên cơ sở so sánh giữa mô hình giải tích và mô hình phần tử hữu hạn, chương đánh giá được mức độ phù hợp của các kết quả tính toán và mô phỏng. Từ các kết quả khảo sát về từ thông khe hở không khí, sức điện động không tải, mômen điện từ, dòng điện và hiệu suất, chương đã lựa chọn được cấu hình rôto phù hợp cho động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút. Kết quả quan trọng nhất của chương là xác lập được phương án rôto sử dụng ba thanh nam châm vĩnh cửu không có cầu từ làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo.

Chương 3 tập trung phân tích lựa chọn thông số của nam châm vĩnh cửu có xét đến điều kiện khử từ của nam châm vĩnh cửu trong quá trình vận hành của động cơ. Trên cơ sở đường cong đặc tính khử từ của vật liệu nam châm đã phân tích đánh giá khả năng xảy ra khử từ trong quá trình khởi động bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Đồng thời, chương sử dụng phương pháp phân tích tham số để khảo sát ảnh hưởng của kích thước nam châm đến đặc tính khởi động, sức điện động ngược, hiệu suất của động cơ. Kết quả của chương cho phép lựa chọn hợp lý vật liệu nam châm vĩnh cửu NdFeB và hoàn thiện cấu trúc rôto cho động cơ nghiên cứu khi xét đồng thời các yêu cầu về hiệu suất, đặc tính điện từ và điều kiện chống khử từ.

Chương 4 trình bày quá trình chế tạo, lắp ráp động cơ Ex-LSPMSM và xây dựng mô hình thí nghiệm để kiểm chứng kết quả nghiên cứu. Mẫu động cơ thực nghiệm được chế tạo theo đúng phương án đã lựa chọn từ Chương 2 và Chương 3. Hệ thống thí nghiệm được thiết lập để đo đạc các đại lượng đặc trưng như dòng điện, điện áp, sức điện động không tải và hiệu suất của động cơ.

Kết luận và kiến nghị.

Phụ lục

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về động cơ Ex-LSPMSM

Động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Ex-LSPMSM) có cấu tạo là động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (LSPMSM) [9] kết hợp với vỏ phòng nổ (Ex) để sử dụng trong môi trường cháy nổ như khai thác mỏ hầm lò. Đây là loại động cơ đồng bộ dùng nam châm vĩnh cửu, có khả năng khởi động trực tiếp từ lưới điện xoay chiều nhờ lồng sóc ngắn mạch bố trí trong rôto. Khi nối trực tiếp với lưới, mômen do lồng sóc sinh ra giúp động cơ tăng tốc như một động cơ không đồng bộ. Khi tốc độ rôto tiến gần tốc độ đồng bộ, mômen đồng bộ do tương tác giữa từ trường stato và từ thông nam châm kéo rôto tiến vào tốc độ đồng bộ. Vì không cần bộ biến tần để khởi động, Ex-LSPMSM thích hợp trong các ứng dụng thay thế động cơ không đồng bộ nhằm tiết kiệm năng lượng mà không phải thay đổi hạ tầng điều khiển. So với động cơ không đồng bộ, Ex-LSPMSM có hiệu suất và hệ số công suất làm việc cao hơn nhờ loại bỏ tổn hao kích từ trong rôto khi vận hành đồng bộ [10], đơn giản hơn vì không cần bộ kích từ và cơ cấu cổ góp vành trượt. So với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) thông dụng, lợi điểm lớn là khả năng khởi động trực tiếp trên lưới mà không cần bộ khởi động mềm hay biến tần. Nhược điểm chính nằm ở hành vi quá độ phức tạp trong giai đoạn khởi động, nhạy cảm với tải và với chất lượng điện áp, cùng yêu cầu tối ưu hình học lồng sóc để cân bằng giữa mômen khởi động và tổn hao ở chế độ đồng bộ.

Trong giai đoạn đầu, loại động cơ này khó được thương mại hóa do chất lượng nam châm còn thấp và tính ổn định từ chưa cao. Ở thời điểm đó, nam châm chủ yếu được chế tạo từ hợp kim Alnico và ferit, nên đặc tính từ chưa đáp ứng tốt yêu cầu vận hành của Ex-LSPMSM. Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển của công nghệ vật liệu nam châm đất hiếm, khả năng ứng dụng của động cơ sử dụng nam châm vĩnh cửu ngày càng được mở rộng. Tuy nhiên, giá thành của các vật liệu này vẫn có thể biến động theo từng thời kỳ, từng chủng loại vật liệu và điều kiện thị trường [91].

1.1.1. Cấu tạo động cơ Ex-LSPMSM

Động cơ Ex-LSPMSM là sự kết hợp của động cơ đồng bộ rôto nam châm gắn chìm (IPMSM) và động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc [10]. Với động cơ đồng bộ rôto nam châm gắn chìm (IPMSM) có những ưu điểm rất lớn như: Hiệu suất và hệ số công suất đều cao hơn so với động cơ không đồng bộ hay động cơ một chiều, kích thước nhỏ gọn, tổn hao nhiệt thấp. Tuy nhiên động cơ này lại có một nhược điểm đó là không thể tự khởi động do không có mômen khởi động ban đầu, ngoài ra nam châm vĩnh cửu cũng tạo ra mômen cản phụ dẫn đến quá trình khởi động rất khó khăn. Với động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc (IM) tuy được sử dụng rộng rãi với các ưu điểm như tự khởi động được trực tiếp, vận hành dễ dàng, giá thành rẻ tuy nhiên nhược điểm rất lớn của loại động cơ này là với dải công suất thấp và trung bình thì có hiệu suất và hệ số công suất khá thấp, khi muốn tăng hiệu suất thì vật liệu và kích thước động cơ cũng tăng theo [19].

Đối với động cơ Ex-LSPMSM có cấu tạo kết hợp từ cả hai loại động cơ sao cho phát huy tối đa ưu điểm của cả hai loại động cơ nói trên [73]. Nhờ đó mà nó có được những ưu điểm vượt trội của cả hai loại động cơ này như: tổn hao thấp, hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn, hệ số công suất xấp xỉ bằng 1 và đặc biệt là có khả năng tự khởi động. Động cơ Ex-LSPMSM phù hợp với các ứng dụng yêu cầu tốc độ gần như không đổi, đặc biệt trong dải công suất nhỏ và trung bình. Động cơ Ex-LSPMSM có quá trình khởi động hoàn toàn giống với động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc nhưng lại làm việc với tốc độ đồng bộ như động cơ đồng bộ [110].

Động cơ Ex-LSPMSM là một dạng động cơ lai, trong đó dây quấn ba pha được bố trí trên stato tương tự động cơ không đồng bộ, còn rôto gồm lồng sóc ngắn mạch kết hợp với nam châm vĩnh cửu gắn chìm bên trong. Động cơ Ex-LSPMSM có hiệu suất cao, hệ số công suất lớn và mật độ công suất tốt. Tuy nhiên, mômen khởi động thường không cao, do đó phù hợp hơn với các phụ tải khởi động nhẹ hoặc trung bình. Do không có tổn thất nhiệt trên lồng sóc nhôm trong khi đó thành phần này chiếm khoảng 20% tổng tổn thất của động cơ IM, ngoài ra tổn thất trên dây quấn stato chiếm tỉ lệ lớn nhất trong tổng tổn thất của động cơ. Thành phần tổn thất này trong động cơ

Ex-LSPMSM cũng được giảm đáng kể so với động cơ IM do giảm được dòng điện từ hóa của động cơ, giảm được dòng điện đầu vào của động cơ trên cơ sở nâng cao hệ số công suất $\cos\varphi$, nâng cao được hiệu suất so với động cơ IM.

Trên thế giới, nhiều dòng động cơ Ex-LSPMSM đạt cấp hiệu suất IE3 và IE4 đã được nghiên cứu, phát triển và thương mại hóa với dải công suất từ vài W đến hàng trăm kW [106].

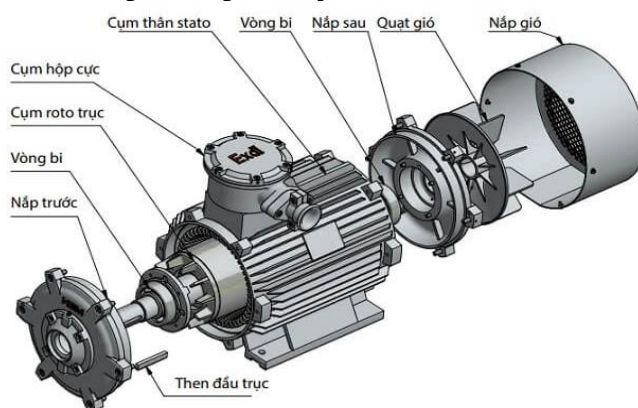
Về cơ bản động cơ Ex-LSPMSM có cấu tạo tương đối giống với động cơ không đồng bộ phòng nổ (Ex-IM), sự khác biệt chủ yếu nằm ở kết cấu rôto có nam châm.



Hình 1.1. Cấu tạo động cơ Ex-LSPMSM [14].

a. Phần tĩnh: bao gồm vỏ máy, lõi thép stato và dây quấn.

- **Vỏ máy:** Là nơi cố định lõi sắt, dây quấn và đồng thời là nơi ghép nối nắp hay gối đỡ trục, không dùng để làm mạch dẫn từ. Vỏ máy có thể được chế tạo bằng gang, thép hoặc hợp kim nhôm. Động cơ Ex-LSPMSM có cấp bảo vệ của vỏ máy đảm bảo IP54 và đảm bảo yêu cầu phòng nổ theo tiêu chuẩn TCVN 7079. Đối với động cơ nghiên cứu trong luận án và các ứng dụng sử dụng trong môi trường mỏ, cấp bảo vệ của vỏ máy được lựa chọn phù hợp theo yêu cầu tiêu chuẩn tương ứng.



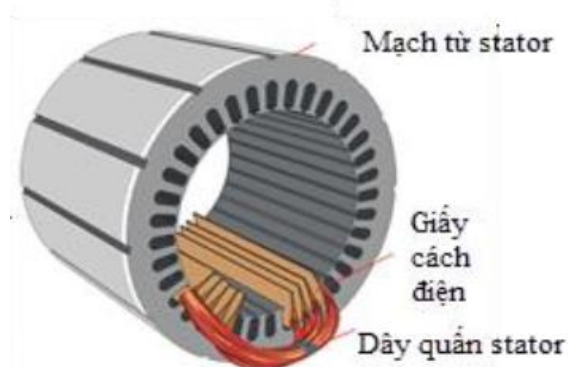
Hình 1.2. Các bộ phận chính của động cơ [14]

- **Lõi sắt:** Là phần dẫn từ, tạo mạch từ khép kín giữa stato và rôto, nên để giảm tổn hao, lõi sắt được làm từ những lá thép kỹ thuật điện có độ dày từ $(0,35 \div 0,65)$ mm ép lại với nhau. Yêu cầu lõi sắt là phải dẫn từ tốt, tổn hao sắt nhỏ và chắc chắn. Mỗi lá thép kỹ thuật điện đều có phủ sơn cách điện trên bề mặt để giảm tổn hao do dòng điện xoáy gây nên (hạn chế dòng điện Foucault, tức dòng điện xoáy).



Hình 1.3. Cấu tạo lõi thép stato [14]

- **Dây quấn stato:** Dây quấn được đặt vào rãnh của lõi sắt và được cách điện. Dây quấn đóng vai trò quan trọng của động cơ điện vì nó trực tiếp tham gia vào quá trình biến đổi điện năng thành cơ năng, đồng thời về mặt kinh tế thì giá thành của dây quấn cũng chiếm một phần khá cao trong toàn bộ giá thành của máy.



Hình 1.4. Cấu tạo dây quấn stato

- **Khe hở:** Là khoảng cách giữa bề mặt rôto và mặt trong của stato vì rôto là một khối tròn nên khe hở đều. Khe hở trong máy điện rất nhỏ từ $(0,2 \div 1)$ mm trong máy

cỡ nhỏ và vừa để hạn chế dòng từ hóa lấy từ lưới vào, nhờ đó hệ số công suất của máy cao hơn.

b. Rôto: bao gồm lõi thép rôto, nam châm vĩnh cửu gắn chìm trong rôto, trục quay động cơ, quạt gió.

Rôto của động cơ Ex-LSPMSM cũng được làm từ các lá thép kỹ thuật điện ghép lại, trong mỗi rãnh của rôto được đặt các thanh dẫn bằng đồng hoặc nhôm dài ra ngoài khỏi lõi thép và được nối ngắn mạch hai đầu bằng hai vành ngắn mạch [14].



Hình 1.5. Phần động của động cơ Ex-LSPMSM [14]

Nam châm vĩnh cửu: Là thành phần sinh ra từ thông kích từ. Nam châm sử dụng phải có lực kháng từ H_c đủ lớn để không bị khử từ dưới tác dụng của từ trường ngoài sinh ra trong quá trình hoạt động, cũng như phải chịu được nhiệt độ đủ lớn để không bị khử từ bởi nhiệt độ phát nóng của động cơ.

Với sự phát triển nhanh và mạnh của nam châm vĩnh cửu đất hiếm như SmCo và NdFeB, không những nâng cao được hiệu suất của động cơ đồng bộ sử dụng NCVC mà còn nâng cao được mật độ công suất, chất lượng và đặc tính động. Giá thành của vật liệu đất hiếm cũng ngày càng giảm và công nghệ định dạng nam châm vĩnh cửu cũng ngày càng thuận lợi hơn, khiến cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp.

Hiệu suất và mômen của động cơ Ex-LSPMSM phụ thuộc đáng kể vào đặc tính của nam châm vĩnh cửu. Để bảo đảm động cơ làm việc hiệu quả, đạt mômen phù hợp và hạn chế nguy cơ khử từ trong quá trình khởi động cũng như vận hành, vật liệu nam châm cần được lựa chọn với mật độ từ dư phù hợp, lực kháng từ cao và độ ổn

định nhiệt tốt. Đồng thời, nam châm phải duy trì được đặc tính từ ổn định trong thời gian dài nhằm bảo đảm hiệu năng và độ tin cậy của động cơ.

1.1.2. Đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM

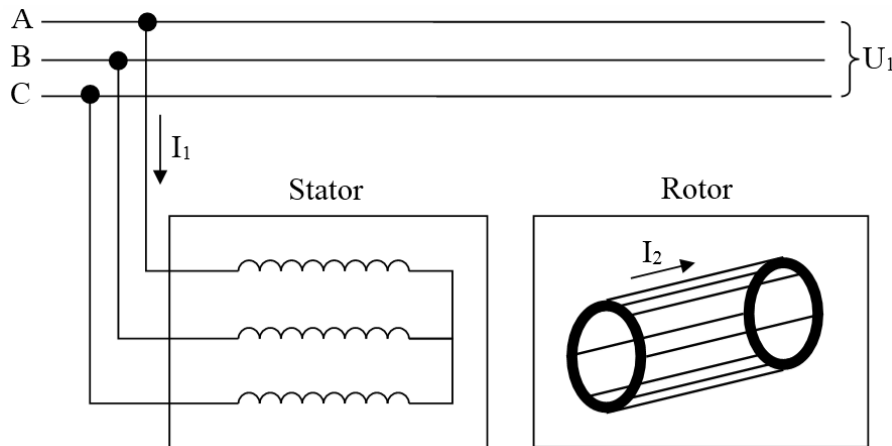
a. Quá trình khởi động

Quá trình khởi động của động cơ Ex-LSPMSM chủ yếu nhờ hiện tượng cảm ứng điện từ giữa từ trường sinh ra trong cuộn dây stato với lồng sóc trong rôto. Khi cấp nguồn vào dây quấn ba pha, trong dây quấn sẽ có các dòng điện chạy trong đó, dòng điện 3 pha này tạo ra từ trường quay, quay với tốc độ:

$$n = \frac{60f}{P} \text{ (vòng/phút)} \quad (1.1)$$

Trong đó: f - Tần số nguồn điện; P - Số đôi cực của dây quấn stato; n - Tốc độ từ trường quay

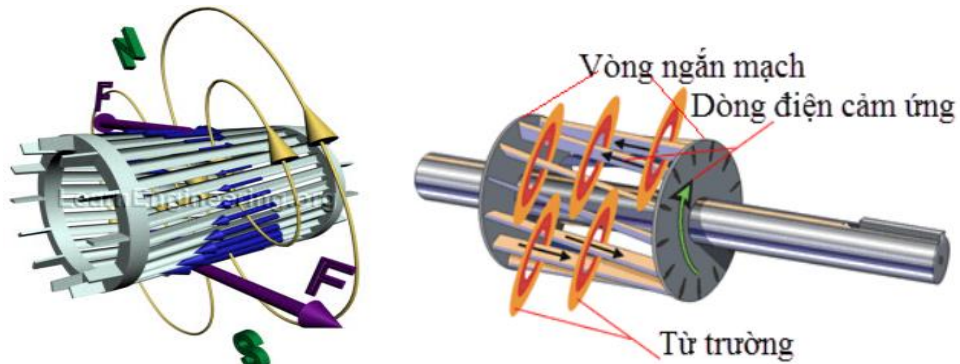
Khi cấp điện áp U_1 với tần số f vào dây quấn stato, dòng điện I_1 sẽ xuất hiện trong dây quấn stato và tạo ra từ trường quay đồng bộ trong khe hở không khí. Từ trường quay của stato cảm ứng trong dây quấn rôto sức điện động E , vì dây quấn rôto kín mạch nên có dòng điện I_2 chạy trong đó. Sự tác dụng tương hỗ giữa các thanh dẫn mang dòng điện với từ trường của máy tạo ra lực điện từ F_{dt} tác dụng lên thanh dẫn có chiều xác định theo quy tắc bàn tay trái.



Hình 1.6. Sơ đồ nguyên lý hoạt động động cơ [3]

Tập hợp các lực tác dụng lên thanh dẫn theo phương tiếp tuyến với bề mặt của rôto tạo ra mômen làm quay rôto. Chiều quay của rôto là chiều quay của từ trường,

vì vậy chiều quay của động cơ phụ thuộc vào thứ tự pha của điện áp lưới đặt trên dây quấn stato.



Hình 1.7. Từ trường quay rôto

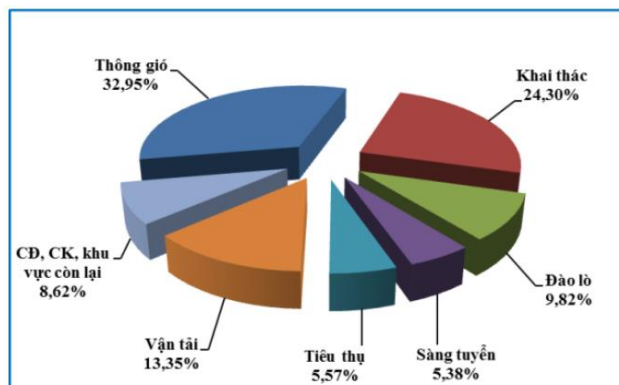
b. Quá trình vận hành xác lập

Sau quá trình khởi động, động cơ vận hành ở tốc độ đồng bộ của từ trường quay, khi đó mômen chủ yếu của động cơ do nam châm vĩnh cửu sinh ra. Mômen không đồng bộ gần như triệt tiêu ở chế độ xác lập đồng bộ. Còn mômen từ trở nhỏ và có tác dụng giữ nam châm ở vị trí cố định theo vị trí của từ trường quay, điều này khiến động cơ có khả năng ổn định tốc độ tốt sau khi đã đạt tốc độ đồng bộ.

1.1.3. Ứng dụng động cơ Ex-LSPMSM trong khai thác than mỏ hầm lò

* Đánh giá chung

Năng lượng tiêu thụ trong khai thác mỏ tập trung chính ở động cơ điện phòng nổ có nhiệm vụ truyền động biến đổi điện năng thành cơ năng. Trong khai thác than hầm lò, năng lượng tiêu thụ cho các khâu chiếm tỷ lệ như hình 1.8 [3].



Hình 1.8. Tỷ lệ tiêu thụ điện năng của các khâu trong khai thác mỏ [3]

Từ tỷ lệ tiêu thụ điện năng như trên nhận thấy rằng quạt thông gió mỏ có tỷ lệ tiêu thụ điện năng lớn chiếm khoảng 32,95% tổng điện năng tiêu thụ và là một trong

các khâu chiếm tỷ lệ tiêu thụ điện năng lớn nhất trong khai thác mỏ, do vậy việc cải tiến công nghệ nâng cao hiệu quả hoạt động giảm chi phí năng lượng cho khâu thông gió mỏ ngày càng được quan tâm đầu tư và nghiên cứu.

Trung Quốc là một trong các nước có nhiều sản phẩm phục vụ khai thác mỏ. Quạt thông gió cục bộ của Trung Quốc bao gồm nhiều chủng loại khác nhau và nhiều dãy công suất khác nhau. Nhiều dòng sản phẩm quạt gió cục bộ của Trung Quốc có mức hiệu suất cao và siêu cao đạt mức IE2 trở lên, như thông số cơ bản của một số quạt thông gió cục bộ TYB của Trung Quốc như bảng 1.1 [3].

Bảng 1.1. Thông số của quạt gió hiệu suất cao TYB của Trung Quốc

Model	TYB42-2	TYB52-2	TYB62-2
Áp suất (Pa)	1700-800	2250-800	2800-800
Lưu lượng (m ³ /h)	90-180	130-240	160-290
Hiệu suất (%)	87,0	89,4	90,5
Tốc độ (vòng/phút)	3000	3000	3000
Độ ồn [dB (A)]	89	91	93
Công suất (kW)	11	15	18,5

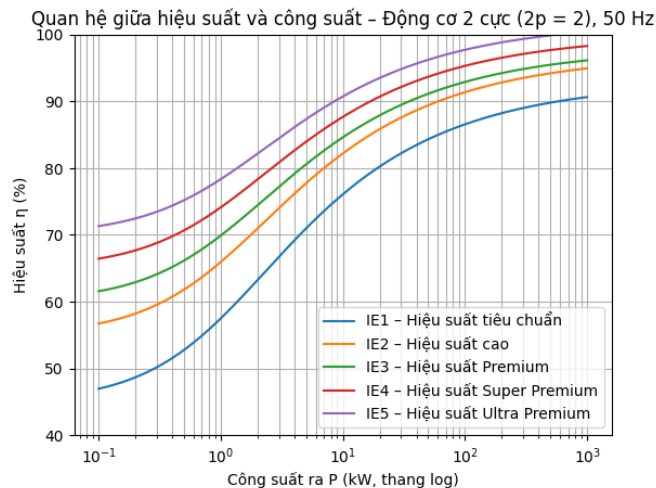
Các phụ tải này trong khai thác mỏ thường có tốc độ cao 3.000 vòng/phút, công suất lớn, động cơ yêu cầu phòng chống cháy nổ (Exdi). Động cơ Ex-LSPMSM có nhược điểm là mômen khởi động thấp nên chỉ phù hợp với các khâu công nghệ có yêu cầu mômen khởi động nhỏ hoàn toàn có thể thay thế cho các động cơ Ex-IM truyền thống trong khâu thông gió, bơm nước của khai thác mỏ.

Ngoài phụ tải về quạt gió thì đặc tính làm việc của động cơ bơm nước mỏ cũng có thông số khởi động cũng tương tự như quạt gió mỏ, nên động cơ Ex-LSPMSM cũng có thể thay thế động cơ Ex-IM trong các bơm thoát nước mỏ. Các đặc tính quan trọng cần quan tâm đến quá trình làm việc của động cơ Ex-LSPMSM bao gồm:

- Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM
- Đặc tính mômen của Ex-LSPMSM
- Đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM
- Đặc tính sức điện động không tải của Ex-LSPMSM
- Hiệu suất của Ex-LSPMSM

- Hệ số công suất $\cos\phi$ của Ex-LSPMSM

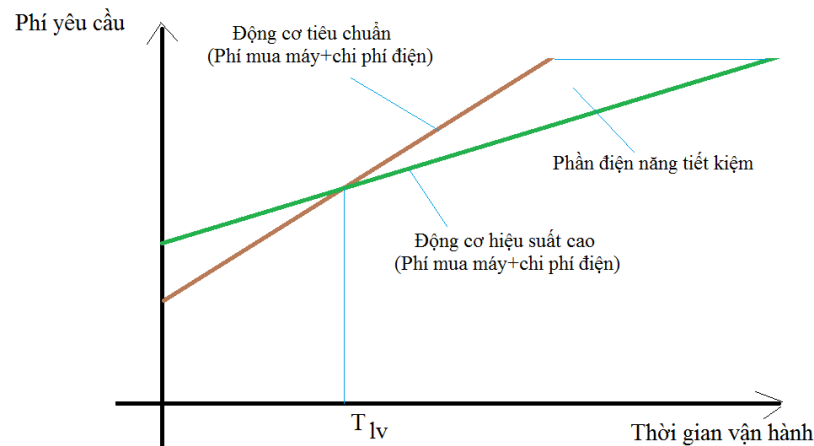
Theo tiêu chuẩn IEC60034-30 hiệu suất động cơ được phân thành các cấp: IE1 - hiệu suất tiêu chuẩn, IE2 - hiệu suất cao, IE3 - hiệu suất đặc biệt, IE4 - hiệu suất siêu đặc biệt và IE5 - hiệu suất cực cao. Theo [18] các mức hiệu suất từ IE1 đến IE5 của động cơ có đồ thị phụ thuộc như hình 1.9.



Hình 1.9. Quan hệ phụ thuộc giữa mức hiệu suất và công suất động cơ [18]

Động cơ truyền thống sử dụng trong khai thác mỏ là các động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc Ex-IM. Loại động cơ này có nhiều ưu điểm như: cấu tạo đơn giản, độ bền cao, mômen khởi động lớn, giá thành rẻ, tuy nhiên nhược điểm lớn của các loại động cơ này là khó có khả năng nâng cao được hiệu suất do vẫn tồn tại tổn thất điện năng trên rôto trong quá trình làm việc. Việc nâng cao hiệu suất động cơ Ex-IM lên mức IE2, IE3 theo tiêu chuẩn IEC60034-30 đang thực sự khó khăn [7],[18].

Việc đầu tư động cơ hiệu suất cao sẽ làm tăng chi phí ban đầu, tương quan chênh lệch giữa chi phí đầu tư mua động cơ và chi phí vận hành động cơ điện trong quá trình sử dụng lâu dài được thể hiện trên hình 1.10 [5]



Hình 1.10. Hiệu quả giữa động cơ tiêu chuẩn và động cơ hiệu suất cao [5]

Từ hình 1.10 thấy rằng, việc phải gánh thêm chi phí ban đầu thì trong khoảng thời gian sử dụng ngắn thì động cơ tiêu chuẩn có lợi hơn về mặt chi phí. Nhưng sau khoảng thời gian làm việc T_{lv} thì việc tiết kiệm được điện năng trong quá trình sử dụng động cơ hiệu suất cao sẽ có hiệu quả kinh tế cao hơn.

Theo nghiên cứu [5] một giải pháp thay thế cho động cơ Ex-IM là sử dụng động cơ Ex-LSPMSM là loại động cơ hiệu suất cao. Động cơ Ex-LSPMSM có thể được ứng dụng ở nhiều khâu trong khai thác mỏ, nhất là các khâu mà có cơ cấu điện năng tiêu thụ lớn như: thông gió, bơm nước và còn có thể được ứng dụng triển khai cho các phụ tải khác.

Các động cơ Ex-IM sử dụng trong khai thác mỏ ở Việt Nam thường có hiệu suất đạt ngưỡng IE1. Giả sử hệ truyền động của khâu khai thác mỏ được nâng cấp từ động cơ có hiệu suất IE1 lên sử dụng động cơ có hiệu suất IE_n (với $n=2, 3, 4$). Chi phí vận hành tiết kiệm được mỗi năm khi sử dụng động cơ hiệu suất cao thay thế cho động cơ hiệu suất IE1 được tính theo công thức [7].

$$S = P_{out} \cdot C \cdot T \left[\frac{100}{E_1} - \frac{100}{E_n} \right] \quad (1.2)$$

Trong đó: P_{out} - công suất động cơ (kW); C - là giá bán điện (đồng/kWh); T - số giờ làm việc mỗi năm (giờ); E_n, E_1 - lần lượt là hiệu suất động cơ theo chuẩn IE_n và IE1.

Chênh lệch chi phí ban đầu giữa hai động cơ hiệu suất cao IE_n và động cơ thông thường IE1 được xác định theo công thức [7]:

$$\Delta C = m \cdot Y \quad (1.3)$$

Trong đó: m - Chênh lệch khối lượng, vật liệu; Y – chênh lệch đơn giá.

Thời gian thu hồi vốn:

$$T_c = \Delta C / S \quad (1.4)$$

Từ cơ sở lý thuyết trên, so sánh hiệu quả kinh tế thu được đối với quạt thông gió cục bộ trong các mỏ hầm lò đang sử dụng động cơ Ex-IM 15 kW có hiệu suất IE1 bằng động cơ Ex-LSPMSM 15 kW có hiệu suất cao IE2, các động cơ có thông số kỹ thuật như trong bảng 1.2.

Bảng 1.2. Thông số của động cơ Ex-IM và động cơ Ex-LSPMSM

TT	Thông số động cơ	Ex-IM	Ex-LSPMSM
1	Công suất (kW)	15 kW	15 kW
2	Điện áp (V)	380/660	380/660
3	Tần số (Hz)	50	50
4	Tốc độ (vòng/phút)	2960	3000
5	Mômen (N.m)	48	48
6	Hiệu suất động cơ (%)	89 (IE1)	93,2 (IE2)

Theo tài liệu [8], khối lượng của nam châm cần dùng cho động cơ Ex-LSPMSM 15 kW khoảng $m_{NCVC} = 1,85\text{kg}$, giá bán nam châm NdFeB là $P_{NCVC} = 250\$/\text{kg}$ tương đương 5,75 triệu đồng/kg. Theo tài liệu [9] chênh lệch chi phí sử dụng lá thép mật độ từ thông cao cho động cơ LSPMSM 15 kW $m'_{NCVC} = 4,5\text{kg}$, giá bán chênh lệch $P'_{NCVC} = 12\$/\text{kg}$ tương đương khoảng 0,276 triệu đồng/kg.

Từ công thức (1.3) xác định chênh lệch chi phí ban đầu giữa động cơ hiệu suất cao Ex-LSPMSM và động cơ tiêu chuẩn Ex-IM là:

$$\Delta C = [m_{PM} \cdot P_{PM} + m'_{PM} \cdot P'_{PM}] = [1,85 \cdot 5,75 + 4,5 \cdot 0,276] = 11,88\text{tr}$$

Chi phí vận hành tiết kiệm được mỗi năm khi thay thế động cơ Ex-LSPMSM 15 kW cho động cơ Ex-IM 15 kW theo công thức (1.2)

$$S = P_{out} \cdot C \cdot T \left[\frac{100}{E_2} - \frac{100}{E_1} \right] = 15.2887.5000. \left[\frac{100}{89,3} - \frac{100}{93,2} \right] = 10,96\text{tr}$$

Trong đó: Giá bán điện $C=2887$ đồng/kWh; Xí nghiệp mở làm việc ba ca
 $T=5000$ h/năm

Thời gian thu hồi vốn khi thay thế động cơ Ex-LSPMSM 15 kW cho động cơ Ex-IM 15 kW của quạt thông gió cục bộ xác định theo công thức (1.4):

$$T_c = \Delta C / S = 11,88 / 10,96 = 1,08 \text{ năm}$$

Do việc tiết kiệm điện năng trong quá trình sử dụng nên việc thay thế động cơ Ex-LSPMSM 15 kW cho động cơ IM 15 kW mang lại hiệu quả kinh tế cao, thời gian thu hồi vốn ngắn trong khoảng 1,08 năm, điều này còn chưa kể đến việc nâng cao hệ số công suất $\cos\varphi$ do động cơ Ex-LSPMSM có hệ số công suất $\cos\varphi$ từ 0,9 trở lên so với động cơ không đồng bộ có hệ số $\cos\varphi$ chỉ khoảng 0,85 từ đó giảm được tổn hao trên đường dây truyền tải.

1.2. Tổng quan nghiên cứu về LSPMSM

1.2.1. Tổng quan các nghiên cứu trong nước

Hiện nay, trong nước các nghiên cứu LSPMSM chưa nhiều, có thể tóm tắt một số nghiên cứu như sau:

Nguyễn Vũ Thanh (2015) [13] tập trung nghiên cứu thuật toán thiết kế, chế tạo hoàn chỉnh động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới điện, từ đó thực hiện tối ưu để nâng cao hiệu suất, hệ số công suất $\cos\varphi=1$ và giảm thể tích nam châm vĩnh cửu động cơ chế tạo theo công nghệ tác giả đề xuất với những nội dung cơ bản như sau:

- Đưa ra được thuật toán tính toán mật độ từ thông điểm làm việc của nam châm vĩnh cửu.
- Đưa ra công thức giải tích xác định được mối quan hệ giữa mật độ từ thông răng và gông của stato và rôto với mật độ từ thông điểm làm việc của nam châm vĩnh cửu.
- Đưa ra được tổ hợp điều kiện để kiểm tra thiết kế cho động cơ LSPMSM đạt hệ số công suất $\cos\varphi=1$.

- Đưa ra thuật toán thiết kế điện từ chi tiết cho từng phần của động cơ LSPMSM có rôto với nam châm bố trí hình vuông, như thiết kế stato, thiết kế rôto, thiết kế nam châm, thiết kế kiểm tra.

- Nâng cao được hiệu suất, hệ số công suất của động cơ LSPMSM 7,5 kW 1.500 vòng/phút vượt mức hiệu suất IE4 theo tiêu chuẩn IEC 60034-30, trong khi giảm được thể tích nam châm, thông qua chương trình tính tối ưu Ansoft Maxwell 2D.

Lê Anh Tuấn (2017) [9], trong luận án, tác giả nghiên cứu mô hình toán nhằm tính toán đặc tính khởi động của LSPMSM trong đó có xét đến yếu tố bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài. Từ đặc tính khởi động thu được, đánh giá những yếu tố, thông số chính ảnh hưởng đến quá trình khởi động của động cơ LSPMSM ba pha, công suất 2,2 kW, tốc độ 1.500 vòng/phút.

- Đề xuất mô hình toán hiệu chỉnh và mô phỏng LSPMSM có xét đến bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài.

- Nghiên cứu các yếu tố chính ảnh hưởng đến quá trình khởi động, đề xuất:

- + Đặc tính điện cảm từ hóa đồng bộ ngang trục L_{mq} xét đến bão hòa mạch từ.
- + Đặc tính điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục L_{md} xét đến bão hòa mạch từ.
- + Hiệu ứng mặt ngoài ảnh hưởng đến đặc tính khởi động.

Bùi Minh Định (2018) [2] thực hiện đề tài cấp Nhà nước KC05, tập trung nghiên cứu làm chủ tính toán, thiết kế và công nghệ chế tạo dây động cơ đồng bộ ba pha LSPMSM có công suất đến 11 kW, tốc độ 1.500 vòng/phút, đạt cấp hiệu suất năng lượng IE2 theo tiêu chuẩn IEC 60034-30. Nội dung nghiên cứu bao gồm: tổng quan về các quy định sử dụng năng lượng ở Việt Nam và trên thế giới; xây dựng phần mềm thiết kế tự động động cơ LSPMSM; ứng dụng phần mềm chuyên dụng SPEED để thiết kế mô hình 2D/3D; tối ưu hóa thiết kế điện từ, thiết kế dẫn nhiệt và tản nhiệt; tối ưu hệ thống làm mát; xây dựng quy trình công nghệ chế tạo như dập, xếp ép lõi tôn, gia công chi tiết cơ khí, đúc nhôm rôto, chế tạo stato và lắp ghép nam châm; đồng thời xây dựng quy trình lắp đặt, vận hành và thử nghiệm động cơ. Trên cơ sở đó, tác

giả đã chế tạo các động cơ LSPMSM công suất 2,2 kW; 5 kW; 7,5 kW; 11 kW, loại 4 cực, đạt hiệu suất tối thiểu mức IE2 theo IEC 60034-30.

Ngoài các công trình nghiên cứu tron vẹn kể trên có một số công trình nghiên cứu dạng các bài báo, bài báo cáo trên các tạp chí và hội thảo có thể kể tới như sau:

- Đỗ Như Ý, Lê Anh Tuấn, Ngô Xuân Cường và Bùi Trung Kiên (2022)[6]. Hội nghị khoa học quốc gia – Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh. Nội dung nghiên cứu tập trung vào việc xác định các tham số đặc trưng của nam châm như mật độ từ thông dư và lực kháng từ, làm cơ sở cho thiết kế mạch từ rôto của động cơ.

Trên cơ sở các thông số tính toán, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình mô phỏng số bằng phần mềm chuyên dụng để phân tích đặc tính điện từ và cơ của động cơ LSPMSM, bao gồm phân bố từ trường, mômen điện từ và đặc tính tốc độ ở trạng thái làm việc. Kết quả mô phỏng cho thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa lựa chọn tham số nam châm và đặc tính vận hành của động cơ, đồng thời khẳng định vai trò của mô phỏng số trong đánh giá thiết kế.

- Đỗ Như Ý, Ngô Thanh Tuấn, Lê Anh Tuấn, Ngô Xuân Cường (2021)[7]. HNKH toàn quốc về Cơ khí - Điện - Tự động hóa (MEAE2021). Đã trình bày phương pháp ứng dụng phần mềm Ansys/Maxwell để phân tích các thông số điện từ và đặc tính làm việc của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM). Nghiên cứu tập trung xây dựng mô hình mô phỏng số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn, cho phép đánh giá chi tiết sự phân bố từ trường trong mạch từ, mật độ từ thông trong khe hở không khí, cũng như các đặc tính mômen và tốc độ của động cơ.

Kết quả mô phỏng cho thấy Ansys/Maxwell là công cụ hiệu quả trong việc phân tích và dự đoán hành vi điện từ của LSPMSM, đặc biệt trong việc xác định các tham số làm việc ở trạng thái xác lập. Tuy nhiên, nội dung nghiên cứu chủ yếu tập trung vào việc mô tả và kiểm chứng khả năng mô phỏng của phần mềm, trong khi các vấn đề đặc thù của LSPMSM như quá trình khởi động trực tiếp, đặc tính quá độ, dao động mômen và nguy cơ khử từ nam châm chưa được phân tích sâu. Do đó, công trình có giá trị như một nghiên cứu phương pháp luận, đồng thời đặt nền tảng cho các

nghiên cứu tiếp theo hướng tới phân tích toàn diện hơn về đặc tính khởi động và tối ưu cấu trúc động cơ LSPMSM.

- Năm 2022, Lê Anh Tuấn, Đỗ Như Ý và Bùi Đức Hùng [11], đã nghiên cứu ảnh hưởng của kiểu dây quấn stato đến đặc tính khởi động của động cơ LSPMSM công suất 5,5 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút bằng phương pháp mô phỏng số. Nghiên cứu tập trung phân tích vai trò của cấu trúc dây quấn stato đối với các tham số khởi động quan trọng như mômen khởi động, thời gian quá độ và khả năng đạt tốc độ đồng bộ khi khởi động trực tiếp từ lưới điện.

Thông qua mô phỏng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn, các tác giả chỉ ra rằng kiểu dây quấn stato có ảnh hưởng đáng kể đến sự phân bố từ trường và sự tương tác giữa mômen không đồng bộ và mômen đồng bộ trong quá trình khởi động. Kết quả cho thấy việc lựa chọn hợp lý cấu hình dây quấn có thể cải thiện mômen khởi động, rút ngắn thời gian tăng tốc và nâng cao độ ổn định của quá trình đồng bộ hóa.

Kết luận: Các công trình trong nước phần lớn mới chỉ tập trung vào động cơ LSPMSM tốc độ 1.500 vòng/phút, với tốc độ này chưa phù hợp với các phụ tải quạt gió hoặc động cơ bơm nước của mỏ thường có tốc độ 3.000 vòng/phút. Một số đã nghiên cứu về LSPMSM có tốc độ 3.000 vòng/phút nhưng công suất của động cơ tương đối nhỏ (công suất 5,5 kW). Trong khi đó các động cơ công suất trong khai thác mỏ sử dụng cho quạt gió và bơm thoát nước cục bộ thường có công suất từ 11 kW đến 18 kW tốc độ 3.000 vòng/phút tương ứng với loại động cơ có chiều cao tâm trục 160 mm.

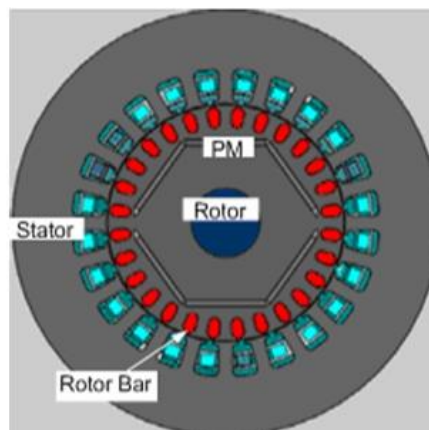
Như vậy thấy rằng, việc giải quyết vấn đề đặt ra đối với động cơ LSPMSM có chiều cao tâm trục 160 mm sử dụng cho quạt gió, bơm nước cục bộ có yếu tố phòng nổ là chưa được giải quyết ở các nghiên cứu trong nước việc này cần thiết phải nghiên cứu.

1.2.2. Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới

a. Nghiên cứu về cấu trúc bố trí nam châm vĩnh cửu.

Đối với động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút thì việc bố trí nam châm vĩnh cửu trong rôto ảnh hưởng nhiều đến thông số làm việc của động cơ. Đối với động cơ LSPMSM – 3.000 vòng/phút cũng đã có một số tác giả nghiên cứu về phương thức bố trí nam châm vĩnh cửu trong rôto để đạt được các thông số làm việc tốt nhất.

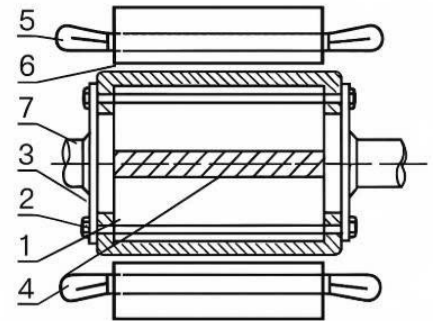
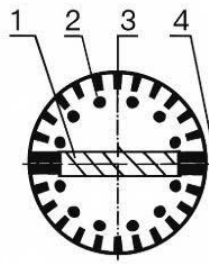
Trong công trình nghiên cứu J. Li, J. Song, Y. Cho (2010)[64], đã nghiên cứu kết cấu rôto của động cơ LSPMSM công suất 3,7 kW. Các tác giả đã đưa ra kết cấu của dạng 3 thanh nam châm vĩnh cửu được bố trí trong rôto. Để cải thiện dòng điện khởi động của động cơ LSPMSM bằng việc thay đổi thể tích rãnh rôto. Với nghiên cứu này các tác giả chưa phân tích được việc ngăn cách các thanh nam châm vĩnh cửu có sử dụng cầu từ có ảnh hưởng gì đến hiệu quả của động cơ LSPMSM hay không.



Hình 1.11. Kết cấu rôto dạng thanh động cơ LSPMSM 3,7 kW – 3.000 vòng/phút [64]

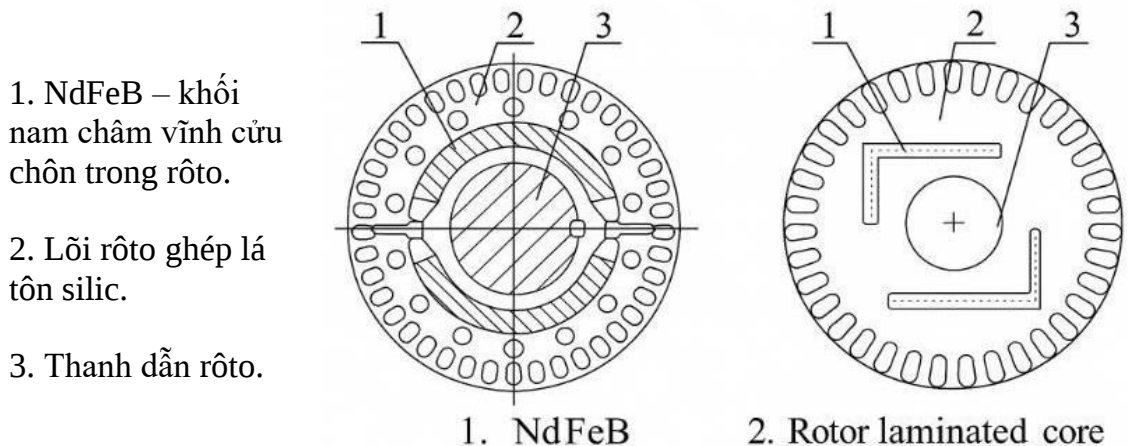
Bài báo D. Bo and B. Xia (2013)[37], trình bày một cấu trúc mới của mạch 2 cực LSPMSM - 3.000 vòng/phút (50/60Hz) công suất 37 kW. Loại nam châm vĩnh cửu sử dụng trong động cơ này là loại NdFeB có dạng hình chữ nhật ở giữa rôto. Động cơ đã được nghiên cứu với tải máy bơm nước và cho thông số kỹ thuật tốt hơn các thông số của động cơ IM cùng loại:

1. Thanh dẫn rôto
2. Vòng ngăn mạch rôto
3. Nam châm vĩnh cửu chôn trong rôto
4. Stato
5. Dây quấn stato
6. Lõi stato
7. Nắp ổ đỡ



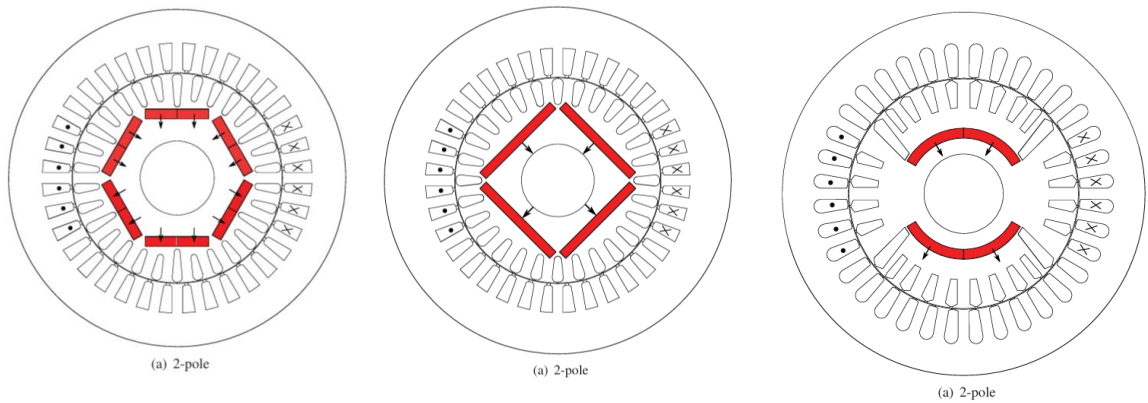
Hình 1.12. Kết cấu rôto động cơ LSPMSM 37 kW – 3.000 vòng/phút [37]

Với nghiên cứu này, để đủ chỗ cho việc bố trí nam châm và đảm bảo các thông số kỹ thuật của động cơ LSPMSM thì các tác giả đã chế tạo lại rãnh rôto. Cũng theo nghiên cứu này đã chỉ ra một số kết cấu rôto đã được triển khai ứng dụng trong việc chế tạo động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút như hình sau:



Hình 1.13. Kết cấu hình khuyên và kết cấu chữ L của động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút [37]

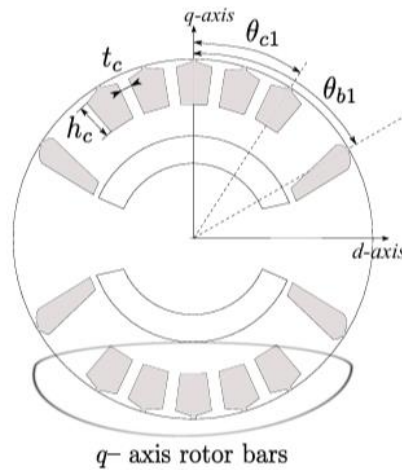
Trong nghiên cứu Damiano Mingardi; Nicola Bianchi; Michele Dai Prè (2017) [42], đã phân tích các dạng kết cấu rôto của động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút với kết cấu nam châm vĩnh cửu hình lục giác công suất 5,5 kW, hình chữ nhật 4 thanh cho loại động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút công suất 7,5 kW, hình lục giác 6 thanh cho động cơ và kết cấu hình vành khuyên cho động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút công suất 7,5 kW.



Hình 1.14. Kết cấu rôto động cơ LSPMSM – 3.000 vòng/phút
công suất 5,5 kW; 7,5 kW [42]

Việc nghiên cứu này lại được chế tạo đánh giá thử nghiệm cho động cơ 1,5 kW. Đồng thời với đó để đảm bảo các thông số làm việc thì một số rãnh rôto của động cơ IM đã được thay đổi kích từ, việc này gây khó khăn trong việc chế tạo, đầu tư cần thiết phải xây dựng lại dây chuyền công nghệ chế tạo rôto từ đầu.

Trong nghiên cứu D. Mingardi and N. Bianchi (2017)[41] đã thiết kế kết cấu của động cơ LSPMSM 1,5kW – 3.000 vòng/phút

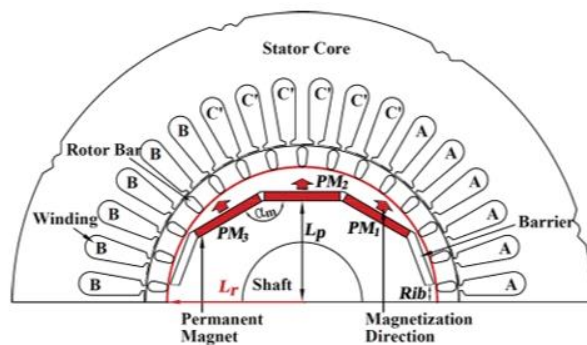


Hình 1.15. Kết cấu LSPMSM 1,5 kW - 3.000 vòng/phút [41]

Trong công trình nghiên cứu này các tác giả đã đề xuất kết cấu nam châm vĩnh cửu hình vành khuyên đồng thời với đó là thiết kế rãnh rôto với hai loại trong đó một loại để làm chắn từ một loại rãnh có kích thước nhỏ lại để tránh bão hoà mạch từ trong rôto. Với kết cấu hình vành khuyên này thì việc chế tạo nam châm vĩnh cửu sẽ rất tốn vật liệu, đồng thời với đó việc lắp ráp nam châm vĩnh cửu vào động cơ là khó

khăn. Kết cấu này chỉ phù hợp với loại động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút có công suất thấp.

Trong nghiên cứu A. Waheed, B. Kim, and Y.H. Cho (2020)[28], đã thiết kế kết cấu nam châm vĩnh cửu trong rôto dạng cánh quạt, với cải tiến này đã tạo ra một hiệu suất hợp lý và mômen của động cơ tạo ra có đặc tính tốt. Với kết cấu này cũng đã giảm được tổn hao trong rôto và cũng đã đề cập tới việc khử từ phụ thuộc vào nhiệt độ của các thanh nam châm vĩnh cửu khi có góc bố trí khác nhau. Bằng cách sử dụng giá trị tối ưu của các dạng thiết kế, kết quả có được sức điện động không tải với động cơ LSPMSM 7,5 kW – 3.000 vòng/phút. Với kết cấu này để đủ diện tích bố trí thanh nam châm vĩnh cửu trong rôto các tác giả cũng đã thiết kế lại thông số của rôto động cơ IM để đảm bảo được thông số làm việc của động cơ LSPMSM 7,5 kW – 3.000 vòng/phút



Hình 1.16. Kết cấu hình cánh quạt động cơ LSPMSM 7,5 kW–3.000 vòng/phút [28]
b. Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến thông số làm việc của động cơ LSPMSM

Với những ưu điểm thấy rõ của động cơ LSPMSM, việc thiết kế động cơ loại này đã thu hút rất nhiều các nhà nghiên cứu. Nhiều bài báo thể hiện rõ những ý đồ thiết kế khác nhau, tập trung vào nhiều khía cạnh thiết kế. Trong nghiên cứu M. F. Palangar (2021) [78], tính toán thiết kế tối ưu động cơ LSPMSM dựa trên quá trình phân tích điện từ và phân tích nhiệt.

Aliabad, M. Mirsalim, N. F. Ershad (2010)[21], Nghiên cứu cải tiến mômen, khả năng khởi động và chế độ vận hành xác lập của LSPMSM. Nghiên cứu đề xuất một phương pháp mở máy đơn giản dựa trên cuộn đổi cực stato, phương pháp này cho phép khắc phục nhược điểm khó khởi động của LSPMSM. Với phương pháp đề

xuất, chất lượng đặc tính tốc độ khởi động tăng lên do làm giảm mômen cản, tăng điện trở lồng sóc trong quá trình mở máy, bên cạnh đó, khả năng đồng bộ hóa động cơ cũng được cải thiện.

A. D. Aliabad, M. Mirsalim (2012)[20], Nghiên cứu quá trình khởi động và mô hình toán LSPMSM. Các tác giả khẳng định, phương pháp đổi cực LSPMSM khi khởi động có rất nhiều ưu điểm như cải thiện mômen khởi động, tăng khả năng đồng bộ hóa và nâng cao hiệu suất ở chế độ vận hành xác lập, tuy nhiên khi đóng cắt đổi cực sẽ xuất hiện một vài dao động mômen có thể làm ảnh hưởng xấu đến quá trình quá độ. Biên độ dao động khi đóng cắt đổi cực phụ thuộc vào tốc độ động cơ, thời điểm đóng cắt, biên độ dao động này lớn có thể dẫn đến chế độ vận hành không ổn định, thậm chí còn làm cho LSPMSM hoạt động dưới tốc độ đồng bộ, vì vậy cần thiết phải nghiên cứu sâu hơn để có thể lợi dụng triệt để ưu điểm của phương pháp đổi cực khi khởi động.

M. H. Soreshjani, A. Sadoughi (2014) [82] Nghiên cứu tiến hành so sánh động cơ không đồng bộ (KĐB) và động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) trên nền mô hình d-q của cả hai loại máy. Nhóm tác giả sử dụng một động cơ KĐB lồng sóc 3 pha, 4 cực, công suất 0,75 kW làm đối tượng thí nghiệm; từ đó hiệu chỉnh rôto để tạo LSPMSM trong khi giữ nguyên phần stato, và mô phỏng trên MATLAB/Simulink để đánh giá đáp ứng quá độ và xác lập. Kết quả cho thấy khả năng khởi động của LSPMSM phụ thuộc đáng kể vào mômen tải và mức điện áp cấp (tải nặng và điện áp thấp làm quá trình đồng bộ khó khăn hơn). Ở chế độ xác lập, LSPMSM đạt hiệu suất vận hành tốt hơn KĐB, vì vậy có tiềm năng tiết kiệm năng lượng khi thay thế KĐB trong các ứng dụng tương đương.

Đối với LSPMSM mặc dù được khẳng định là động cơ có hiệu suất, hệ số công suất cao, mật độ mômen lớn (W. Zhao, M. Tian, X. Wang, Y. Sun 2020 [110], V. Elistratova, 2016 [106]) nhưng nếu thiết kế không tốt thì các thông số vận hành sẽ không đảm bảo, thậm chí có thể còn không đạt được các tiêu chuẩn của IM. Tại quá trình thiết kế LSPMSM, trong các đặc tính thì đặc tính tốc độ khởi động thường được nghiên cứu đầu tiên, vì nó khẳng định khả năng tự khởi động của động cơ. Bên cạnh

đó thì đặc tính dòng điện làm việc ở chế độ xác lập cũng cần được tính đến. Nguyên nhân là, đối với LSPMSM trong quá trình làm việc ở chế độ xác lập, dạng sóng dòng điện thường không “sin” mà dao động điều hòa với tần số nguồn cấp (một hàm điều hòa là một hàm sin). L. S. Maraaba, Z.M. Al-Hamouz, A.S. Milhem, S. Twaha, Machines (2019)[73], G. S. Chingale, R. T. Ugale (2014) [58] do vậy sẽ phát sinh các sóng hài bậc cao. Sóng hài bậc cao này nếu không kiểm soát tốt sẽ dẫn đến nhiều không mong muốn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng điện năng của nguồn cấp, ngoài ra nó còn gây ra độ rung khi làm việc cho chính bản thân động cơ này.

Bên cạnh đó, với LSPMSM hoạt động ở tần số nguồn cấp 50 Hz người ta thường nghiên cứu chế tạo với tốc độ 1.500 vòng/phút, còn những tốc độ khác có rất ít nghiên cứu đề cập D. Stoia, O. Chirilă, M. Cernat, K. Hameyer and D. Ban (2010)[46], A. Takahashi, S. Kikuchi, H. Mikami, K. Ide, A. Binder (2012)[26]. Nhưng, trên thực tế, có rất nhiều nơi ứng dụng tốc độ 3.000 vòng/phút như trong công nghiệp khai thác mỏ, dầu khí... khi tính toán thiết kế động cơ LSPMSM thì phức tạp nhất là phần tính toán nam châm vĩnh cửu (NCVC) đặc biệt lại càng khó khăn đối với loại động cơ có tốc độ cao 3.000 vòng/phút. Việc tính toán NCVC không tốt đưa đến khó gia công chế tạo, hiệu suất của động cơ thấp, động cơ không khởi động được, thời gian khởi động lâu,... ngoài NCVC có chiếm chi phí cao trong động cơ LSPMSM, việc tính toán không tối ưu đưa đến khó thương mại hóa loại động cơ này trong thực tế Rong-Jie Wang, Jean-Pierre Els and Albert Sorgdrager (2014) [90].

Một trong những điểm đang được các nhà khoa học nghiên cứu hiện nay đối với LSPMSM là hiện tượng khử từ NCVC trong quá trình làm việc của động cơ L. Weifu, Z. Haisen, Z. Jian, L. Yingli, L. Mingji (2015)[109], P. Yu, C. Zhu, Y. Shen, G. Zhang (2018)[87], T. Zawilak, M. Gwozdziewicz (2018)[102]. Quá trình khử từ NCVC ảnh hưởng trực tiếp đến thông số sức điện động không tải, như vậy sẽ dẫn đến ảnh hưởng đến hiệu suất làm việc của động cơ, bên cạnh đó nó còn ảnh hưởng đến cả mômen đầu ra. Khử từ NCVC có thể do một trong những nguyên nhân sau: Chúng loại NCVC, nhiệt độ làm việc của NCVC, từ trường bên ngoài đặt vào NCVC, quá trình ôxy hoá, bào mòn theo thời gian.

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) có thể bị khử từ trong một số điều kiện đặc biệt. Trong nghiên cứu Jian-Xin Shen, Peng Li, Meng-Jia Jin, and Guang Yang (2013)[69] đưa ra việc phân tích khử từ động cơ LSPMSM-1.500 vòng/phút và đề xuất một giải pháp để có thể giảm hiện tượng khử từ này. Trong công trình này các tác giả nghiên cứu bằng phân tích phần tử hữu hạn (FEA) bằng cách sử dụng các đặc tính kỹ thuật của nam châm.

c. Nghiên cứu về giải pháp tối ưu thông số động cơ LSPMSM.

Trong công trình nghiên cứu M. F. Palangar, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, and W. L. Soong (2020) [79] trình bày một phương pháp phân tích và tối ưu hóa thiết kế cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM). Mô hình cơ sở ban đầu (Lo) được hình thành bằng cách kết hợp giữa động cơ không đồng bộ (IM) và cấu trúc stato của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu kiểu gắn trong (IPM), trong đó cả IM và IPM đều được xây dựng dựa trên các phương trình dạng lý thuyết. Để đạt được hiệu suất tối ưu, nhóm tác giả tiến hành tối ưu hóa phần lồng sóc của IM nhằm cải thiện mômen khởi động, đồng thời tối ưu hóa cấu hình nam châm vĩnh cửu của IPM để nâng cao hiệu suất xác lập. Việc kết hợp hai rôto đã được tối ưu hóa tạo thành rôto lai cho LSPMSM, mang lại đặc tính điện từ vượt trội trong cả giai đoạn quá độ và ổn định so với mẫu ban đầu (L0). Phương pháp tối ưu hóa được xây dựng trên mô hình toán học chính xác của động cơ và được thực hiện bằng giải thuật di truyền (GA), cho phép tìm ra cấu hình thiết kế đạt hiệu suất cao nhất về mômen, hiệu suất và khả năng đồng bộ hóa.

Solmaz Kahourzade, Amin Mahmoudi, Wooi Ping Hew, and Mohammad Nasir Uddin (2013) [95] đưa ra trình tự thiết kế động cơ LSPMSM với các bước lựa chọn kích thước cơ bản tương tự như đối với động cơ IM, kết cấu rôto lồng sóc với nam châm gắn hình nan quạt. Phần tối ưu giá trị điện trở rôto có nói đến nhưng không đưa ra cụ thể. Bài báo cũng thể hiện thuật toán thiết kế kết hợp giữa FEM và giải tích, tuy nhiên phần thiết kế bằng FEM tác giả lại để ở bước trên, trong khi các kích thước về kết cấu chưa xác định.

Trong nghiên cứu của A. Waheed, B. Kim và Y. H. Cho (2020)[28], tác giả tập trung giải quyết bài toán nâng cao hiệu suất và hệ số công suất cho động cơ LSPMSM công suất 7,5 kW thông qua tối ưu hóa cấu trúc rôto. Nghiên cứu xây dựng mô hình mạch từ tương đương (MEC) nhằm mô tả đặc tính từ thông của máy, đồng thời thiết lập biểu thức phân tích ở chế độ mạch hở để đánh giá hành vi điện từ trong giai đoạn khởi động. Đáng chú ý, hình dạng rãnh chứa nam châm vĩnh cửu trên rôto được xem là biến thiết kế chính và được tối ưu hóa nhằm cải thiện hiệu suất tổng thể. Để xác thực mô hình, nhóm tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn hai chiều (2D-FEA) so sánh kết quả mô phỏng với dự đoán từ MEC. Kết quả cho thấy mô hình phân tích đạt độ phù hợp cao với mô hình số, đồng thời thiết kế rãnh tối ưu mang lại cải thiện đáng kể hiệu suất và hệ số công suất của động cơ. Nghiên cứu góp phần cung cấp phương pháp tối ưu hóa hình học hiệu quả cho các biến thể LSPMSM cùng cấp công suất.

Trong công trình của A.J. Sorgdrager, A.J. Grobler và R.J. Wang (2014)[24], nhóm tác giả đề xuất một phương pháp thiết kế LSPMSM dựa trên sơ đồ khối với mức độ chi tiết cao hơn so với nhiều tài liệu tiền nhiệm. Quy trình thiết kế được kiểm chứng thông qua mô phỏng trên phần mềm Maxwell RMxpert, đồng thời bài báo cũng cung cấp các công thức xác định số vòng dây trong thiết kế stato, góp phần hỗ trợ quá trình tính toán sơ bộ. Tuy nhiên, nghiên cứu chủ yếu tập trung mô tả đặc tính tĩnh của động cơ và triển khai các công thức giải tích ở mức cơ bản; các chỉ tiêu quan trọng như hiệu suất và hệ số công suất của bộ thiết kế chưa được phân tích hoặc báo cáo. Hạn chế này cho thấy nhu cầu mở rộng đánh giá sang đặc tính vận hành động và các chỉ tiêu hiệu suất tổng thể nhằm tăng tính ứng dụng của phương pháp thiết kế đã đề xuất.

Trong công trình của Shixiong Yin, Aiyuan Wang, Chengmin Wang và Jicheng Li (2021)[98], hướng tiếp cận được đặt trong bối cảnh nhu cầu phát triển truyền động một chiều công suất nhỏ với yêu cầu tốc độ thấp và nhiều cực. Nghiên cứu tập trung vào bài toán thiết kế và tối ưu hóa cấu trúc động cơ LSPMSM đáp ứng yêu cầu này. Dựa trên bộ chỉ tiêu thiết kế ban đầu và phân bố tải điện từ, nhóm tác

giả xây dựng mô hình động cơ sơ bộ làm cơ sở đánh giá. Thông qua phân tích đặc tính vận hành, các tham số thiết kế nhạy cảm ảnh hưởng lớn đến hiệu suất được xác định và tích hợp vào bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu. Đáng chú ý, nghiên cứu ứng dụng phương pháp thử nghiệm trực giao kết hợp với các chỉ số đánh giá từ mô phỏng điện từ nhằm thăm dò không gian thiết kế rộng và rút ngắn thời gian lập thiết kế. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất mang lại cải thiện hiệu suất đáng kể đối với động cơ LSPMSM tốc độ thấp, qua đó chứng minh hiệu quả của mô hình tối ưu hóa thiết kế trong các hệ truyền động công suất nhỏ.

Trong nghiên cứu của Jeong-Tae Song, Jian Li và Yun-Hyun Cho (2010)[68], các tác giả tập trung tối ưu hóa kích thước nam châm nhằm giảm chi phí sản xuất động cơ LSPMSM. Bài toán tối ưu được xây dựng dựa trên đặc tính từ thông của nam châm, với biên thiết kế chính là hình dạng rãnh lắp đặt NCVC trên rôto. Kết quả mô phỏng cho thấy mật độ từ thông được cải thiện đáng kể, đồng thời độ gọn mômen và dao động tốc độ được giảm thiểu, qua đó nâng cao tính ổn định cơ điện. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa xem xét các chỉ tiêu đặc tính xác lập như hiệu suất và hệ số công suất $\cos\phi$, cho thấy cần có các phân tích bổ sung để đánh giá toàn diện quá trình thiết kế động cơ.

Trong công trình của Kwang Hee Kim, Jian Li, Jin Hak Jang và Yun-Hyun Cho (2012)[70], nhóm tác giả tập trung tối ưu hóa vị trí rãnh nam châm và khoảng cách cầu nối rôto nhằm cải thiện đặc tính xác lập của động cơ LSPMSM. Phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) được sử dụng để hỗ trợ tìm kiếm cấu hình tối ưu, qua đó nâng cao hiệu quả quá trình thiết kế. Tuy nhiên, bài báo không nêu rõ hàm mục tiêu được áp dụng trong quá trình tối ưu hóa, dẫn đến khó khăn trong việc đánh giá định lượng hiệu quả của thuật toán và khả năng tái lập kết quả nghiên cứu. Điều này cho thấy cần có các nghiên cứu tiếp theo làm rõ tiêu chí tối ưu, đồng thời mở rộng phân tích sang các chỉ tiêu hiệu năng quan trọng khác.

V. Elistratova, M. Hecquet, P. Brochet, D. Vizireanu and M. Dessoude (2013) [107] thực hiện tối ưu đa mục tiêu cho động cơ LSPMSM 7,5 kW cấu hình nam châm vuông gắn chìm với 3 biến, độ rộng khe hở không khí, chiều dày nam châm L_m , chiều

rộng nam châm W_m , 2 ràng buộc về $\cos\phi$ và bội số momen k_m , 2 mục tiêu tối đa hiệu suất và tối thiểu mômen cản. Phương pháp tối ưu sử dụng là EE Exhaustive Enumeration. Kết quả tối ưu được so sánh với động cơ PEIM ở mức IE3 theo tiêu chuẩn IEC 60034-30, với hiệu suất = 0,912, $\cos\phi = 0,977$. Giá trị hiệu suất cao hơn 0,8.

Trong nghiên cứu của Hamza Farooq (2024)[60], tác giả đã xây dựng một mô hình phân tích phục vụ xác định các đặc tính vận hành của máy MSAPDD, bao gồm tốc độ tức thời và mômen điện từ. Mô hình này được thiết lập trên cơ sở sơ đồ mạch điện tương đương (EEC) của MSAPDD, đồng thời phát triển phương pháp mạng từ trở (RDR) nhằm tính toán các tham số then chốt của LSPMSM như từ thông, điện cảm trục d và trục q có xét đến ảnh hưởng của bão hòa từ. Bên cạnh đó, nghiên cứu tích hợp tối ưu hóa đa mục tiêu để bảo đảm hiệu suất tối ưu trong cả giai đoạn khởi động và giai đoạn vận hành đồng bộ của MSAPDD dưới mô hình mô phỏng chuyển tiếp theo thời gian.

Nhận xét: Như vậy thấy rằng, việc nghiên cứu động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút cũng đã được một số tác giả nước ngoài nghiên cứu. Các vấn đề nghiên cứu cũng chỉ đang tập trung vào gam động cơ có công suất 7,5 kW. Đã có nghiên cứu về động cơ 37 kW nhưng việc nghiên cứu về kết cấu bố trí rôto trong động cơ chưa được phân tích rõ ràng, các yếu tố ảnh hưởng liên quan tới hiệu quả làm việc của động cơ LSPMSM cũng đã được đề cập tuy nhiên việc nghiên cứu đến vấn đề khử từ trong động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút chưa được nghiên cứu và đề cập đến. Đối với các nghiên cứu nước ngoài cũng chưa có nhiều công trình nghiên cứu đến loại chiều cao tâm trục 160 mm phù hợp cho tải quạt gió và bơm nước mỏ ở Việt Nam.

Để làm rõ hơn mức độ đóng góp của luận án so với các công trình trong và ngoài nước, Bảng 1.3 trình bày so sánh tổng hợp giữa các hướng nghiên cứu tiêu biểu về động cơ LSPMSM với nội dung nghiên cứu của luận án theo các tiêu chí chính như đối tượng công suất, tốc độ, điều kiện ứng dụng, bài toán kết cấu rôto, vấn đề khử từ, lựa chọn nam châm và mức độ kiểm chứng thực nghiệm.

Bảng 1.3. Bảng so sánh mức độ đóng góp của luận án
với các hướng nghiên cứu tiêu biểu về động cơ LSPMSM

Tiêu chí	Nghiên cứu trước	Luận án này	Mức độ đóng góp của luận án
Đối tượng nghiên cứu	Chủ yếu là LSPMSM cho ứng dụng công nghiệp thông thường.	Ex-LSPMSM dùng cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong mỏ hầm lò.	Chuyển hướng nghiên cứu từ bối cảnh công nghiệp chung sang điều kiện ứng dụng đặc thù của mỏ hầm lò.
Dải công suất	Phần lớn tập trung ở công suất nhỏ hoặc trung bình; nhiều hướng cải hoán áp dụng cho động cơ dưới 7,5 kW.	Nghiên cứu đối tượng 15 kW và gắn với nhóm thiết bị mỏ thường dùng dải 11–18,5 kW.	Nâng đối tượng nghiên cứu lên 15 kW, phù hợp hơn với yêu cầu thực tế của quạt và bơm cục bộ trong mỏ.
Tốc độ động cơ	Chủ yếu ở 1.500 vòng/phút; các nghiên cứu ở 3.000 vòng/phút còn hạn chế.	Tập trung vào động cơ 3.000 vòng/phút.	Bổ sung kết quả cho nhánh nghiên cứu LSPMSM tốc độ cao 3.000 vòng/phút.
Bài toán cải hoán	Đã có hướng cải hoán IM sang LSPMSM, nhưng chủ yếu cho công suất nhỏ hơn hoặc tốc độ thấp hơn.	Cải hoán động cơ IM 15 kW – 3.000 vòng/phút, chiều cao tâm trục 160 mm, sang LSPMSM.	Làm rõ khả năng tận dụng kết cấu, kích thước và cơ sở chế tạo sẵn có của động cơ nguyên mẫu IM.
Bài toán kết cấu rôto	Chủ yếu khảo sát một số cấu hình rôto hoặc bố trí nam châm riêng lẻ.	Đề xuất kết cấu rôto 3 thanh NCVK không có cầu từ cho động cơ mục tiêu.	Đây là đóng góp mới trọng tâm nhất của luận án về mặt cấu trúc rôto.
Bài toán khử từ	Ít công trình phân tích sâu ảnh hưởng của dòng điện khởi động đến hiện tượng khử từ trong đúng đối tượng nghiên cứu.	Phân tích ảnh hưởng của dòng điện khởi động đến khử từ NCVK trong quá trình khởi động.	Bổ sung chiều sâu khoa học cho bài toán thiết kế rôto, gắn với điều kiện khử từ.

Tiêu chí	Nghiên cứu trước	Luận án này	Mức độ đóng góp của luận án
Lựa chọn nam châm vĩnh cửu	Nhiều nghiên cứu sử dụng NCVC nhưng chưa làm rõ đầy đủ cơ sở lựa chọn theo điều kiện khử từ của động cơ mục tiêu.	Lựa chọn NdFeB loại N38 trên cơ sở phân tích lý thuyết, mô phỏng và điều kiện khử từ.	Làm rõ cơ sở kỹ thuật cho lựa chọn vật liệu nam châm, thay vì chỉ dựa trên kinh nghiệm.
Phương pháp lựa chọn thông số	Thường dừng ở khảo sát điện từ hoặc tối ưu cục bộ một vài chỉ tiêu.	Sử dụng phân tích tham số để lựa chọn hợp lý thông số NCVC khi xét đến điều kiện khử từ.	Tạo ra quy trình lựa chọn NCVC có cơ sở hệ thống hơn.
Kiểm chứng thực nghiệm	Một số công trình chủ yếu dừng ở mô phỏng hoặc kiểm chứng còn hạn chế.	Có chế tạo và thử nghiệm mẫu LSPMSM thực nghiệm; kết quả điện áp, dòng điện và hiệu suất phù hợp với mô phỏng.	Tăng độ tin cậy của kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng kết hợp thực nghiệm.
Mức độ đóng góp	Tạo nền tảng về lý thuyết, thiết kế và mô phỏng LSPMSM.	Bổ sung khoảng trống nghiên cứu đối với Ex-LSPMSM 15 kW – 3.000 vòng/phút, cải hoán từ IM, xét đồng thời kết cấu rôto – khử từ – lựa chọn NCVC – kiểm chứng thực nghiệm.	Luận án không chỉ lặp lại hướng nghiên cứu cũ, mà giải quyết một tổ hợp vấn đề cụ thể hơn, khó hơn và sát ứng dụng hơn.

Từ Bảng 1.3 có thể thấy rằng các công trình đã công bố đã tạo nền tảng quan trọng cho nghiên cứu động cơ LSPMSM, đặc biệt ở các hướng thiết kế điện từ, lựa chọn cấu trúc rôto và cải thiện hiệu suất làm việc. Tuy nhiên, đối với động cơ Ex-LSPMSM chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút, cải hoán từ động cơ

Ex-IM và hướng tới ứng dụng cho quạt gió, bơm nước cục bộ trong mỏ hầm lò, các nghiên cứu hiện có vẫn còn những khoảng trống cần tiếp tục làm rõ.

1.3. Khoảng trống của nghiên cứu

Từ kết quả tổng quan các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến động cơ Ex-LSPMSM, có thể rút ra một số nhận xét chính như sau.

Thứ nhất, phần lớn các nghiên cứu đã công bố tập trung vào các ứng dụng công nghiệp thông thường, trong khi các nghiên cứu gắn với điều kiện làm việc đặc thù của ngành khai thác mỏ, đặc biệt là yêu cầu phòng nổ và môi trường làm việc khắc nghiệt, còn tương đối hạn chế.

Thứ hai, nhiều công trình tập trung vào động cơ LSPMSM công suất nhỏ hoặc trung bình với tốc độ khoảng 1.500 vòng/phút; các nghiên cứu đối với động cơ LSPMSM tốc độ 3.000 vòng/phút phục vụ các phụ tải như quạt gió và bơm nước trong khai thác mỏ chưa nhiều.

Thứ ba, theo phạm vi tài liệu mà tác giả đã khảo sát, chưa thấy có nhiều công trình công bố đi sâu vào bài toán cải hoán động cơ không đồng bộ công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút sang động cơ LSPMSM nhằm tận dụng kết cấu, kích thước và cơ sở chế tạo sẵn có của động cơ nguyên mẫu. Mặc dù một số nghiên cứu trước đây đã đề cập đến hướng cải hoán động cơ IM sang LSPMSM, song các nghiên cứu này chủ yếu áp dụng cho các động cơ công suất nhỏ hơn, hoặc tập trung vào những cấu hình có tốc độ thấp hơn. Các nội dung liên quan đến lựa chọn kết cấu rôto, bố trí nam châm vĩnh cửu, đánh giá khử từ và ảnh hưởng của các thông số rôto đối với đặc tính khởi động, dòng điện, mômen và sức điện động không tải của động cơ 3.000 vòng/phút vẫn chưa được phân tích một cách đầy đủ.

Từ các nhận xét trên có thể thấy rằng, khoảng trống nghiên cứu chủ yếu tập trung ở bài toán lựa chọn kết cấu rôto phù hợp cho động cơ Ex-LSPMSM công suất trung bình, tốc độ cao, có khả năng ứng dụng trong điều kiện khai thác mỏ hầm lò. Trên cơ sở đó, luận án tập trung nghiên cứu phương án kết cấu rôto để cải hoán động cơ Ex-IM có chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút thành động cơ Ex-LSPMSM phù hợp cho các phụ tải quạt gió và bơm nước trong mỏ hầm lò. Nội dung

nghiên cứu không chỉ hướng tới nâng cao hiệu suất mà còn tập trung làm rõ ảnh hưởng của kết cấu rôto và thông số nam châm vĩnh cửu đến đặc tính khởi động, chất lượng dòng điện, khả năng đồng bộ và độ tin cậy làm việc của động cơ.

1.4. Kết luận

- LSPMSM là động cơ lai giữa IM và PMSM nên tận dụng được các ưu điểm của hai loại động cơ trên như có thể khởi động trực tiếp từ lưới do có lồng sóc ở rôto hay làm việc dài hạn ở tốc độ đồng bộ nên không có tổn hao rôto từ đó cải thiện hiệu suất của động cơ và được liệt vào dạng động cơ có hiệu suất cao và siêu cao. Tuy nhiên nhược điểm của loại động cơ này là mômen khởi động thấp.

- Với xu hướng tiết kiệm năng lượng ngày nay Ex-LSPMSM đang dần được thay thế cho động cơ Ex-IM ở một số phụ tải có thông số làm việc phù hợp như quạt gió và bơm thoát nước, và đây chính là các phụ tải chính tiêu thụ nhiều năng lượng nhất trong khai thác mỏ. Việc thay thế động cơ IM bằng động cơ LSPMSM đối với quạt gió và bơm thoát nước mỏ sẽ mang lại ý nghĩa lớn trong việc nâng cao hiệu quả sử dụng điện năng trong khai thác mỏ.

- Các nghiên cứu về động cơ LSPMSM trước đây thường tập trung vào hai hướng là thiết kế tối ưu LSPMSM ngay từ đầu hoặc cải hoán IM thành loại LSPMSM và áp dụng cho dãy động cơ LSPMSM có công suất nhỏ dưới 7,5 kW, tốc độ 1.500 vòng/phút chưa có công trình nào nghiên cứu đến loại động cơ công suất 11 kW-18,5 kW tốc độ 3.000 vòng/phút (loại chiều cao tâm trục 160 mm, một cặp cực từ) đây là loại động cơ sử dụng nhiều nhất trong các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ. Ngoài ra, động cơ trong khai thác mỏ thường có kết cấu phức tạp hơn để đảm bảo phòng nổ, đảm bảo làm việc trong môi trường khắc nghiệt.

Với những vấn đề đã nêu ở trên, luận án sẽ tập trung vào nghiên cứu kết cấu rôto phù hợp để cải hoán động cơ Ex-IM loại chiều cao tâm trục 160 mm tốc độ 3.000 vòng/phút sang động cơ Ex-LSPMSM phù hợp cho bơm nước và quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ loại chiều cao tâm trục 160 mm tốc độ 3.000 vòng/phút. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, đối tượng ứng dụng được giới hạn ở các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong mỏ hầm lò. Các kết quả nghiên cứu không nhằm mở rộng trực tiếp cho mọi loại phụ tải truyền động điện khác.

Nhiệm vụ đặt ra phải phân tích được kết cấu bố trí nam châm, kích thước và thông số của nam châm để cải thiện được đặc tính khởi động, mômen, dòng điện và sức điện động ngược của Ex-LSPMSM. Đây là những đặc tính quan trọng nhất trong thiết kế chế tạo động cơ Ex-LSPMSM cũng như cần thiết cho việc ứng dụng cho các phụ tải trong khai thác mỏ.

CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH TOÁN ĐỘNG CƠ Ex-LSPMSM

2.1. Mô hình toán Ex-LSPMSM

Với nền tảng từ mô hình máy điện đồng bộ tổng quát, mô hình toán học mà Honsinger đề xuất được phát triển dựa trên cơ sở lý thuyết của máy điện đồng bộ tổng quát trong hệ tọa độ d-q. Cấu trúc mô hình tổng quát này bao gồm ba nhóm phương trình cơ bản [83].

Phương trình cân bằng điện áp: mô tả mối quan hệ giữa điện áp đặt vào các dây quấn và các thành phần điện trở, điện cảm, cùng với sức điện động cảm ứng do từ trường quay sinh ra, được thiết lập cho cả phần ứng (stato) và rôto.

Phương trình từ thông móc vòng: thể hiện sự phụ thuộc của từ thông vào dòng điện qua các điện cảm dọc trục (L_d) và ngang trục (L_q), đồng thời xét tới điện cảm tản, điện cảm từ hóa và các hệ số hỗ cảm giữa các dây quấn.

Phương trình mômen điện từ: xác định mômen sinh ra từ tương tác giữa từ thông và dòng điện trong các trục d và q, bao quát cả mômen đồng bộ và mômen từ trở đối với các máy có cực lồi.

So với mô hình đồng bộ truyền thống, Honsinger đã bổ sung hai thành phần đặc trưng để phản ánh chính xác cấu tạo và nguyên lý làm việc của LSPMSM:

Rôto lồng sóc được mô hình hóa thông qua các phương trình điện áp và từ thông của rôto, nhằm biểu diễn cơ chế sinh mômen khởi động không đồng bộ.

Nam châm vĩnh cửu (NCVC) được đưa vào phương trình từ thông stato dưới dạng một nguồn từ thông cố định, đại diện cho tác dụng của NCVC ngay cả trong giai đoạn khởi động khi động cơ chưa đồng bộ [25].

Nhờ việc kế thừa mô hình đồng bộ tổng quát và đồng thời tích hợp hai yếu tố trên, mô hình của Honsinger đã trở thành một công cụ phân tích hữu hiệu, cho phép mô tả toàn diện quá trình chuyển tiếp từ vận hành không đồng bộ sang vận hành đồng bộ của Ex-LSPMSM. Mô hình Ex-LSPMSM Honsinger đề xuất [83].

$$\begin{cases} u_d = r_1 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_r \Psi_q \\ u_q = r_1 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_r \Psi_d \\ 0 = r'_d i'_d + \frac{d\Psi'_d}{dt} \\ 0 = r'_q i'_q + \frac{d\Psi'_q}{dt} \\ M_{dt} = \frac{m}{2} \cdot p \cdot (\Psi_d i_d - \Psi_q i_q) \end{cases} \quad (2.1)$$

Nếu động cơ chỉ có kích từ NCVC

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + L_{md} i_{2d} + \Psi_m \\ \Psi_q = L_q i_q + L_{mq} i_{2q} \\ \Psi_{2d} = L_{2d} i_{2d} + L_{md} i_d + \Psi_m \\ \Psi_{2q} = L_{2q} i_{2q} + L_{mq} i_q \end{cases} \quad (2.2)$$

Trong mô hình đề xuất, Honsinger biểu diễn động cơ Ex-LSPMSM trong hệ tọa độ quay d-q, đồng bộ với từ trường stato. Ở dạng tổng quát, phương trình điện áp được xây dựng riêng cho mạch điện phần ứng (stato) và mạch điện rôto (đã quy đổi về phía stato), cụ thể như sau:

Hệ phương trình điện áp của Ex-LSPMSM theo Honsinger [83].

Điện áp stato

$$\begin{cases} u_{ds} = r_1 i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{qs} \\ u_{qs} = r_1 i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \Psi_{ds} \end{cases} \quad (2.3)$$

Điện áp rôto

$$\begin{cases} u'_{dr} = r'_{dr} i'_{dr} + \frac{d\Psi'_{dr}}{dt} = 0 \\ u'_{qr} = r'_{qr} i'_{qr} + \frac{d\Psi'_{qr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Trong đó: u'_{dr}, u'_{qr} : điện áp rôto trục d,q, quy đổi về phía stato

i'_{dr}, i'_{qr} : dòng rôto trục d, q, quy đổi về phía stato

Ψ'_{dr}, Ψ'_{qr} : từ thông móc vòng rôto, quy đổi về phía stato

Honsinger thiết lập các phương trình từ thông trên cơ sở điện cảm phần ứng, điện cảm rôto và điện cảm từ hóa, đồng thời bổ sung thành phần từ thông cố định của nam châm vĩnh cửu.

Từ thông stato

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = (L_{ls} + L_{md})i_{ds} + L_{md}i'_{dr} + \Psi'_m \\ \Psi_{qs} = (L_{ls} + L_{mq})i_{qs} + L_{mq}i'_{qr} \end{cases} \quad (2.5)$$

Từ thông rôto

$$\begin{cases} \Psi'_{dr} = L'_{lr}i'_{dr} + L_{md}(i_{ds} + i'_{dr}) + \Psi'_m \\ \Psi'_{qr} = L'_{lr}i'_{qr} + L_{mq}(i_{qs} + i'_{qr}) \end{cases} \quad (2.6)$$

Trong đó:

ω_r - tốc độ góc rôto;

Ψ'_m - từ thông móc vòng stato do NCVC sinh ra;

L_{ls} - điện cảm tản dây quấn stato;

L_{md} - điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục;

L_{mq} - điện cảm từ hóa đồng bộ ngang trục;

i_{ds} - thành phần dòng stato dọc trục;

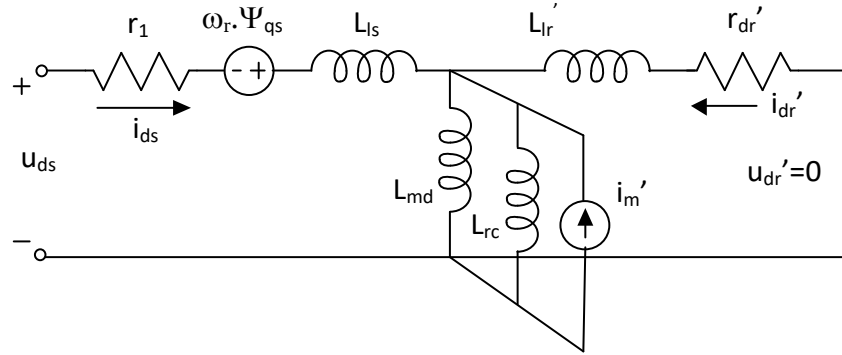
i_{qs} - thành phần dòng stato ngang trục;

i'_{dr} - thành phần dòng rôto quy đổi dọc trục;

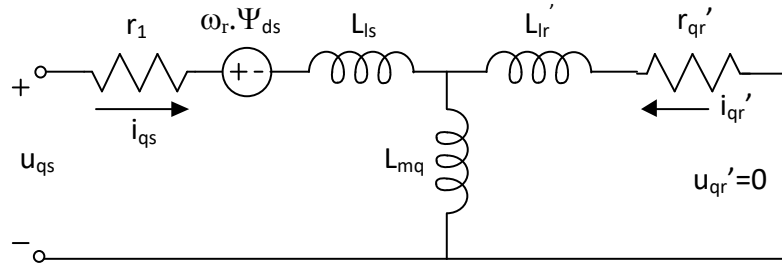
i'_{qr} - thành phần dòng rôto quy đổi ngang trục.

(Trong hệ phương trình (2.4)–(2.6), ký hiệu (') biểu thị các đại lượng của mạch rôto sau khi đã quy đổi về phía stato).

Hình 2.1 và Hình 2.2 chính là sơ đồ mạch điện thay thế dọc trục và ngang trục của Ex-LSPMSM biểu diễn đồ họa của phương trình (2.3) - (2.6) sau khi tách riêng trục d và q, áp dụng quan hệ từ thông – dòng điện, rồi quy đổi sang dạng mạch điện tương đương thỏa mãn các phương trình điện áp và từ thông trong mô hình toán. Trong đó để mô hình hóa thay thế $\Psi'_m = L_{rc}.i'_m$, L_{rc} là điện kháng giả định của nam châm vĩnh cửu, i'_m là dòng điện từ hóa tương đương quy đổi về phía stato của nam châm vĩnh cửu [83]:



Hình 2.1. Sơ đồ mạch điện thay thế trục d của Ex-LSPMSM [83]



Hình 2.2. Sơ đồ mạch điện thay thế trục q của Ex-LSPMSM [83]

Mômen điện từ của Ex-LSPMSM được xác định [25]:

$$M_{dt} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\underbrace{(L_{md} \cdot i'_{dr} \cdot i_{qs} - L_{mq} \cdot i'_{qr} \cdot i_{ds})}_{\text{thành phần mômen không đồng bộ}} + \underbrace{\Psi'_m \cdot i_{qs}}_{\text{thành phần mômen kích từ}} + \underbrace{(L_{md} - L_{mq}) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs}}_{\text{thành phần mômen từ trở}} \right] \quad (2.7)$$

Trong đó:

p - số đôi cực,

L_{md} , L_{mq} - điện cảm từ hóa theo trục d và q,

i_{ds} , i_{qs} - thành phần dòng stato trong hệ dq,

i'_{dr} , i'_{qr} - thành phần dòng rôto quy đổi về stato,

Ψ'_m - từ thông do nam châm vĩnh cửu tạo ra (quy đổi về stato),

Như vậy mômen điện từ của Ex-LSPMSM bao gồm ba thành phần:

M_{kdb} - thành phần mômen KĐB; xuất hiện khi rôto chưa đồng bộ với từ trường quay ($s > 0$). Sinh ra nhờ dòng cảm ứng i'_{dr} , i'_{qr} trong lồng sóc rôto. Với vai trò tạo mômen khởi động để đưa rôto từ trạng thái đứng yên đến gần tốc độ đồng bộ.

M_{kt} - thành phần mômen kích từ, có ngay cả khi rôto đồng bộ ($s=0$), vì NCVVC luôn tạo ra từ thông Ψ'_m . Đây là mômen đồng bộ chính duy trì chuyển động, tương tự mômen của động cơ đồng bộ kích từ bằng dòng DC.

M_{tr} - thành phần mômen từ trở, xuất hiện khi điện cảm theo trục d và q khác nhau ($L_{md} \neq L_{mq}$). Bản chất do bất đối xứng hình học và phân bố từ dẫn rôto. Mômen này đặc trưng cho các động cơ đồng bộ từ trở (SynRM) và cũng tồn tại trong LSPMSM ở mức độ nhỏ.

$$\text{Mômen điện từ: } M_{dt} = M_{kdb} + M_{kt} + M_{tr} \quad (2.8)$$

Từ (2.7) có thể thấy rằng mômen điện từ của Ex-LSPMSM có cấu trúc phức tạp hơn đáng kể so với động cơ không đồng bộ. Cụ thể, ngoài hai thành phần mômen kích từ và mômen từ trở vốn đặc trưng cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM), Ex-LSPMSM còn xuất hiện thêm một thành phần mômen không đồng bộ sinh ra bởi dòng cảm ứng trong lồng sóc rôto khi tồn tại độ trượt. Thành phần mômen không đồng bộ này chỉ tồn tại trong giai đoạn rôto chưa đồng bộ với từ trường stato và đóng vai trò quyết định đến khả năng khởi động, cho phép động cơ đạt đến tốc độ gần đồng bộ mà không cần bộ khởi động phụ trợ. Trong giai đoạn đồng bộ, mômen không đồng bộ triệt tiêu, mômen tổng chỉ còn lại hai thành phần đồng bộ (kích từ và từ trở). So với động cơ Ex-IM, Ex-LSPMSM có khả năng vận hành đồng bộ với hiệu suất cao hơn; so với động cơ đồng bộ NCVVC thuần túy, Ex-LSPMSM ưu việt hơn ở chỗ khởi động trực tiếp trên lưới mà không cần cơ cấu đồng bộ hóa ngoài. Sự kết hợp ba cơ chế sinh mômen này là đặc trưng riêng của Ex-LSPMSM, đồng thời cũng làm cho việc xây dựng mô hình toán và tối ưu hóa thiết kế trở nên phức tạp hơn.

2.2. Mô hình hóa Ex-LSPMSM bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, mô hình động cơ Ex-LSPMSM được xây dựng trên một số giả thiết cơ bản nhằm đơn giản hóa bài toán nhưng vẫn bảo đảm phản ánh đúng bản chất làm việc của động cơ. Cụ thể, nguồn điện cấp cho động cơ được giả thiết là nguồn xoay chiều ba pha đối xứng, tần số không đổi, mạch từ làm việc trong điều kiện đối xứng hình học, các thông số điện từ của stato và rôto được xác định trên cơ sở mô hình đã quy đổi, ảnh hưởng của sai số chế tạo cơ khí, dao

động rung, lão hóa vật liệu và các tác động môi trường ngoài hiện trường mô chưa được xét đầy đủ trong mô hình. Đối với mô phỏng phần tử hữu hạn, bài toán chủ yếu tập trung vào trường điện từ và các đại lượng làm việc chính của động cơ trong điều kiện xác định trước về kết cấu, vật liệu và chế độ tải. Các giả thiết này là phù hợp để phục vụ mục tiêu so sánh, lựa chọn cấu hình rôto và đánh giá xu hướng biến đổi các đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM trong phạm vi nghiên cứu của luận án.

2.2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM, tiếng Việt thường gọi là phương pháp PTHH) là một trong những công cụ số quan trọng và hiệu quả nhất để giải các bài toán vi phân, đặc biệt trong lĩnh vực kỹ thuật điện – điện tử và cơ học. FEM cho phép tìm nghiệm gần đúng của các phương trình đạo hàm riêng trong những miền tính toán có hình học bất kỳ, điều kiện biên phức tạp, và đặc tính vật liệu phi tuyến. Trong khi nhiều bài toán điện từ có thể giải bằng phương pháp giải tích trong trường hợp hình học lý tưởng (khe hở vô hạn, vật liệu tuyến tính, đối xứng cao), thì FEM cung cấp giải pháp tổng quát cho các trường hợp thực tế vốn không thể mô tả bằng công thức đóng.

Nguyên lý cốt lõi của FEM là rời rạc hóa miền liên tục thành các miền con (phần tử) với hình dạng hình học đơn giản như tam giác, tứ giác (trong 2D) hay tứ diện, lăng trụ (trong 3D). Các phần tử này liên kết với nhau tại các điểm nút, đảm bảo tính liên tục của trường vật lý cần khảo sát. Trong phạm vi từng phần tử, nghiệm được xấp xỉ bởi một hàm số, thường là đa thức bậc thấp, xác định thông qua các giá trị tại các nút. Các hàm số này, gọi là hàm dạng (shape functions), phải thỏa mãn điều kiện cân bằng cục bộ của phần tử cũng như điều kiện liên tục tại biên giữa các phần tử.

Khi lắp ráp toàn bộ các phần tử, ta thu được một hệ phương trình đại số tuyến tính toàn cục có dạng [15]

$$K_x = F \quad (2.9)$$

Trong đó: K là ma trận độ cứng toàn cục, x là véc tơ giá trị nút của ẩn, và F là véc tơ tải đặc trưng cho nguồn.

Giải hệ phương trình này cho phép xác định nghiệm xấp xỉ của trường trên toàn miền, từ đó suy ra các đại lượng vật lý như cảm ứng từ B , cường độ từ H , mật độ dòng J hoặc mômen điện từ.

Nguyên lý năng lượng và tác động cực tiểu: Cơ sở lý thuyết sâu xa của FEM trong phân tích trường điện từ được xây dựng trên nguyên lý tác động cực tiểu, còn gọi là nguyên lý Hamilton. Theo nguyên lý này, một hệ vật lý sẽ tiến triển theo trạng thái sao cho biến thiên của đại lượng năng lượng đặc trưng là cực tiểu. Đối với các bài toán tĩnh điện và tĩnh từ, năng lượng điện từ của hệ được xác định hoàn toàn khi biết phân bố thế hoặc từ thế tại mọi điểm trong miền. Trạng thái cân bằng đạt được khi năng lượng toàn phần cực tiểu, và mọi biến thiên nhỏ quanh vị trí cân bằng dẫn đến công của lực điện từ bằng không.

Ứng dụng nguyên lý này trong FEM mang lại hai lợi ích cơ bản:

- Đảm bảo nghiệm thu được là ổn định vật lý (tương ứng với cực tiểu năng lượng).
- Cung cấp công cụ xây dựng dạng yếu của phương trình vi phân, làm cơ sở thiết lập ma trận độ cứng phần tử.

Chính nhờ nguyên lý Hamilton mà FEM trở thành công cụ hiệu quả để phân tích hành vi điện từ trong các hệ máy điện, vốn là nơi tồn tại sự tương tác phức tạp giữa từ trường, dòng điện cảm ứng và chuyển động cơ học.

Trong những thập kỷ trước, FEM ít được sử dụng trong kỹ thuật điện chủ yếu do hạn chế về năng lực tính toán: số lượng phần tử cần thiết để mô phỏng một máy điện trung bình có thể lên tới hàng trăm nghìn hoặc hàng triệu, dẫn tới hệ phương trình đại số kích thước lớn, vượt khả năng xử lý của máy tính thế hệ cũ. Việc giải các hệ này đòi hỏi thời gian rất dài và bộ nhớ lớn.

Ngày nay, cùng với sự phát triển vượt bậc của công nghệ máy tính, đặc biệt là bộ vi xử lý tốc độ cao, bộ nhớ lớn và các thuật toán lặp hiệu quả, phương pháp PTHH đã trở thành công cụ chuẩn mực trong nghiên cứu và thiết kế máy điện. Với khả năng xử lý hàng tỷ phép tính mỗi giây, các máy tính hiện đại có thể giải các bài toán FEM quy mô lớn trong thời gian ngắn, cho kết quả gần như tức thì. Điều này mở ra khả

năng phân tích chi tiết, kể cả khi xét đến đặc tính phi tuyến của vật liệu từ, tổn hao phụ, hiệu ứng bề mặt hoặc hiện tượng dịch chuyển cơ học.

Trong lĩnh vực máy điện, ứng dụng FEM mang lại khả năng mô phỏng chính xác phân bố trường điện từ trong các cấu trúc phức tạp như stato có nhiều rãnh, rôto dạng lồng sóc hoặc nam châm vĩnh cửu. Đặc biệt đối với Ex-LSPMSM – động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp bằng lồng sóc – FEM giúp mô phỏng đồng thời:

- Từ thông nam châm vĩnh cửu đóng vai trò nguồn từ trường cố định.
- Dòng điện cảm ứng trong lồng sóc khi máy ở chế độ không đồng bộ.
- Sự chuyển tiếp từ chế độ không đồng bộ sang đồng bộ, với biến thiên tốc độ lớn và bão hòa mạch từ cục bộ.

Các mô hình giải tích truyền thống thường phải đơn giản hóa mạnh, trong khi FEM cho phép biểu diễn đầy đủ đặc tính phi tuyến và điều kiện biên phức tạp, từ đó thu được kết quả gần với thực nghiệm hơn.

Theo phương pháp phần tử hữu hạn FEM, phân bố từ trường trong mạch từ và không gian xung quanh cơ cấu điện từ là nghiệm của phương trình Poisson viết cho trường điện từ của mô hình động cơ điện. Mô hình này được xây dựng dựa trên định luật Maxwell – Ampe. Theo phương trình Maxwell - Faraday viết cho trường hợp của động cơ điện ở trạng thái xác lập như sau [5],[7]

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.10)$$

trong đó: $\vec{J}$ - mật độ dòng điện một chiều chạy trong cuộn dây nam châm điện, A/m²;

$\vec{H}$ - cường độ từ trường, H/m.

Cường độ từ trường $\vec{H}$ có liên hệ với mật độ từ thông $\vec{B}$ như biểu thức.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2.11)$$

Trong đó: μ_0 - độ từ thẩm của chân không;

μ_r - độ từ thẩm tương đối của môi trường dẫn từ.

Trong trường điện từ, $\vec{B}$ được tính toán qua đại lượng vector từ thế $\vec{A}$ như sau:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.12)$$

Thay (2.11) và (2.12) vào (2.10), ta thu được phương trình.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2.13)$$

Phương trình (2.13) có dạng tổng quát của phương trình Poisson, có thể được diễn giải trong mô hình phân tích ứng với hệ tọa độ Oxyz như sau:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) + J = 0 \quad (2.14)$$

Giải (2.14), tìm được $\vec{A}$, sau đó dựa vào (2.11) và (2.12) để tính được mật độ từ thông B và cường độ từ trường H như sau:

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2.15)$$

Điện áp đặt vào hai cực cuộn dây và điện trở một chiều của cuộn dây, có thể xác định được mật độ dòng điện từ các phương trình:

$$U = R_{dc} i + L \frac{di}{dt}; I_{dc} = \frac{U}{R_{dc}} \quad (2.16)$$

Trong đó: U: điện áp đặt vào 2 cực cuộn dây; R_{dc} : điện trở của cuộn dây;

L: điện cảm của cuộn dây; I_{dc} : dòng điện trong cuộn dây; S_{dq} : tiết diện cuộn dây.

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là một phương pháp số được sử dụng để giải phương trình (2.14) nhằm xác định vector từ thế $\vec{A}$. Thông qua đó, tính toán được từ cảm $\vec{B}$ và cường độ từ trường $\vec{H}$ theo các công thức (2.10) và (2.11), qua đó xác định phân bố từ trường trong không gian với độ chính xác cao. Từ đó sẽ giúp ích nhiều cho người thiết kế và vận hành trong việc hiệu chỉnh thông số của cơ cấu điện từ của máy tuyến từ để tối ưu hóa phân bố từ trường trong không gian nhằm nâng hiệu quả hoạt động của máy. Phương pháp FEM gồm 4 bước cơ bản sau đây [47]:

- Rời rạc hóa miền phân tích thành các miền con. Các phần tử liên kết với nhau tạo thành lưới.
- Chọn hàm liên thuộc và xấp xỉ lời giải trên mỗi phần tử.
- Ghép tất cả các phần tử trong miền phân tích để thu được ma trận hệ thống.
- Giải ma trận hệ thống bằng phương pháp lặp.

Để tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn cần phải có sự hỗ trợ của các máy tính số và các chương trình phần mềm được viết dựa trên nền tảng toán học của FEM.

2.2.2. Các phần mềm FEM phổ biến trong nghiên cứu máy điện

Nhiều phần mềm thương mại và mã nguồn mở đã tích hợp FEM để giải quyết các bài toán điện từ, trong đó một số công cụ được sử dụng phổ biến nhất trong nghiên cứu máy điện gồm:

FEMM (Finite Element Method Magnetics) là phần mềm miễn phí, gọn nhẹ, dùng để phân tích trường điện từ 2D và bài toán đối xứng trục bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Phần mềm có giao diện trực quan, hỗ trợ ngôn ngữ kịch bản Lua, cho phép mô phỏng nhanh phân bố từ thông, mật độ cảm ứng từ, tổn hao lõi thép, mômen điện từ và đặc tính của nam châm vĩnh cửu. Ưu điểm nổi bật của FEMM là dễ sử dụng, phù hợp cho học tập và nghiên cứu sơ bộ, đặc biệt trong các bài toán từ trường DC, AC, vật liệu phi tuyến có đường cong B-H và tính toán mômen theo phương pháp Virtual Work. Tuy nhiên, FEMM chỉ giới hạn trong không gian 2D, không mô phỏng trực tiếp được các hiệu ứng 3D như lệch rãnh, dòng điện xoáy ba chiều hay phần đầu dây quấn; mô phỏng chuyển động quay phải thực hiện theo từng bước góc rôto; đồng thời chưa hỗ trợ đầy đủ các bài toán phi tuyến phức tạp, nhiệt và cơ học. Vì vậy, FEMM phù hợp cho giai đoạn khảo sát ban đầu và đánh giá sơ bộ các đặc tính điện từ, trong khi ở giai đoạn thiết kế chi tiết, đặc biệt đối với động cơ LSPMSM có yêu cầu cao về độ chính xác, nhiệt, cơ học và an toàn phòng nổ, cần sử dụng các phần mềm mạnh hơn như ANSYS Maxwell, JMAG hoặc Motor-CAD.

Opera-2D/3D (Cobham) là một phần mềm thương mại mạnh mẽ trong lĩnh vực phân tích và thiết kế điện từ bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Khác với FEMM vốn chỉ giới hạn trong bài toán 2D và phân tích sơ bộ, Opera cung cấp khả năng mô phỏng toàn diện cả trong không gian 2D lẫn 3D, hỗ trợ đầy đủ các bài toán tĩnh, động và đa trường. Nhờ đó, Opera đặc biệt thích hợp cho việc mô phỏng chi tiết những hệ thống phức tạp, bao gồm cả máy điện công suất lớn, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, động cơ cảm ứng và máy phát điện. Một điểm mạnh nổi bật của Opera là độ

chính xác cao trong phân tích phi tuyến, khả năng xử lý bão hòa mạch từ, hiện tượng khử từ cục bộ của nam châm, dòng điện xoáy trong rôto và các hiệu ứng không gian ba chiều như lệch rãnh hay đầu dây quấn. Ngoài ra, phần mềm còn có khả năng liên kết phân tích điện từ với nhiệt và cơ học, cho phép đánh giá toàn diện hiệu suất, tổn hao, nhiệt độ, ứng suất và độ bền cơ học của máy điện trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt. Chính vì vậy, Opera thường được các viện nghiên cứu và tập đoàn công nghiệp lớn lựa chọn trong thiết kế tối ưu cho các thiết bị điện quay có yêu cầu khắt khe. Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất của Opera là yêu cầu phần cứng tính toán mạnh và chi phí bản quyền cao, điều này khiến phần mềm khó tiếp cận với sinh viên và các nhóm nghiên cứu nhỏ, đồng thời không phù hợp cho các mục đích học tập sơ bộ.

Opera-2D/3D (Cobham) là phần mềm thương mại mạnh trong phân tích và thiết kế điện từ bằng phương pháp phần tử hữu hạn, hỗ trợ cả bài toán 2D và 3D. So với các công cụ đơn giản như FEMM, Opera cho phép mô phỏng đầy đủ hơn các bài toán tĩnh, động và đa trường, nên phù hợp với các hệ thống điện từ phức tạp như máy điện công suất lớn, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, động cơ cảm ứng và máy phát điện. Ưu điểm nổi bật của phần mềm là khả năng phân tích phi tuyến với độ chính xác cao, mô phỏng tốt hiện tượng bão hòa mạch từ, khử từ cục bộ của nam châm, dòng điện xoáy trong rôto và các hiệu ứng không gian ba chiều như lệch rãnh hay đầu dây quấn. Ngoài ra, Opera còn cho phép liên kết phân tích điện từ với nhiệt và cơ học để đánh giá toàn diện tổn hao, nhiệt độ, ứng suất và độ bền cơ học của thiết bị. Tuy nhiên, hạn chế của phần mềm là yêu cầu cấu hình tính toán cao và chi phí bản quyền lớn, do đó phù hợp hơn với các viện nghiên cứu và doanh nghiệp hơn là mục đích học tập hoặc nghiên cứu sơ bộ.

ANSYS Maxwell 2D/3D là một trong những phần mềm mô phỏng điện từ mạnh và toàn diện nhất hiện nay, cho phép phân tích chi tiết trong cả miền 2D và 3D với độ chính xác cao. Ưu điểm nổi bật của Maxwell là khả năng mô phỏng trực tiếp các quá trình quá độ và chuyển động quay, đồng thời hỗ trợ đầy đủ vật liệu phi tuyến, hiện tượng bão hòa mạch từ và khử từ cục bộ của nam châm. Phần mềm cho phép tính toán chính xác các đại lượng điện từ như từ thông, mômen, dòng điện và sức điện

động trong các chế độ khởi động, đồng bộ và vận hành xác lập. Ngoài ra, Maxwell còn có khả năng tích hợp với các bài toán nhiệt và cơ học, giúp đánh giá đồng thời tổn hao, phát nóng và ứng suất cơ học của động cơ. Nhờ đó, ANSYS Maxwell đặc biệt phù hợp cho nghiên cứu và thiết kế động cơ Ex-LSPMSM, nơi các hiện tượng điện từ phi tuyến và chuyển động quay cần được mô phỏng đầy đủ. Hiện nay, phần mềm này được sử dụng rộng rãi trong cả nghiên cứu và công nghiệp, đặc biệt khi kết hợp với các mô-đun khác trong hệ sinh thái ANSYS để xây dựng mô hình đa vật lý hoàn chỉnh.

Lựa chọn phần mềm mô phỏng

Từ cơ sở lý thuyết và các ứng dụng thực tiễn có thể thấy rằng, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là công cụ quan trọng trong nghiên cứu, thiết kế và tối ưu máy điện hiện đại. Phương pháp này cho phép phân tích các hiện tượng điện từ phức tạp mà mô hình giải tích khó mô tả chính xác, đặc biệt khi xét đến vật liệu phi tuyến, hình học bất đối xứng và điều kiện biên phức tạp. Đối với động cơ Ex-LSPMSM, FEM đặc biệt hữu ích trong mô phỏng quá trình khởi động, bắt đồng bộ và vận hành ổn định, qua đó cho phép đánh giá phân bố từ thông, mômen điện từ, tổn hao và ảnh hưởng của các thông số kết cấu đến hiệu suất động cơ. Trong số các phần mềm hiện có, ANSYS/Maxwell được đánh giá là công cụ mạnh và toàn diện nhờ khả năng phân tích quá độ, hỗ trợ chuyển động quay, mô phỏng phi tuyến và tích hợp đa trường. Vì vậy, trong luận án này, tác giả lựa chọn phần mềm ANSYS/Maxwell 2D để mô phỏng động cơ Ex-LSPMSM; các kết quả thu được được sử dụng làm cơ sở để so sánh, phân tích và kiểm chứng với kết quả của mô hình toán đề xuất.

Trong luận án này, mô hình giải tích và mô hình phần tử hữu hạn được sử dụng theo hai vai trò bổ sung cho nhau. Mô hình giải tích được dùng để mô tả nguyên lý làm việc, thiết lập các quan hệ cơ bản giữa điện áp, dòng điện, từ thông, mômen và tốc độ của động cơ Ex-LSPMSM, qua đó làm cơ sở lý thuyết cho việc phân tích các đặc tính làm việc và xác định sơ bộ các thông số thiết kế. Trong khi đó, mô hình phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng để đánh giá chi tiết hơn các đặc tính điện từ của động cơ với xét đến hình học thực của kết cấu rôto, phân bố từ trường, sức điện động không

tải, mômen điện từ, dòng điện khởi động và ảnh hưởng của các phương án bố trí nam châm vĩnh cửu. Như vậy, mô hình giải tích đóng vai trò định hướng và giải thích bản chất vật lý của bài toán, còn mô hình FEM được sử dụng như công cụ kiểm chứng, so sánh và lựa chọn cấu hình rôto phù hợp cho đối tượng nghiên cứu.

2.2.3. Mô hình hóa Ex-LSPMSM trên phần mềm ứng dụng FEM

Động cơ Ex-LSPMSM có các thông số: Công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút và có kích thước được cho trong bảng 2.1 [10]:

Bảng 2.1. Thông số động cơ Ex-LSPMSM công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút

<i>Tham số</i>	<i>Ký hiệu</i>	<i>Giá trị</i>	<i>Đơn vị</i>
Đường kính ngoài Stato	D_{out}	245	mm
Đường kính trong Stato	D_{in}	152	mm
Đường kính ngoài Rôto	D'	151	mm
Đường kính trục Rôto	D_t	52	mm
Vật liệu thép Stato	Steel 1008		
Số lượng rãnh stato	Z_1	36	Rãnh
Số lượng rãnh rôto	Z_2	28	Rãnh
Chiều dài khe hở không khí	δ	0,5	mm
Điện áp nguồn	U_n	380/660	V
Tần số	f	50	Hz
Loại NCVC	NdFeB	N38SH	
Kích thước 1 thanh (dài.rộng.dày)	mm	35.34.8	

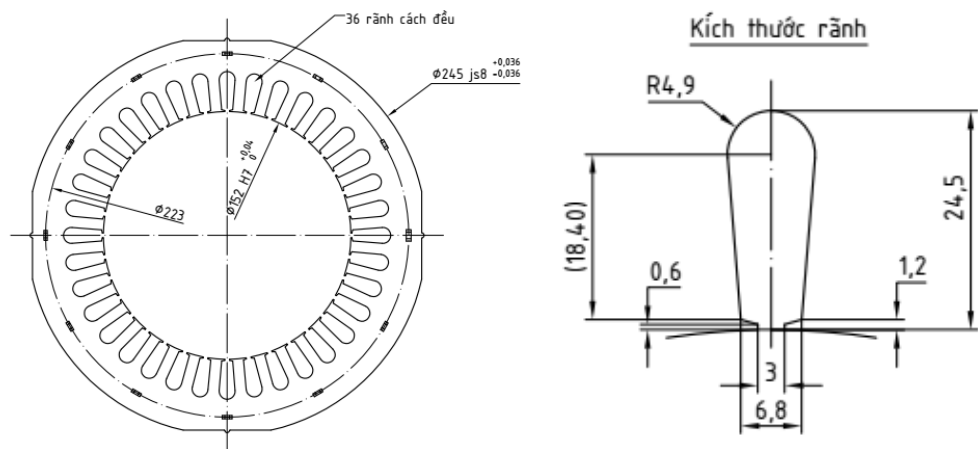
Động cơ lựa chọn để mô phỏng thiết kế là loại ba pha và có các thông số kỹ thuật đặc trưng: công suất định mức $P_{đm} = 15$ kW; $n_{đm} = 3.000$ (vòng/phút); $U_{đm} = 380/660$ (V) loại 2p = 2. Để thực hiện quá trình mô phỏng thiết kế tối ưu động cơ Ex-

LSPMSM, thực hiện việc tính toán thông số động cơ ban đầu với kết quả tính toán đưa ra trong bảng 2.2.

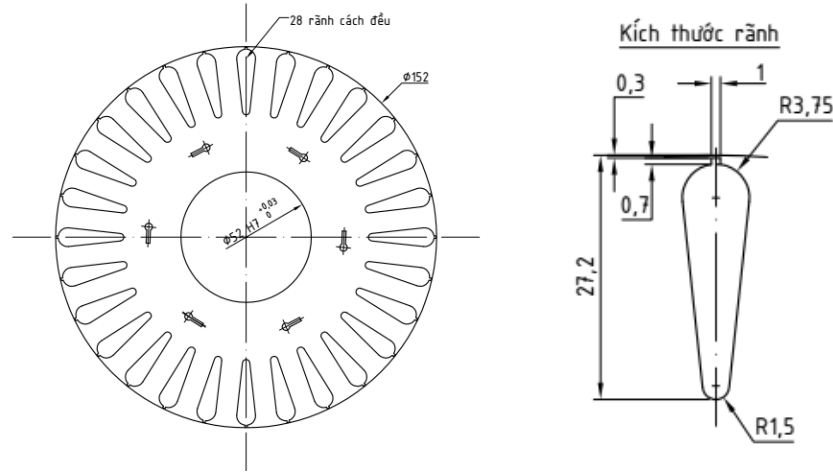
Bảng 2.2. Kết quả tính toán thông số động cơ $P_{dm} = 15 \text{ kW}$

CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN											
DỮ LIỆU			Kích thước khuôn stato			RÃNH STATO			RÃNH RÔTO		
P_{dm}	15	kW	x	2.5	cm	h_{r1}	2.45	cm	h_{r2}	2.67	cm
U_{dm}	660	V	Lb	22	cm	b_{01}	0.3	cm	b_{02}	0.1	cm
hs_{dm}	89	%	Toy	22.2	cm	h_{01}	0.66	cm	h_{02}	0.05	cm
$\cos\phi_{dm}$	0.88		fd	5.5	cm	h_{d1}	0.531	cm	h_{d2}	0.132	cm
n_{db}	3000	vòng/phút	Cb	97.9	cm	b_{11}	0.68	cm	b_{21}	0.75	cm
f	50	Hz	R/r	25/4.4	cm	b_{12}	0.98	cm	b_{22}	0.3	cm
Dteta	19.051	Độ C	Loại động cơ			s_{r1}	193.65	mm ²	s_{r2}	136.91	mm ²
2p	2	Cực	av	28	cm	B_{z0}	0.53	T	B_{z0}	0.134	T
Z_1	36	rãnh	bv	23	cm	B_{g0}		T	B_{g0}		T
Z_2	28	rãnh	Dv	12	cm						

Kết quả thiết kế thông số mạch từ lá thép stato và rôto động cơ $P_{dm} = 15 \text{ kW}$; $n_{dm} = 3.000 \text{ (vòng/phút)}$, $U_{dm} = 380/660 \text{ (V)}$ đưa ra trên hình 2.3 và hình 2.4.



Hình 2.3. Thông số kích thước stato



Hình 2.4. Thông số kích thước rôto

Để có phương án thiết kế tối ưu nam châm vĩnh cửu trên mạch rôto đưa ra các phương án bố trí khác nhau sau đó phân tích lựa chọn tối ưu phương án thiết kế.

Việc tính toán sơ bộ kích thước của nam châm vĩnh cửu trong động cơ Ex-LSPMSM thường được tính toán theo các bước sau [5]:

- Tính toán lựa chọn sơ bộ chiều rộng cực đại của nam châm W_m :

$$W_{\max} = \sqrt{2}R_{1\max} \quad (2.17)$$

Trong đó $R_{1\max}$ - là khoảng cách từ tâm đến đáy của rãnh rôto

- Tính toán thể tích tối thiểu nam châm được sử dụng

$$V_m = \frac{2 \cdot k_{ocf} \cdot k_{fd} \cdot (1 + k_{EC}) \cdot P_{dm}}{\pi^2 \cdot \xi \cdot 2 \cdot p \cdot f \cdot B_r \cdot H_c} \quad (2.18)$$

Trong đó: k_{fd} - Hệ số hình dáng từ hóa; k_{EC} - Hệ số sức điện động (0,6 ÷ 0,95); k_{ocf} - Hệ số quá tải; P_{dm} - Công suất định mức; $P_{\max}$ - Công suất lớn nhất; ξ -Hệ số sử dụng nam châm (0,3 ÷ 0,7). B_r - Mật độ từ dư; H_c - Cường độ từ trường cực đại.

Từ thể tích nam châm V_m và chiều rộng cực đại $b_{\max}$ như trên tính được độ dày tối thiểu của nam châm $h_{\min}$:

$$h_{\min} = \frac{V_m}{H_m \cdot b_{\max}} \quad (2.19)$$

Như vậy thấy rằng tính toán độ dày của nam châm phụ thuộc rất nhiều vào các hệ số kinh nghiệm, độ dày của nam châm sẽ được tính toán thay đổi trong phạm vi rộng. Chính điều này ảnh hưởng nhiều tới đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM.

Sơ bộ tính toán đối với động cơ Ex-LSPMSM 15 kW tính toán được chiều dày nam châm $h_{\min} = 7,3 \text{ mm}$, $b_{\max} = 34 \text{ mm}$. Khảo sát đặc tính làm việc của động cơ Ex-LSPMSM $n = 3.000 \text{ vòng/phút}$, $P_{\text{đm}} = 15 \text{ kW}$, $U_{\text{đm}} = 380/660 \text{ V}$, sử dụng loại nam châm vĩnh cửu $N=38$ với độ dày nam châm lựa chọn sơ bộ là: $h = 7 \text{ mm}$. Nhằm nghiên cứu các đặc tính của Ex-LSPMSM, tác giả sử dụng phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô phỏng LSPMSM. Các kết quả mô phỏng nhằm mục đích nghiên cứu và đánh giá thiết kế của động cơ.

2.3. Phân tích lựa chọn kết cấu rôto bằng phương pháp phần tử hữu hạn

2.3.1. Lựa chọn loại hình dạng thanh nam châm

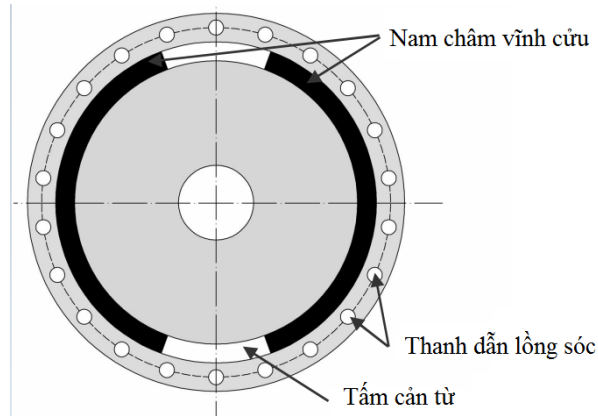
Động cơ Ex-LSPMSM điển hình có cấu tạo stato giống động cơ Ex-IM. Ex-LSPMSM 15 kW nghiên cứu có thông số như Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Các thông số cơ bản của Ex-LSPMSM 15 kW

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Đường kính ngoài stato	D_n	245	mm	
Đường kính trong stato	D'	152	mm	
Đường kính ngoài rôto	D	152	mm	
Đường kính trục rôto	D_t	52	mm	
Vật liệu thép stato	Steel 1008			
Số rãnh Stato	Z_1	36	Rãnh	
Số rãnh rôto	Z_2	28	Rãnh	
Chiều dài khe hở không khí	g	0,5	mm	
Điện áp nguồn cấp	$U_{\text{đm}}$	380/660	V	
Tần số nguồn cấp	f	50	Hz	

Trong thiết kế động cơ Ex-LSPMSM, việc lựa chọn cấu trúc rôto với nam châm vĩnh cửu sắp xếp theo dạng hình vành khuyên, dạng hình chữ U có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất, mômen xoắn, ổn định từ trường và chi phí chế tạo của động cơ. Mỗi cấu trúc này có ưu nhược điểm riêng, và tùy thuộc vào yêu cầu kỹ thuật, chi phí, và ứng dụng, một trong hai cấu trúc sẽ được lựa chọn là tối ưu.

Đối với Ex-LSPMSM có tốc độ 3.000 vòng/phút, tần số nguồn cấp 50 Hz, thông thường cấu hình rôto điện hình gồm hai NCVC hình khuyên, như hình 2.5 bên dưới [10],[46].



Hình 2.5. Cấu hình điện hình Ex-LSPMSM NCVC 3.000 vòng/phút [10],[46]

Tuy nhiên, với cấu hình NCVC như trên đối với Ex-LSPMSM, 3.000 vòng/phút công suất trung bình (loại chiều cao tâm trục 160 mm) sẽ có một số nhược điểm rất lớn trong quá trình chế tạo:

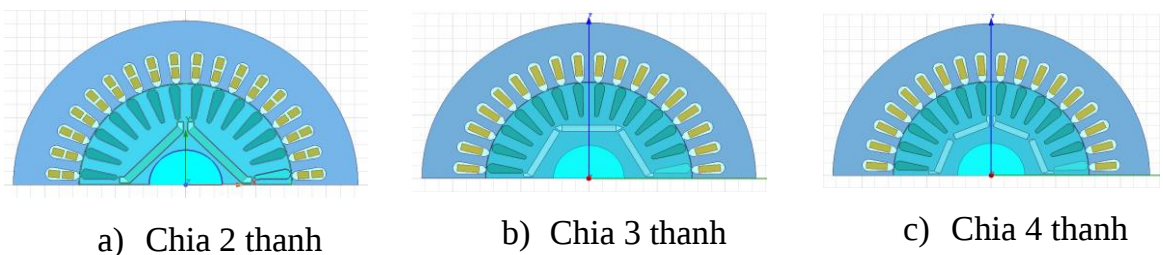
- Gia công NCVC hình khuyên sẽ khó khăn hơn nếu so với NCVC hình dáng thẳng.
- Tốn vật liệu chế tạo NCVC hơn.
- Nạp từ NCVC sẽ khó hơn.

Chính vì các lý do trên nên trên thực tế ít chế tạo NCVC dạng vành khuyên. Trên cơ sở đó, luận án nghiên cứu đề xuất một số cấu hình NCVC dạng thẳng để thay thế dạng NCVC hình vành khuyên cho Ex-LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút. Về cơ bản, nguyên lý ở đây là chia nhỏ khối nam châm vĩnh cửu hình khuyên ra thành các dạng nam châm vĩnh cửu thẳng. Như vậy sẽ khắc phục nhược điểm của khối nam châm hình khuyên trong quá trình chế tạo, kết cấu đề xuất gồm các kết cấu 2,3 và 4 thanh như Hình 2.6. Lý do chỉ xét NCVC được ghép từ 2,3 và 4 thanh phẳng mà không chia nhỏ hơn nữa là:

- Nếu chia nhỏ hơn thì số lượng thanh NCVC dùng để ghép nối là rất nhiều, phức tạp hơn trong quá trình lắp đặt.

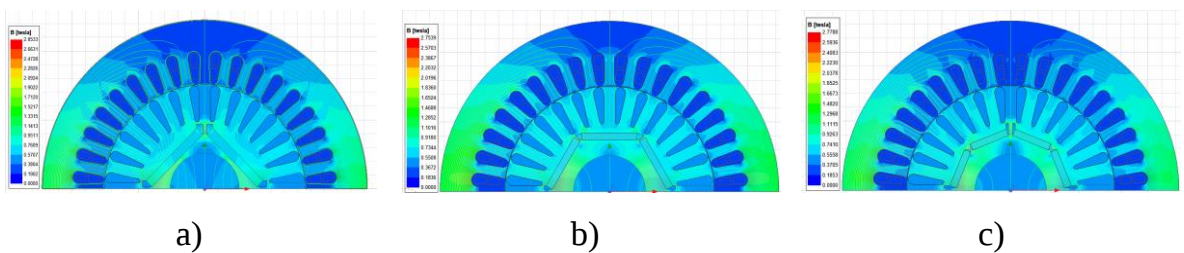
- Bên cạnh đó nếu chia nhỏ hơn cũng dẫn đến gia công tạo rãnh đặt NCVC trên lõi thép rôto trở nên phức tạp hơn.

Cấu hình NCVC khác nhau tất yếu dẫn đến ảnh hưởng khác nhau đến các đặc tính quá độ cũng như thông số vận hành ở chế độ xác lập của Ex-LSPMSM. Vì vậy, trong nội dung nghiên cứu sẽ phân tích và đánh giá ảnh hưởng của các cấu hình khác nhau đến đặc tính khởi động và đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM ở chế độ vận hành xác lập. Từ các kết quả nghiên cứu rút ra một số kết luận nhằm hướng đến chế tạo động cơ trong thực tế.



Hình 2.6. Cấu hình Ex-LSPMSM – 2 cực.

Sử dụng phần mềm Ansys/Maxwell 2D để mô phỏng Ex-LSPMSM với các cấu hình NCVC khác nhau. Phân bố từ trường, mật độ từ trường tại khe hở không khí và dạng sóng sức điện động không tải khi mô phỏng Ex-LSPMSM 15 kW. Phân bố trường điện từ và mật độ trường từ khi mô phỏng Ex-LSPMSM được thể hiện trong hình 2.7.

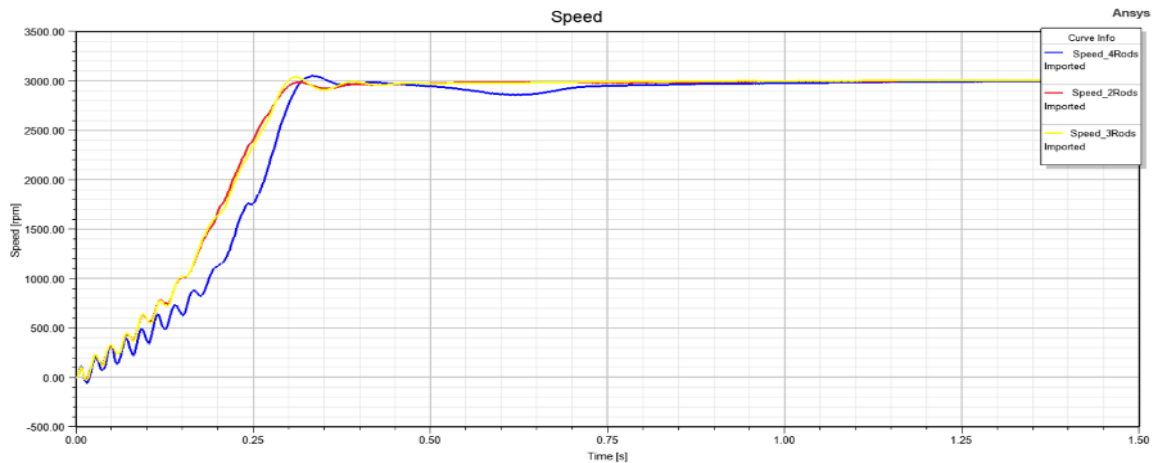


Hình 2.7. Phân bố trường điện từ.

a) Chia 2 thanh; b) Chia 3 thanh; c) Chia 4 thanh.

Với kích thước nam châm đã chọn, trường từ phân bố trong mạch từ của động cơ là khoảng 1,6 T, do đó cả ba cấu trúc trên đều không gây bão hòa mạch từ và có điểm làm việc tối ưu của mạch từ.

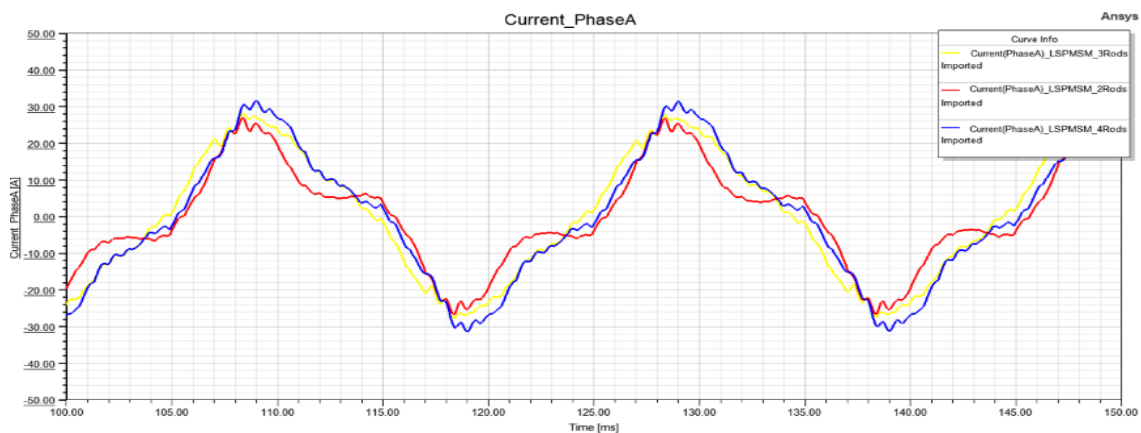
Khi mô phỏng với các cấu hình nam châm vĩnh cửu khác nhau, đường cong tốc độ khởi động được thể hiện trong hình 2.8 bên dưới



Hình 2.8. Đường cong tốc độ khởi động với cấu hình 2 thanh, 3 thanh và 4 thanh.

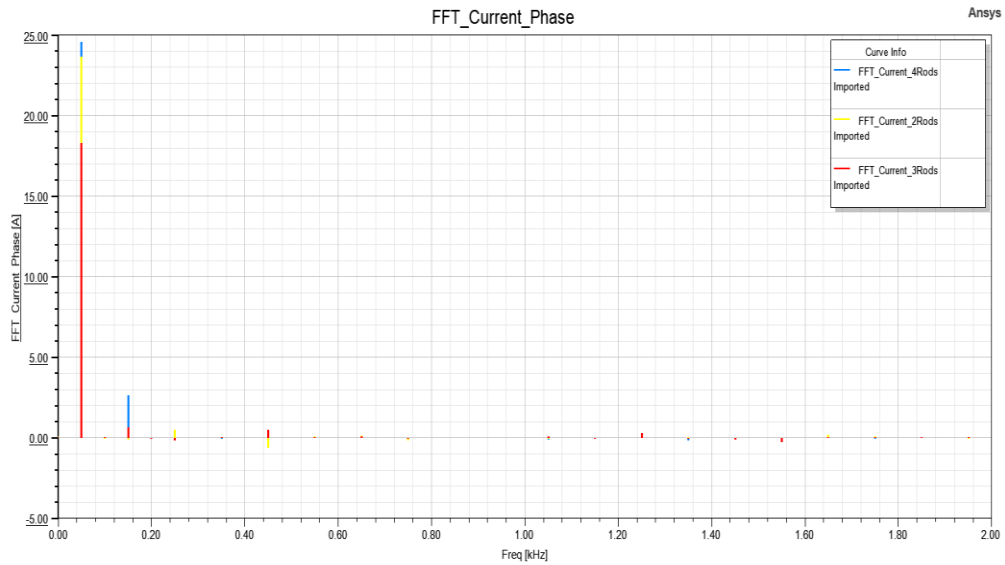
Kết quả mô phỏng trên Hình 2.8 cho thấy cả ba cấu hình rôto sử dụng 2, 3 và 4 thanh nam châm vĩnh cửu đều bảo đảm khả năng khởi động với tải định mức. Tuy nhiên, quá trình tăng tốc của các cấu hình có sự khác biệt rõ rệt. Trong đó, cấu hình rôto 3 thanh cho đặc tính khởi động tốt nhất, thể hiện qua tốc độ tăng nhanh và khả năng đạt tới vùng tốc độ đồng bộ sớm hơn các phương án còn lại; với cấu hình này, động cơ đạt tốc độ cực đại sau khoảng 0,3 s. Ngược lại, cấu hình 4 thanh cho đặc tính khởi động kém nhất, quá trình tăng tốc chậm hơn và dao động tốc độ trong giai đoạn quá độ lớn hơn. Cấu hình 2 thanh vẫn bảo đảm khả năng khởi động, song chất lượng đặc tính tăng tốc không tốt bằng cấu hình 3 thanh.

Đặc tính dòng điện làm việc với các cấu hình khác nhau của nam châm vĩnh cửu được mô tả trong hình 2.9 bên dưới.



Hình 2.9. Đường cong dòng điện chế độ ổn định.

Có thể thấy từ Hình 2.9 rằng các dạng sóng đặc trưng dòng điện của Ex-LSPMSM với các cấu hình khác nhau ở trạng thái ổn định đều không phải là hình sin. Dạng sóng dòng điện của cấu hình nam châm vĩnh cửu 3 thanh sẽ ở dạng gần nhất với hình sin, dạng sóng dòng điện bị méo nhiều nhất đối với cấu hình nam châm vĩnh cửu 4 thanh. Để nghiên cứu chi tiết hơn, trong phần tiếp theo, luận án sẽ tiến hành phân tích sóng hài của dòng điện tương ứng với từng cấu hình được hiển thị trong Hình 2.10.



Hình 2.10. Phân tích FFT của dạng sóng dòng điện với các cấu hình khác nhau của nam châm vĩnh cửu.

Tính toán tổng độ méo hài dòng điện tải (THDi) mà mỗi cấu hình tạo ra. Giá trị THDi được xác định thông qua công thức (2.20):

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \quad (2.20)$$

Trong đó: I_1 là giá trị hiệu dụng của dòng điện ở bậc cơ bản (tần số 50 Hz);

I_i là giá trị hiệu dụng của sóng hài dòng điện bậc i ;

n là sóng hài bậc cao nhất cần đánh giá.

Bảng 2.4. Kết quả tính toán THDi.

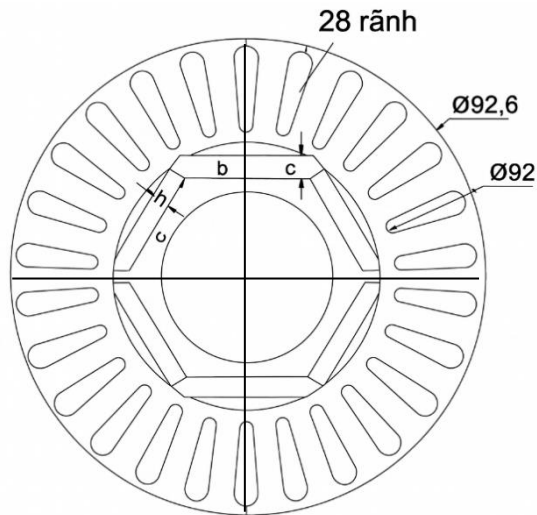
Tham số	[17]	Cấu hình 2 thanh	Cấu hình 3 thanh	Cấu hình 4 thanh
THDi	$\leq 20\%$	26,6%	18,8%	24,5%

Kết quả trong Bảng 2.4 cho thấy cấu hình 3 thanh có giá trị THDi thấp nhất là 18,8% và cấu hình 2 thanh có giá trị THDi cao nhất. Cấu hình 2 thanh và 4 thanh đều

vượt quá yêu cầu sóng hài quy định [17]. Kết luận lựa chọn cấu hình 3 thanh nam châm vĩnh cửu.

2.3.2. Lựa chọn kết cấu rãnh bố trí nam châm vĩnh cửu

Ex-LSPMSM điển hình dựa trên nguyên mẫu động cơ Ex-IM 15 kW–3.000 vòng/phút được sử dụng cho quạt thông gió mở. Cấu trúc răng, khe hở, mạch từ, cuộn dây, stato và lồng sóc rôto vẫn giữ nguyên. Các thông số của Ex-LSPMSM được đưa ra trong Bảng 2.3 [5]

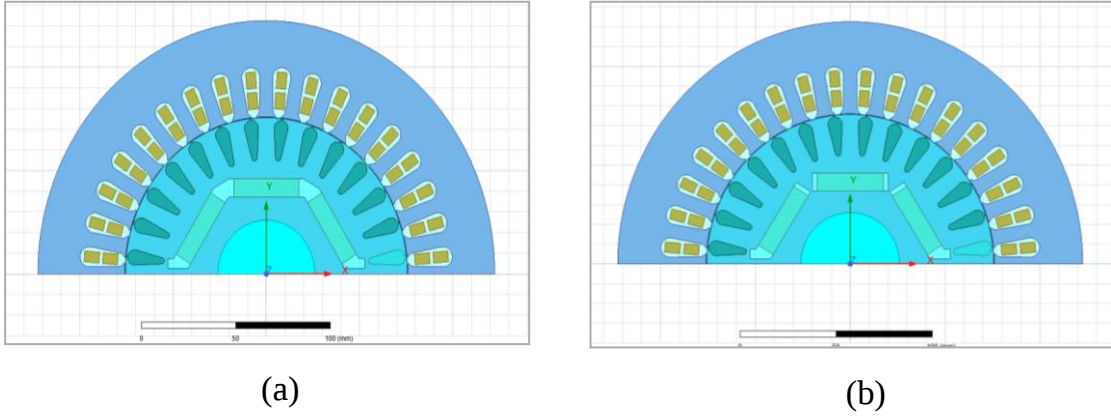


Hình 2.11. Cấu hình rôto của Ex-LSPMSM được đề xuất

Cấu trúc nam châm vĩnh cửu được sử dụng để chế tạo Ex-LSPMSM nghiên cứu là cấu trúc nam châm 3 thanh, sử dụng nam châm NdFeB-N38. Nam châm vĩnh cửu NdFeB-N38 là một loại nam châm vĩnh cửu được làm từ hợp kim neodymium, sắt và boron. Chúng được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau. Nam châm NdFeB tiếp tục là nam châm vĩnh cửu mạnh nhất được bán trên thị trường do khả năng lưu trữ năng lượng cao so với nam châm vĩnh cửu Fe, AlNiCo hoặc SmCo.

Kết cấu rãnh bố trí 3 thanh NCV trong rôto có thể được thiết kế liền mạch (hình 2.12a) hoặc có thể được tách nhau bằng các flux barrier (cầu từ) (hình 2.12b). Việc sử dụng cầu từ (hình 2.12b) tạo điều kiện thuận lợi cho việc lắp đặt nam châm, giúp thanh nam châm được cố định tốt hơn và kết cấu của rôto chắc chắn hơn. Tuy nhiên, việc sử dụng cầu từ dẫn đến việc xuất hiện nhiều từ trường rò trong mạch từ của rôto, có thể làm giảm đặc tính làm việc và hiệu suất của động cơ, ngoài ra, chi

phí gia công để tạo rãnh nam châm cũng tăng lên. Không sử dụng cầu từ (Hình 2.12a) có ưu điểm là giảm chi phí sản xuất để tạo rãnh nam châm và giảm từ trường rò trong mạch rôto, có thể cải thiện đặc tính làm việc. Như vậy, việc bố trí hay không bố trí cầu từ để tách các thanh nam châm cũng là một vấn đề cần giải quyết để cải thiện đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM - 3.000 vòng/phút.

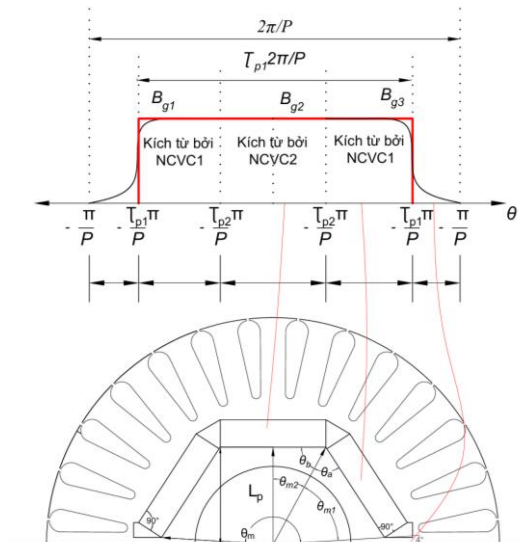


Hình 2.12. Cấu trúc của rôto:

a – Không có cầu từ; b – Sử dụng cầu từ.

2.3.2.1. Mô hình giải tích xác định từ thông khe hở không khí

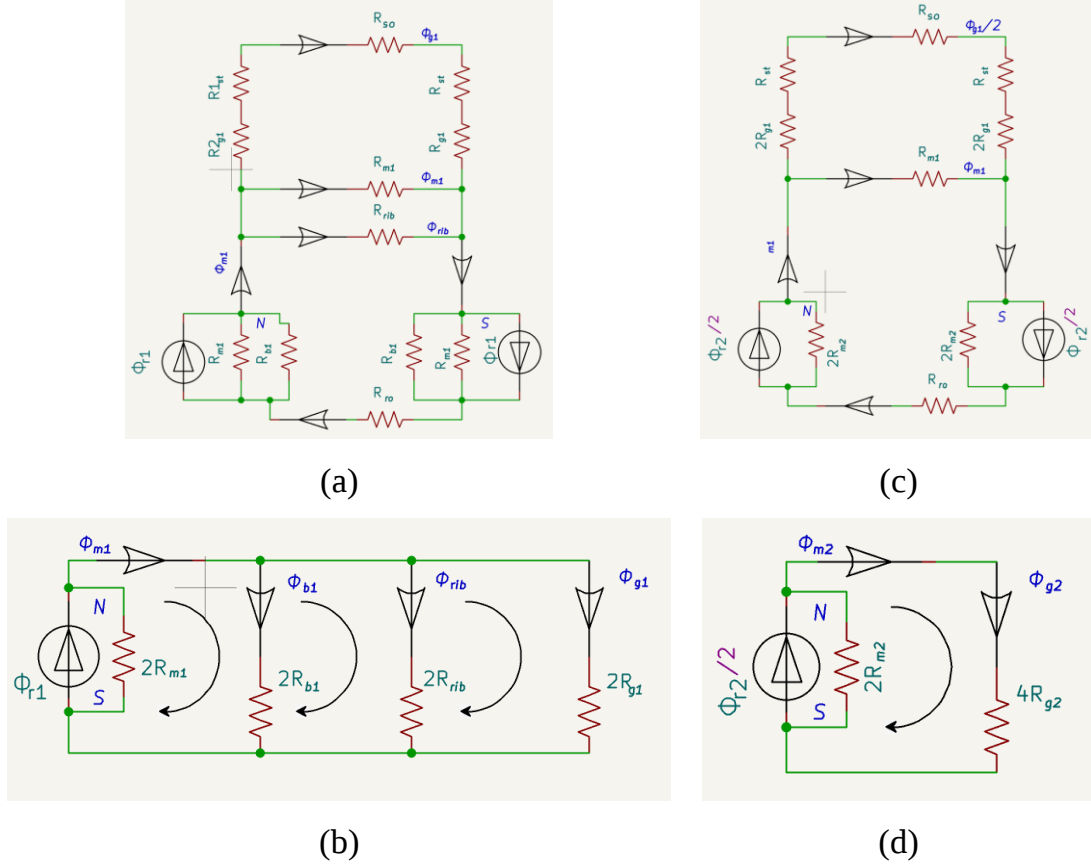
Với mô hình không cầu từ, mô hình giải tích điện từ thay thế của Ex-LSPMSM tốc độ 3.000 vòng/phút với kết cấu 3 thanh được đưa ra trên hình 2.13 [27]:



Hình 2.13. Mô hình tương đương của phân bố mật độ từ thông khe hở không khí

Đối với Ex-LSPMSM có $2p = 2$ và cấu trúc rôto ba thanh thì từ trường trong mạch từ chia thành hai phần. Mỗi phần được tạo ra bởi một thanh nam châm phía

ngoài và một nửa thanh nam châm ở giữa. Mô hình giải tích thay thế thanh nam châm phía ngoài và một nửa thanh nam châm ở giữa được đưa ra trên hình 2.14.



Hình 2.14. Các mô hình mạch từ theo phương pháp xếp chồng:
(a), (b) Mô hình dựa trên NCVC1; (c), (d) Mô hình dựa trên NCVC2.

Dựa trên Hình 2.14, các biểu thức toán học sau đây có thể được xây dựng:

$$\Phi_{r1} = B_r A_{p1} = B_r L_{stk} w_{p1} \quad (2.21)$$

$$\Phi_{r2} = B_r A_{p2} = B_r L_{stk} w_{p2} \quad (2.22)$$

Các tham số từ trở khác nhau và diện tích khe hở không khí có thể được biểu diễn như sau:

$$R_{g1} = \frac{g_o}{\mu_o A_{g1}} \quad (2.23)$$

$$R_{g2} = \frac{g_o}{\mu_o A_{g2}} \quad (2.24)$$

$$R_{m1} = \frac{T_{m1}}{\mu_o \mu_r L_{stk} w_{p1}} \quad (2.25)$$

$$R_{m2} = \frac{T_{m2}}{\mu_o \mu_r L_{stk} w_{p2}} \quad (2.26)$$

$$R_{bl} = \frac{2T_{bl}}{\mu_o L_{stk}(w_1 + w_2)} \quad (2.27)$$

$$R_{rib} = \frac{2T_{rib}}{\mu_o L_{stk}(h_1 + h_2)} \quad (2.28)$$

$$A_g = \tau p \frac{\pi(R_{sin} - g_o/2)}{p} L_{stk} \quad (2.29)$$

Trong đó:

μ_r là độ từ thẩm tương đối của nam châm vĩnh cửu

μ_o là độ từ thẩm của không khí

B_r là từ dư của nam châm

L_{stk} là chiều dài mạch từ

g_o là chiều dài khe hở không khí

w_1 và w_2 là chiều rộng của các cầu từ

T_{rib} là độ dày của cầu nối

h_1 và h_2 là chiều dài theo trục của cầu nối

R_{sin} là bán kính trong của lõi stato

w_{p1} và w_{p2} là chiều rộng của các nam châm

T_m là độ dày của nam châm vĩnh cửu.

Độ dày của mỗi khối nam châm vĩnh cửu được sử dụng trong mô hình Ex-LSPMSM gốc là 8 mm.

Diện tích khe hở không khí (A_g) phụ thuộc vào tỷ số giữa cung cực và bước cực (τ_p); giá trị này được tính toán theo công thức sau [27].

$$\tau_p = \frac{\text{pole-arc}}{\text{pole pitch}} = \frac{\theta_m}{\theta_p} \quad (2.30)$$

Dựa trên hình dạng rôto của động cơ Ex-LSPMSM, góc cung cực từ (θ_m) được xác định dựa trên các đoạn nam châm vĩnh cửu trong mỗi cực, diện tích khe hở không khí hiệu dụng được biểu diễn theo công thức sau [27]:

$$\frac{\theta_m}{2} = (\theta_{m1} + \theta_{m2}) \quad (2.31)$$

$$\alpha_m = \theta_a + \theta_b; \hat{\theta}_m = \theta_c + \theta_d \quad (2.32)$$

$$A_g = A_{g1} + A_{g2} \quad (2.33)$$

Ở đây, θ_{m1} và θ_{m2} lần lượt là góc cung cực của các nam châm NCVC1 và NCVC2 trên hình 2.13. Do đó, các diện tích khe hở không khí tương ứng A_{g1} và A_{g2} được biểu diễn như sau [27]:

$$A_{g1} = \left(\frac{\theta_{m1}}{\theta_p}\right) \frac{2\pi(R_{in}-g_o/2)}{p} L_{stk} \quad (2.34)$$

$$A_{g2} = \left(\frac{\theta_{m2}}{\theta_p}\right) \frac{2\pi(R_{in}-g_o/2)}{p} L_{stk} \quad (2.35)$$

Do đó, các giá trị của θ_{m1} và θ_{m2} được biểu diễn như sau:

$$\theta_{m1} = \sin^{-1} \left[R_{ro} - \frac{(L_r + w_{p1} + w_{rb} + w_{bri1} + w_{bri2}) \sin \theta_c}{R_{ro}} - (L_r + \sqrt{(L_p)^2 + \left(\frac{w_{p2}}{2}\right)^2} + w_{rb} + w_{bri1} + w_{bri2}) \right] \quad (2.36)$$

$$\theta_{m2} = \tan^{-1} \left[\frac{R_{ro} - \left(L_r + \frac{w_{p2}}{2} + w_{rb} + w_{bri1} + w_{bri2}\right)}{R_{ro} - (L_r + L_p + w_{rb} + w_{bri1} + w_{bri2})} \right] \quad (2.37)$$

Ở đây:

L_r là khoảng cách từ tâm trục đến thanh dẫn rôto

w_{bri1} và w_{bri2} là chiều rộng của các cầu nối nằm giữa các thanh dẫn lồng sóc và bán kính ngoài của rôto, tại vị trí P_2

R_{ro} là bán kính ngoài của lõi rôto và w_{rb} là chiều dài của thanh dẫn rôto

Biểu thức xác định L_P (vị trí của nam châm trong lõi rôto) được tính như sau:

$$L_P = [R_{ro} - (L_r + w_{rb} + w_{bri1} + w_{bri2})] - [R_{ro} - (L_r + w_{p2} + w_{rb} + w_{bri1} + w_{bri2})] \tan(\alpha_m + \theta_a) \quad (2.38)$$

Mức bão hòa từ cao tại các cầu nối khiến cho vùng này trở thành vùng gần như không dẫn từ trong lõi rôto. Do đó, từ thông rò trong các cầu nối có thể được ước lượng theo công thức sau [27]:

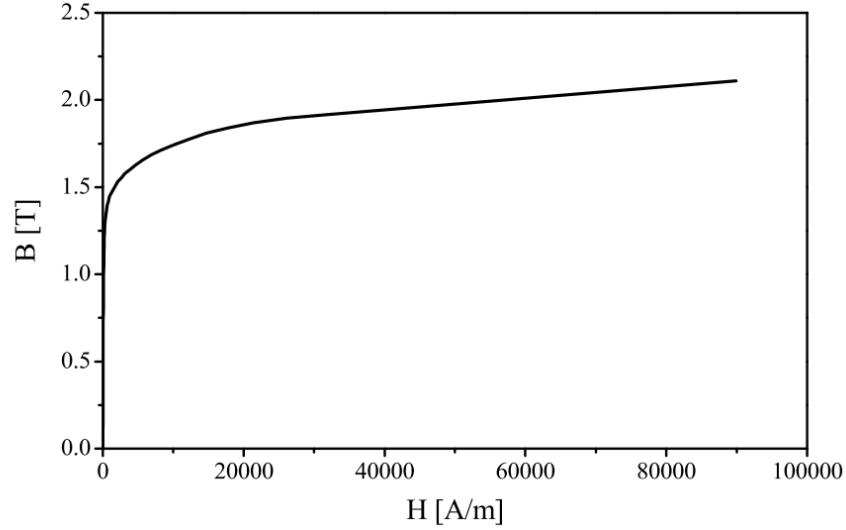
$$\Phi_{bri} \approx B_{sat} A_{bri} \quad (2.39)$$

Trong đó:

$A_{bri} = b \times L_{stk}$ biểu thị diện tích của cầu nối.

b là chiều rộng của cầu nối.

B_{sat} là mật độ từ bão hòa được lấy từ đường cong B–H của vật liệu thép dùng cho lá tôn, như thể hiện trong Hình 2.15; ở đây, $B_{\text{sat}} = 1,8 \text{ T}$.



Hình 2.15. Đường cong B–H của thép Steel 1008 dùng cho lá tôn.

Trong điều kiện không tải, các cầu từ trong rôto NCVC gắn chìm của động cơ Ex-LSPMSM bị bão hòa mạnh do nhiều trạng thái tải khác nhau [27] và các kết quả đầu ra của mô hình LPM được sử dụng vẫn có thể chấp nhận được, như sẽ giải thích sau. Bằng cách áp dụng định luật Kirchhoff cho mạch tương đương đơn giản hóa của NCVC1 trong Hình 2.14(b), ta thu được các phương trình như sau:

$$R_m = \frac{2R_{m1}}{1+\alpha+\beta} \quad (2.40)$$

Trong đó:

$$\alpha = \frac{R_{m1}}{R_{bl}} \quad (2.41)$$

$$\beta = \frac{R_{m1}}{R_{rib}} \quad (2.42)$$

$$\gamma = \frac{R_{gl}}{R_{m1}} \quad (2.43)$$

Các mạch tương đương đơn giản hóa của NCVC1 và NCVC 2 được sử dụng để suy ra các biểu thức từ thông khe hở không khí, như được thể hiện trong Hình 2.14(b) và Hình 2.14(d), như sau:

$$\Phi_{g1} = \frac{\Phi_{r1}}{1+\gamma(1+\alpha+\beta)} \quad (2.44)$$

$$\phi_{g2} = \frac{R_{m2}\phi_{r2}}{(R_{m2}+R_{g2})} \quad (2.45)$$

Do đó, mật độ từ thông khe hở không khí được tạo ra bởi NCVC1 và NCVC2 được xác định bằng cách thế các biểu thức (2.34) và (2.35), cùng với (2.44) và (2.45), lần lượt vào (2.21) và (2.22):

$$B_{g1} = \frac{\phi_{g1}}{A_{g1}} = \frac{B_{r1}A_{m1}}{A_{g1}[1+\gamma(1+\alpha+\beta)]} \quad (2.46)$$

$$B_{g2} = \frac{\phi_{g2}}{A_{g2}} = \frac{B_{r2}A_{m2}R_{m2}}{A_{g2}(R_{m2}+R_{g2})} \quad (2.47)$$

Từ thông rò giữa NCVC1 và NCVC2 là rất nhỏ và có thể bỏ qua. Từ thông rò của NCVC2 được biểu diễn là Φ_{m2} . Các từ thông rò đi qua cầu nối, cầu từ và phần gân chỉ phát sinh từ NCVC1 và được tính toán theo công thức sau [27]:

$$\phi_{m1} = \frac{\gamma\phi_{r1}}{1+\gamma(1+\alpha+\beta)} \quad (2.48)$$

$$\phi_{m2} = \frac{R_{g2}\phi_{r2}}{R_{g2}+R_{m2}} \quad (2.49)$$

$$\phi_{bl} = \frac{(R_{g1}/R_{bl})\phi_{r1}}{1+\gamma(1+\alpha+\beta)} \quad (2.50)$$

$$\phi_{bl} = \frac{(R_{g1}/R_{rib})\phi_{r1}}{1+\gamma(1+\alpha+\beta)} \quad (2.51)$$

Mô hình tương đương phân bố từ thông trong Hình 2.13 cho thấy phân bố mật độ từ thông khe hở không khí theo bán kính rôto được xác định bằng mô hình giải tích có độ tương đồng đáng kể với kết quả thu được từ mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Do đó, có thể giả định rằng hai kết quả này là tương đương nhau.

$$B_{g1} \approx B_{g2} = B_g \quad (2.52)$$

Do đó, biểu thức cuối cùng theo $(L_p - \theta_m)$ cho mật độ từ thông khe hở không khí theo mô hình phân tích có thể được viết như sau:

$$B_g(L_{gp}, \alpha_m) = \frac{B_{r1}A_{m1}}{A_{g1}[1+\gamma(1+\alpha+\beta)]} \approx \frac{B_{r2}A_{m2}R_{m2}}{A_{g2}(R_{g2}+R_{m2})} \quad (2.53)$$

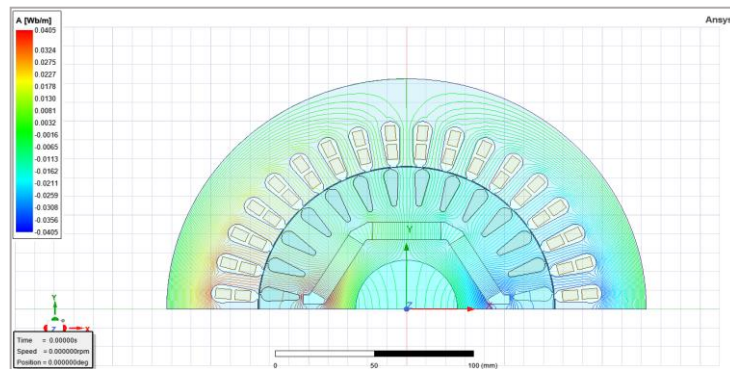
$$\text{Với } \gamma = 0,31; \alpha = 0,55; \beta = 1,58; B_{r1} = 1,23T; \frac{Am}{Ag} = 1 \rightarrow B_g = 0,624(T)$$

Từ công thức (2.53) nhận thấy rằng, mật độ từ thông ở khe hở không khí phụ thuộc lớn vào thông số mạch từ thay thế của rôto, trong đó các thông số góc nghiêng và cầu từ ở rôto là các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến mật độ từ thông ở khe hở không khí. Với kết cấu ba thanh được bố trí chia nhỏ từ vành khuyên nên coi góc nghiêng của nam châm gần tương đồng nên mật độ từ thông phụ thuộc nhiều vào cầu từ bố trí nam châm.

2.3.2.2. Mô hình FEM xác định từ thông khe hở không khí

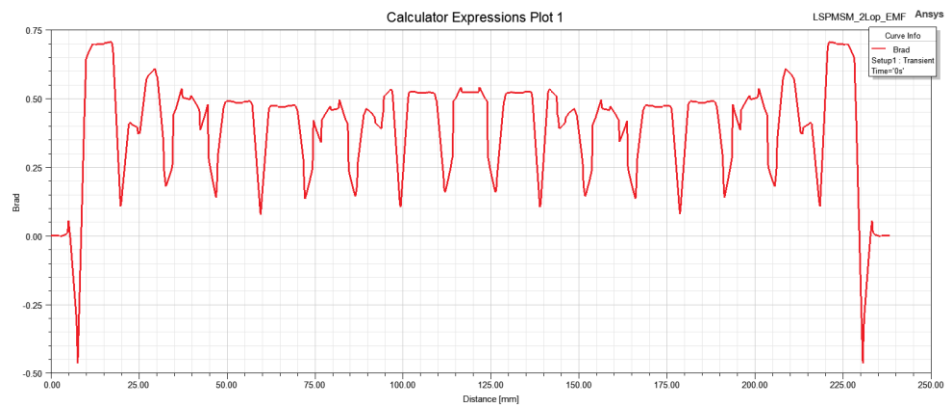
Phương pháp phần tử hữu hạn được ứng dụng trong phần mềm Ansys/Maxwell để phân tích từ thông khe hở không khí. Từ đó so sánh kết quả với mô hình giải tích để xem xét sự tương đồng giữa hai mô hình. Giải pháp cho phương trình Poisson đối với trường điện từ của mô hình động cơ điện là sự phân bố của trường từ trong mạch từ và khu vực xung quanh của cấu trúc điện từ. Nền tảng của mô hình này là định luật Maxwell-Ampere. Phương trình Maxwell-Faraday, được biểu thị như sau đối với trường hợp động cơ điện trạng thái ổn định.

Thiết lập mô hình Ex-LSPMSM với trường hợp không có cầu từ để khảo sát từ thông khe hở không khí (hình 2.16)

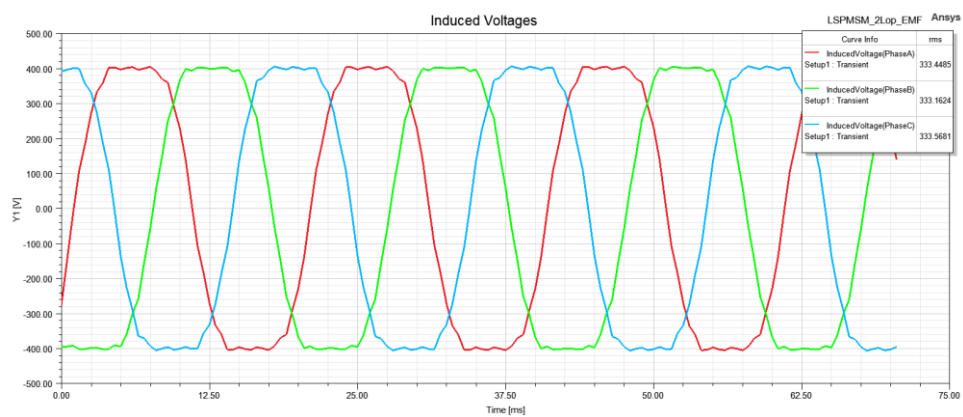


Hình 2.16. Phân bố từ trường trong động cơ không có cầu từ

Kết quả phân tích từ thông khe hở không khí và dạng sóng sức điện động không tải B-EMF được thể hiện trong Hình 2.17.



a)



b)

Hình 2.17. Từ thông khe hở không khí (a) và sức điện động không tải B-EMF (b)

So sánh kết quả từ trường khe hở không khí và sức điện động không tải khi sử dụng mô hình FEM với mô hình giải tích được kết quả trong bảng 2.5.

Bảng 2.5. So sánh mật độ từ thông khe hở không khí và sức điện động không tải giữa giá trị tham chiếu thiết kế và kết quả mô phỏng FEM

Thông số	Giá trị tham chiếu thiết kế / tính toán giải tích	Kết quả mô phỏng FEM	Sai số $\Delta E\%$
Mật độ từ thông khe hở không khí $B_g(T)$	0,624	0,59	4,8
Sức điện động không tải $E_{1NB} (V)$	380	395	3,8

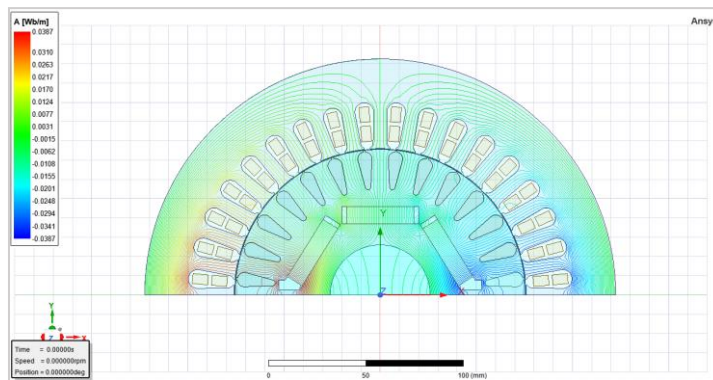
Ghi chú: E_{1NB} là giá trị hiệu dụng của thành phần cơ bản bậc 1 của sức điện động không tải. Giá trị 380 V là giá trị tham chiếu thiết kế/định mức dùng để đối chiếu với kết quả mô phỏng FEM.

Kết quả trong Bảng 2.5 cho thấy mật độ từ thông khe hở không khí và sức điện động không tải xác định bằng mô phỏng FEM có kết quả tương đồng với mô hình giải tích. Cụ thể, đối với mật độ từ thông khe hở không khí, giá trị tính toán theo giải tích là 0,624 T và giá trị FEM là 0,59 T, sai số đạt 4,8%. Đối với sức điện động không tải, giá trị tham chiếu E_{1NB} là 380 V, trong khi kết quả FEM là 395 V, sai số đạt 3,8%. Cần lưu ý rằng ở đây E_{1NB} được hiểu là giá trị hiệu dụng của thành phần cơ bản bậc 1 của sức điện động không tải, còn giá trị 380 V đóng vai trò là giá trị điện áp đầu vào thiết kế/định mức để so sánh với kết quả mô phỏng.

Như vậy, đối với cấu hình cơ sở được xét trong Chương 2, sai số giữa mô hình giải tích và mô phỏng FEM đều nhỏ hơn 5%, cho thấy mô hình phần tử hữu hạn xây dựng trong Ansys/Maxwell có độ tin cậy tốt, phù hợp với mô hình giải tích. Vì vậy, trong luận án sẽ sử dụng mô hình FEM để nghiên cứu Ex-LSPMSM thay thế cho mô hình giải tích.

2.3.2.3. Lựa chọn kết cấu rãnh bố trí nam châm vĩnh cửu

Thiết lập mô hình FEM cho trường hợp sử dụng kết cấu cầu từ được đưa ra trên hình 2.18.



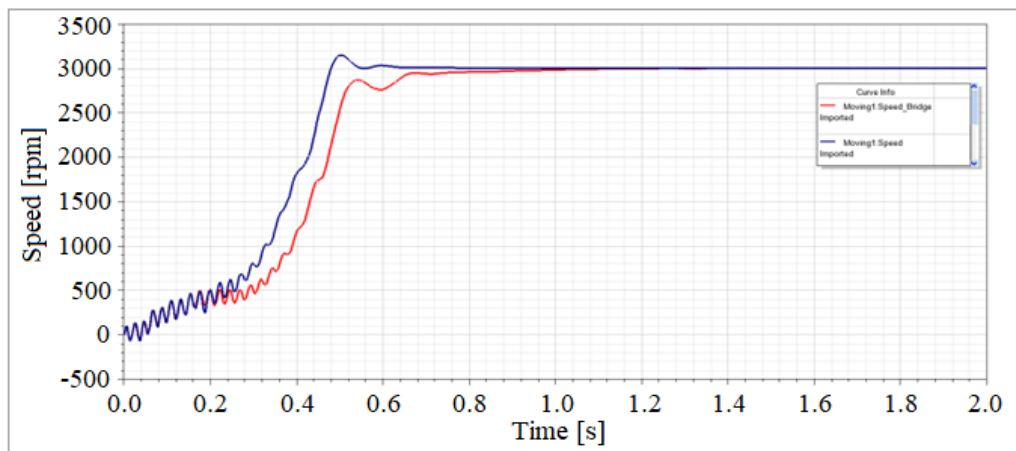
Hình 2.18. Phân bố từ trường trong động cơ có cầu từ.

Việc lựa chọn kết cấu rãnh bố trí nam châm được dựa trên chất lượng thông số làm việc cơ bản của động cơ. Khảo sát sự phân bố đường đi của từ trường (Hình 2.18) bằng phần mềm Ansys/Maxwell đã chỉ ra rằng trong trường hợp có cầu từ,

hiệu từ trường rò xuất hiện trong mạch từ của rôto hơn so với trường hợp không có cầu từ. Điều này làm giảm lượng từ trường do nam châm vĩnh cửu NdFeB-N38 tạo ra và không khép kín vòng lặp với cuộn dây stato, dẫn đến giảm hiệu suất và đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM. Khảo sát các đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM trong hai trường hợp có và không có cầu từ cho các kết quả như sau:

* Đặc tính khởi động của động cơ.

Đặc tính khởi động của động cơ được thể hiện trong Hình 2.19.

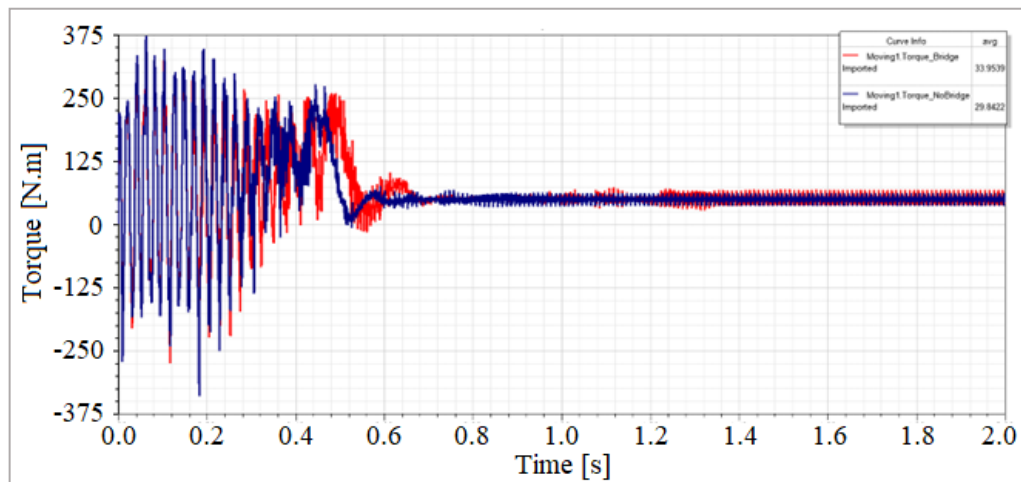


Hình 2.19. Đặc tính khởi động của động cơ

Từ hình 2.19, đối với hai cấu trúc nghiên cứu, cả hai cấu hình Ex-LSPMSM đều có thể đạt tốc độ định mức. Tuy nhiên, đặc tính tốc độ khởi động của Ex-LSPMSM với cấu hình rôto không có cầu từ là tốt hơn. Trong trường hợp cấu trúc rôto không có cầu từ, động cơ đạt tốc độ tối đa sau 0,45 giây; bên cạnh đó, sau khoảng 0,75 giây, động cơ đạt tốc độ đồng bộ là 3.000 vòng/phút. Trong trường hợp cấu trúc rôto có cầu từ, việc khởi động động cơ khó khăn hơn và thời gian để động cơ đạt tốc độ đồng bộ là 1,14 giây.

* Đặc tính mômen xoắn của động cơ.

Đặc tính mômen xoắn của động cơ được đưa ra trong Hình 2.20.



Hình 2.20. Đặc tính mômen xoắn của động cơ

Kết quả hình 2.20 cho thấy, trong trường hợp kết cấu rôto không có cầu từ, động cơ có mômen khởi động lớn hơn so với trường hợp kết cấu rôto có cầu từ. Như vậy, trong trường hợp kết cấu rôto không có cầu từ, động cơ có mômen khởi động tốt hơn.

Kết quả mô phỏng cho phép phân tích các thông số khởi động của động cơ: thời gian đạt tốc độ đồng bộ (t_s), thời gian quá độ (t_{trans}), tốc độ (ω), mômen cực đại (M_{max}) và độ gợn sóng mômen (RipT) trong bảng 2.6. Độ gợn sóng mômen của Ex-LSPMSM có thể được tính toán [50]:

$$RipT = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_e} \quad (2.54)$$

Trong đó: T_{max} – giá trị mômen cực đại;

T_{min} – giá trị mômen cực tiểu;

T_e – giá trị mômen trung bình của động cơ điện, N.m;

RipT – độ gợn sóng mômen %.

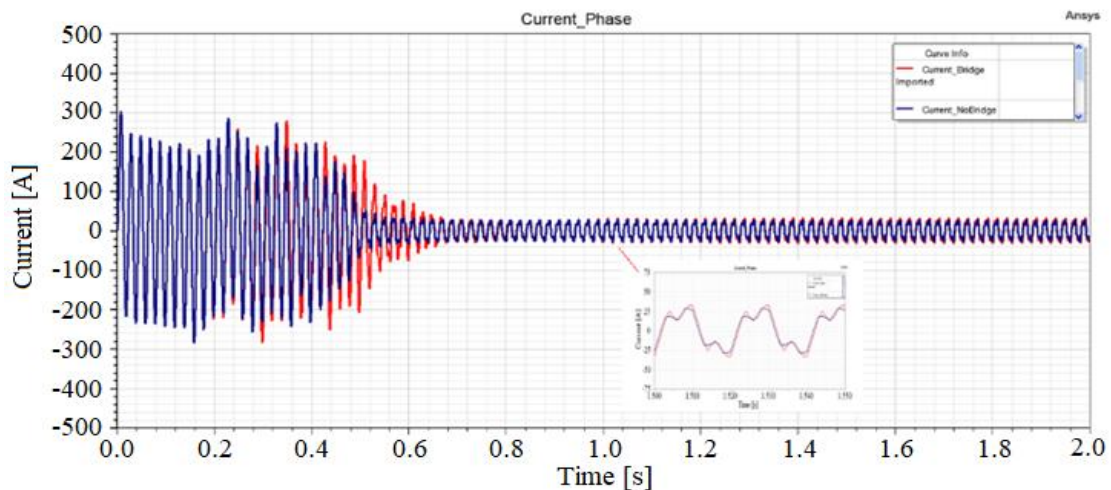
Bảng 2.6. Đặc tính mômen xoắn của động cơ

Loại	t_s (s)	t_{trans} (s)	RipT (%)
Không có cầu từ	0.45	0.75	23.1
Có cầu từ	1.14	1.14	26.6

Từ kết quả về đặc tính khởi động của Hình 2.19, Hình 2.20 và Bảng 2.6 trong trường hợp kết cấu rôto không có cầu từ, thời gian đạt tốc độ đồng bộ ($t_s = 0,45$ giây), thời gian quá độ ($t_{trans} = 0,75$ giây) và độ gợn sóng mômen ($RipT = 23,1\%$). Trong khi trường hợp có cầu từ có các tham số là tốc độ đồng bộ ($t_s = 1,14$ giây), thời gian quá độ ($t_{trans} = 1,14$ giây) và độ gợn sóng mômen ($RipT = 26,6\%$). Như vậy, có thể thấy rằng việc không sử dụng cầu từ sẽ làm cho Ex-LSPMSM có đặc tính làm việc tốt hơn so với khi sử dụng cầu từ.

** Đặc tính dòng điện.*

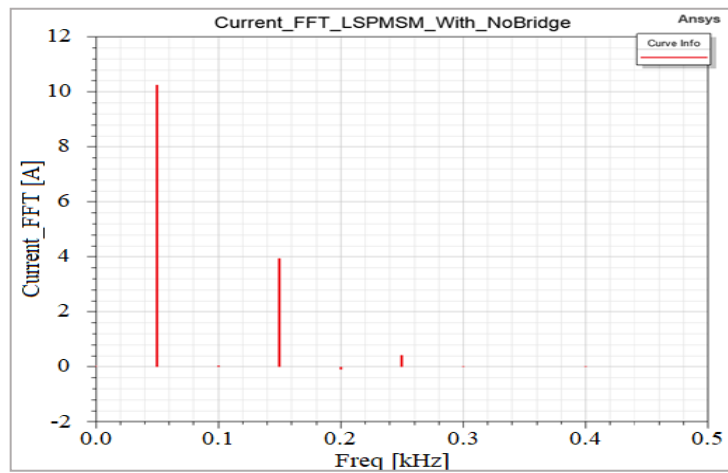
Đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM ở chế độ hoạt động ổn định được thể hiện trong Hình 2.21.



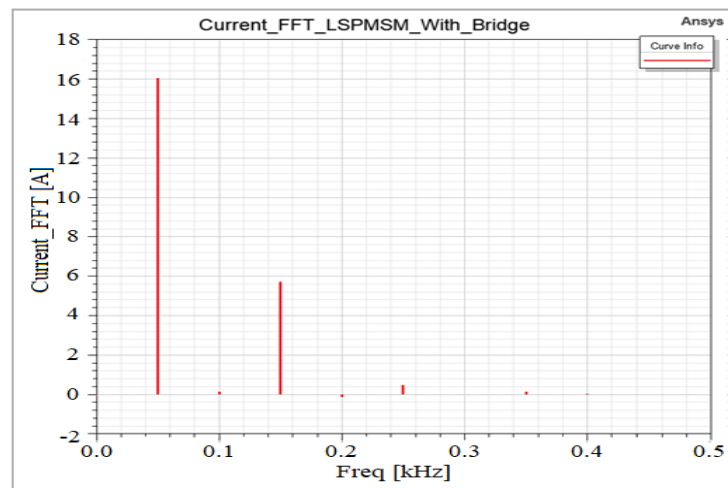
Hình 2.21. Đặc tính dòng điện ở chế độ vận hành trạng thái ổn định

Hình 2.21 cho thấy tất cả các dạng sóng đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM ở chế độ trạng thái ổn định, bất kể cấu hình nào, đều không phải hình sin. Dạng sóng dòng điện sẽ dao động ở tần số 50 Hz.

Phân tích các thành phần sóng hài của dạng sóng dòng điện trong Ex-LSPMSM được thể hiện trong Hình 2.22. Có thể thấy rằng biên độ hài bậc 3 trong trường hợp cấu trúc rôto có cầu từ đạt gần 6 A và trong trường hợp cấu trúc rôto không có cầu từ đạt gần 4 A. Cụ thể, dạng sóng dòng điện trong trường hợp cấu trúc rôto không có cầu từ sẽ có dạng gần với sin hơn so với trường hợp cấu trúc rôto có cầu từ.



a)



b)

Hình 2.22. Phân tích FFT sóng hài dòng điện:

a - không có cầu từ; b - có cầu từ.

Kết quả mô phỏng cho thấy dạng sóng dòng điện bị méo nên dòng điện bao gồm nhiều thành phần sóng hài. Tổng độ méo hài dòng điện (THD_i) có thể được tính

bằng công thức dưới đây [48],[49]:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.55)$$

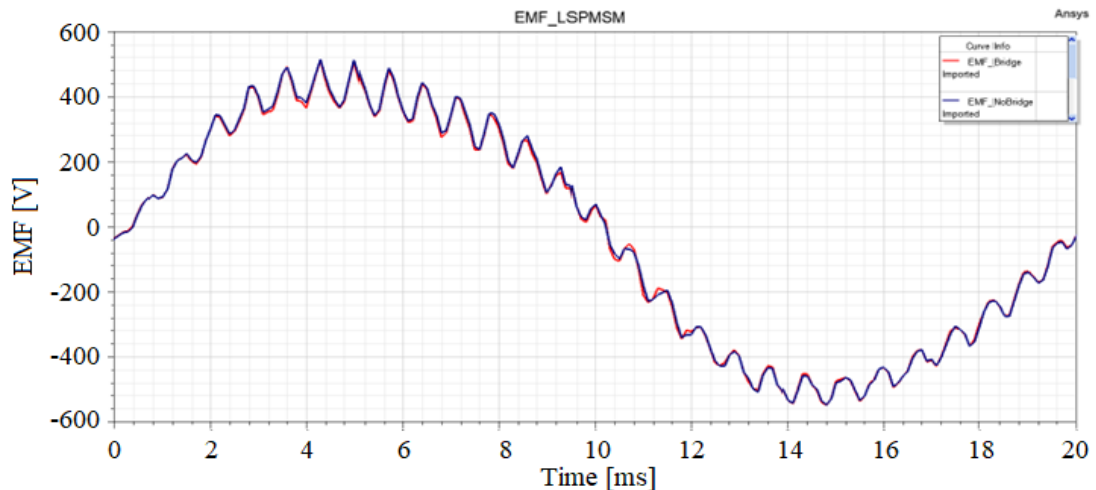
Bảng 2.7. Đặc tính dòng điện của động cơ

Loại	t _{trans} (s)	I _{max} (A)	THD _i (%)
Không có cầu từ	0,80	312	14,3
Có cầu từ	0,95	314	16,1

Từ kết quả phân tích trong Hình 2.21, Hình 2.22 và Bảng 2.7, cho thấy trong trường hợp cấu hình rôto không có cầu từ, đặc tính dòng điện có thời gian quá độ dòng điện $t_{trans} = 0,8$ giây, dòng điện cực đại $I_{max} = 312$ A và tổng độ méo hài THDi = 14,3%. Trong trường hợp cấu hình rôto có cầu từ, đặc tính dòng điện có thời gian quá độ dòng điện $t_{trans} = 0,95$ giây, dòng điện cực đại $I_{max} = 314$ A và tổng độ méo hài THDi = 16,1%. Do đó, trong trường hợp cấu hình rôto không có cầu từ, Ex-LSPMSM sẽ có đặc tính dòng điện tốt hơn.

** Đặc tính sức điện động không tải (EMF)*

Hình 2.23 biểu diễn dạng sóng sức điện động không tải cảm ứng trên dây quấn stato khi động cơ quay ở tốc độ đồng bộ trong điều kiện không tải.



Hình 2.23. Đặc tính sức điện động không tải.

Kết quả đưa ra trong Hình 2.23 cho thấy trong cả hai trường hợp được nghiên cứu, đặc tính sức điện động không tải đều là hình sin và tương tự nhau. Tuy nhiên, trong trường hợp sử dụng cầu từ, đặc tính sức điện động không tải có biên độ dao động lớn hơn so với khi không sử dụng cầu từ. Để đánh giá mức độ chênh lệch của điện áp đầu ra không tải so với giá trị định mức, sử dụng công thức (2.56):

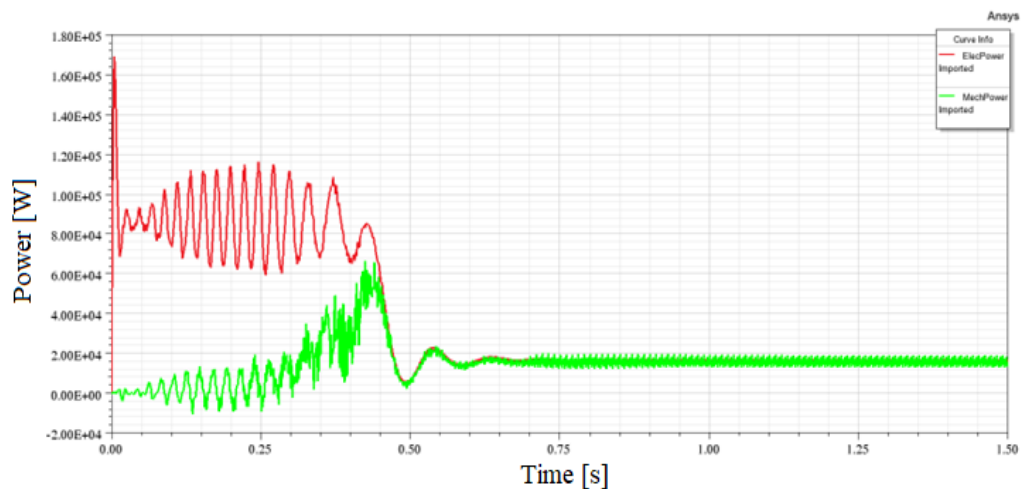
$$\Delta E\% = \frac{E_{1NB} - 380}{E_{1NB}} 100\% \quad (2.56)$$

Trong đó, E_{1NB} là giá trị hiệu dụng (RMS) của thành phần hài bậc nhất của điện áp đầu ra không tải.

Kết quả tính toán cho thấy, chênh lệch điện áp đầu ra không tải trong trường hợp cấu hình rôto không có cầu từ thì $\Delta E=2,3\%$, trong trường hợp cấu hình rôto có cầu từ thì $\Delta E=5,1\%$. Do đó, chênh lệch đặc tính sức điện động không tải trong trường hợp cấu hình rôto không có cầu từ là tốt hơn.

** Công suất điện từ và công suất cơ*

Đặc tính của công suất điện từ và công suất cơ để tính hiệu suất động cơ trong quá trình mô phỏng được đưa ra trong Hình 2.24.



Hình 2.24. Công suất điện từ và công suất cơ trong quá trình mô phỏng Ex-LSPMSM

Dựa trên các đặc tính điện từ và công suất cơ, tính toán hiệu suất của Ex-LSPMSM, trong trường hợp cấu hình rôto không có cầu từ, hiệu suất là $\eta=93,3\%$, trong trường hợp cấu hình rôto có cầu từ, hiệu suất là $\eta=92,5\%$.

Như vậy, nghiên cứu và đánh giá các đặc tính tốc độ, đặc tính mômen xoắn, đặc tính dòng điện, sức điện động không tải và hiệu suất của Ex-LSPMSM bằng phương pháp phần tử hữu hạn dựa trên phần mềm mô phỏng Ansys/Maxwell đã chỉ ra rằng cấu hình rôto không có cầu từ cho phép Ex-LSPMSM có các thông số làm việc tốt hơn. Cấu trúc này được lựa chọn để chế tạo và đánh giá thực nghiệm.

2.4. Kết luận

Chương 2 đã xây dựng và phân tích toàn diện mô hình toán động cơ Ex-LSPMSM, hình thành cơ sở lý thuyết và công cụ mô phỏng phục vụ thiết kế và thực nghiệm ở các chương tiếp theo.

Trên cơ sở mô hình toán của Ex-LSPMSM có xét đến ba thành phần mômen đặc trưng: mômen không đồng bộ trong giai đoạn khởi động, mômen kích từ của nam châm vĩnh cửu, và mômen từ trở. Mô hình này cho phép mô tả chính xác quá trình chuyển tiếp từ chế độ không đồng bộ sang đồng bộ, phản ánh rõ bản chất lai của Ex-LSPMSM kết hợp ưu điểm của cả động cơ cảm ứng và động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu.

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được ứng dụng trong phần mềm ANSYS/Maxwell nhằm mô phỏng phân bố từ trường, mômen điện từ và đặc tính khởi động của động cơ. Kết quả so sánh giữa mô hình giải tích và mô hình số cho sai số dưới 5%, chứng tỏ tính chính xác và độ tin cậy cao của phương pháp mô phỏng được đề xuất.

Dựa trên mô hình FEM, luận án đã khảo sát các phương án kết cấu rôto khác nhau về số lượng và cách bố trí thanh nam châm (2, 3 và 4 thanh), cũng như ảnh hưởng của cầu từ. Kết quả chỉ ra rằng cấu hình rôto ba thanh nam châm, không có cầu từ là tối ưu nhất với thời gian bắt đồng bộ ngắn ($t_s = 0,45$ s), gợn mômen thấp ($RipT = 23,1\%$), tổng méo hài dòng điện nhỏ ($THDi = 14,3\%$) và hiệu suất cao ($\eta = 93,3\%$). Phương án này giúp giảm từ thông rò, tăng mômen khởi động và cải thiện đặc tính điện từ tổng thể.

Như vậy, chương 2 đã xác lập được nền tảng lý thuyết và công cụ mô phỏng đáng tin cậy cho việc thiết kế kết cấu rôto của Ex-LSPMSM, góp phần khẳng định tính khả thi và hiệu quả của mô hình toán kết hợp mô hình phần tử hữu hạn trong nghiên cứu và phát triển động cơ Ex-LSPMSM. Các kết quả này được sử dụng làm cơ sở lựa chọn thông số của kết cấu rôto trong Chương 3.

Kết quả của Chương 2 mới chỉ xác lập cấu hình rôto trên cơ sở mô hình giải tích và mô phỏng phần tử hữu hạn. Việc lựa chọn hoàn chỉnh các thông số nam châm vĩnh cửu sẽ tiếp tục được phân tích, kiểm tra và hoàn thiện ở Chương 3.

CHƯƠNG 3

PHÂN TÍCH LỰA CHỌN THÔNG SỐ NAM CHÂM VĨNH CỬU Ex-LSPMSM

3.1. Khử từ của nam châm vĩnh cửu

3.1.1. Nam châm vĩnh cửu

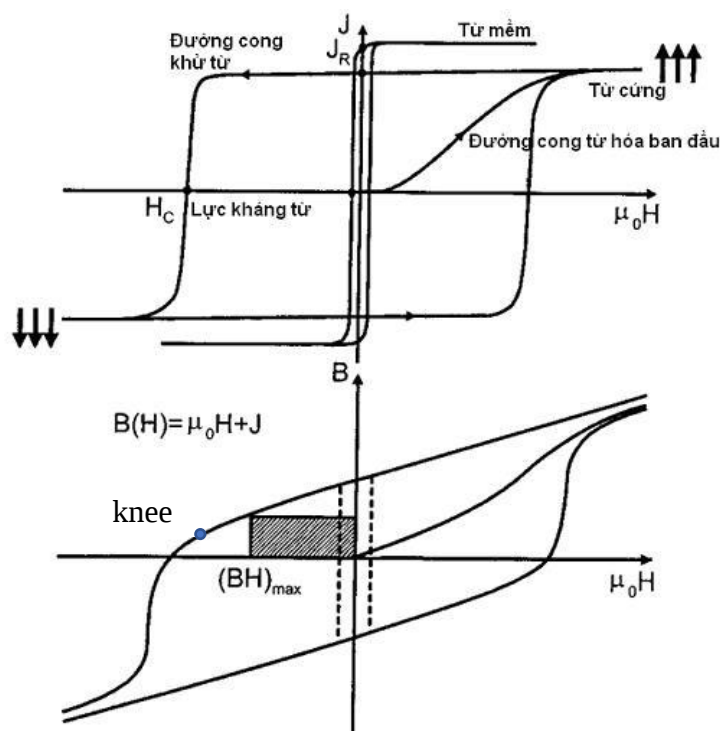
Trong hệ thống truyền động điện hiệu suất cao, đặc biệt đối với động cơ Ex-LSPMSM, vật liệu nam châm vĩnh cửu (NCVC) có ảnh hưởng quyết định đến khả năng tạo mômen, quá trình đồng bộ hóa, mức tiêu thụ năng lượng và độ ổn định làm việc của động cơ. Việc lựa chọn đúng vật liệu NCVC không chỉ chi phối chế độ vận hành xác lập mà còn ảnh hưởng rõ rệt đến đặc tính quá độ, khả năng chống khử từ và tuổi thọ của hệ thống [91]. Theo các nghiên cứu gần đây, vật liệu NCVC phát triển qua các nhóm chính gồm ferrite, Alnico, SmCo và NdFeB. Trong đó NdFeB là loại được sử dụng rộng rãi nhất trong các động cơ hiệu suất cao hiện nay [89], [91]. Ở Việt Nam, các nội dung nền tảng về vật liệu từ được trình bày trong các tài liệu [12], [16], tuy nhiên các tài liệu này chủ yếu dừng ở cơ sở lý thuyết, chưa gắn trực tiếp với bài toán ứng dụng trong động cơ Ex-LSPMSM. Nam châm ferrite có ưu điểm là giá thành thấp, chống ăn mòn tốt và công nghệ chế tạo tương đối đơn giản, nhưng có mật độ từ dư và tích năng lượng từ thấp nên khó đáp ứng các yêu cầu về mật độ công suất cao. Nam châm Alnico có từ dư lớn, song lực kháng từ thấp, do đó dễ bị khử từ khi làm việc trong điều kiện từ trường ngược. Nam châm SmCo có độ ổn định nhiệt tốt, lực kháng từ cao và làm việc tin cậy ở nhiệt độ lớn, nhưng chi phí chế tạo cao. So với các loại vật liệu trên, NdFeB có ưu thế nổi bật nhờ từ dư lớn, lực kháng từ cao và tích năng lượng từ lớn, cho phép tạo từ thông mạnh, nâng cao mômen đồng bộ và hiệu suất của động cơ [12],[89],[91].

Đối với động cơ Ex-LSPMSM tốc độ cao, đặc biệt ở vùng 3.000 vòng/phút, bài toán lựa chọn NCVC trở nên quan trọng hơn do nam châm vừa phải bảo đảm khả năng kích từ ở chế độ đồng bộ, vừa phải chịu được tác động của dòng điện lớn trong quá trình khởi động trực tiếp từ lưới. Nếu việc tính toán và lựa chọn NCVC không hợp lý, động cơ có thể gặp khó khăn trong gia công, lắp ráp, hiệu suất thấp, thời gian

khởi động kéo dài, thậm chí không đạt được khả năng khởi động và làm giảm tính thương mại của sản phẩm [90]. Khi được bố trí hợp lý, đặc biệt trong các cấu hình nam châm gắn chìm, NdFeB có thể góp phần giảm rung động, tăng độ ổn định vận hành và nâng cao độ tin cậy của động cơ Ex-LSPMSM.

Tổng hợp các phân tích trên cho thấy NdFeB là vật liệu NCVC phù hợp cho động cơ Ex-LSPMSM nhờ khả năng tạo mật độ từ cao, hỗ trợ thiết kế rôto gọn nhẹ, đạt mômen đồng bộ lớn và hiệu suất cao. Tuy nhiên, để phát huy đầy đủ ưu thế của vật liệu này, việc lựa chọn cấp nam châm và thiết kế rôto cần được xem xét cơ chế khử từ đặc trưng của quá trình khởi động trực tiếp từ lưới điện.

Đặc tính đường cong B-H của vật liệu từ nói chung và của nam châm NdFeB nói riêng được đưa ra trong hình 3.1 [12]:



Hình 3.1. Đường cong từ trễ và các đặc trưng của vật liệu từ cứng [12].

* Các đặc trưng cơ bản của nam châm NdFeB bao gồm [12]:

a. Lực kháng từ: ký hiệu H_C , (A/m)

Lực kháng từ (hay còn gọi là trường kháng từ hoặc trường đảo từ) là một đại lượng được sử dụng trong ngành từ học (“từ học” là một ngành khoa học thuộc vật lý học nghiên cứu về hiện tượng hút và đẩy của các chất và hợp chất gây ra bởi từ

tính của chúng), được định nghĩa bằng giá trị của từ trường cần đặt vào để triệt tiêu từ độ hoặc cảm ứng từ của vật từ.

Lực kháng từ là đại lượng quan trọng đặc trưng cho tính từ cứng của vật liệu từ cứng. Vì vật liệu từ cứng là khó từ hóa và khó khử từ, nên ngược lại với vật liệu từ mềm, nó có lực kháng từ cao. Điều kiện tối thiểu là trên 100 Oe, nhưng vật liệu từ cứng phổ biến thường có lực kháng từ cỡ hàng ngàn Oe trở lên. Nguồn gốc của lực kháng từ lớn trong các vật liệu từ cứng chủ yếu liên quan đến đến dị hướng từ tinh thể lớn trong vật liệu. Các vật liệu từ cứng thường có cấu trúc tinh thể có tính đối xứng kém hơn so với các vật liệu từ mềm và chúng có dị hướng từ tinh thể rất lớn.

Lực kháng từ của vật liệu từ cứng thông thường được biết đến qua công thức:

$$H_c = a \cdot \frac{K_1}{I_s} + b(N_1 + N_2)I_s + c \cdot \frac{\lambda_s \tau}{I_s} \quad (3.1)$$

Trong đó:

Thành phần thứ nhất có đóng góp lớn nhất với K_1 là hằng số dị hướng từ tinh thể bậc 1, I_s là từ độ bão hòa.

Thành phần thứ 2, đóng góp nhỏ hơn một bậc với N_1, N_2 là thừa số khử từ đo theo hai phương khác nhau.

Thành phần thứ 3 có đóng góp nhỏ nhất với λ_s là từ giảo bão hòa, τ là ứng suất nội.

Và a, b, c lần lượt là các hệ số đóng góp.

b. Tích số năng lượng từ cực đại

Tích số năng lượng cực đại là đại lượng đặc trưng cho độ mạnh yếu của vật từ, được đặc trưng bởi năng lượng từ cực đại có thể tồn trữ trong một đơn vị thể tích vật từ. Đại lượng này có đơn vị là đơn vị mật độ năng lượng $\frac{J}{m^3}$

Tích số năng lượng từ cực đại được xác định trên đường cong khử từ thuộc về góc phân tư thứ 2 trên đường cong từ trễ, là một điểm sao cho giá trị của tích cảm ứng từ B và từ trường H là cực đại. Vì thế, tích năng lượng từ cực đại thường được ký hiệu là $(B.H)_{\max}$. Để có tích số năng lượng, vật liệu NCVC cần có lực kháng từ lớn và cảm ứng từ dư cao.

c. Cảm ứng từ dư B_r (T)

Cảm ứng từ dư, thường ký hiệu là B_r hay J_r , là cảm ứng từ còn dư sau khi ngắt từ trường.

d. Nhiệt độ Curie T ($^{\circ}\text{C}$)

Đây là nhiệt độ mà tại đó vật liệu bị mất từ tính, trở thành chất thuận từ. Một số vật liệu từ cứng được ứng dụng trong các nam châm hoạt động ở nhiệt độ cao nên nó đòi hỏi nhiệt độ Curie rất cao. Loại vật liệu từ cứng có nhiệt độ Curie cao nhất hiện nay là nhóm các vật liệu trên nền SmCo có nhiệt độ Curie từ 500°C đến trên 1000°C .

* Điều kiện nhiệt và yêu cầu đối với động cơ phòng nổ.

Đối với động cơ Ex-LSPMSM dùng trong mỏ hầm lò, điều kiện nhiệt làm việc có ý nghĩa đặc biệt quan trọng vì ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định từ của nam châm vĩnh cửu và độ tin cậy vận hành của động cơ. Trong phạm vi luận án này, việc đánh giá NCVC được xem xét trên cơ sở điều kiện làm việc của động cơ phòng nổ và cấp cách điện F của máy điện. Nhiệt độ là thông số ảnh hưởng trực tiếp đến điểm gối B_{knee} trên đường cong khử từ của NCVC. Khi nhiệt độ tăng, miền làm việc an toàn của nam châm bị thu hẹp và nguy cơ khử từ không phục hồi tăng lên. Vì vậy, đối với động cơ Ex-LSPMSM, việc lựa chọn loại nam châm không thể chỉ dựa trên yêu cầu hiệu suất hoặc mật độ từ, mà phải đồng thời bảo đảm dự trữ chống khử từ phù hợp với điều kiện nhiệt trong quá trình làm việc và khởi động trực tiếp từ lưới điện [30], [56].

3.1.2. Phân tích quá trình khử từ của nam châm vĩnh cửu

3.1.2.1. Khử từ của nam châm vĩnh cửu

Để mô hình hóa hiện tượng khử từ của nam châm, cần thiết lập mối quan hệ giữa B , H và M đối với vật liệu từ. Mối quan hệ này được mô tả thông qua đường cong $B-H$.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.2)$$

Trong đó:

B : Mật độ từ cảm (đơn vị T),

H: Cường độ từ trường (đơn vị A/m),

M: Độ từ hóa (đơn vị A/m),

μ_0 : Độ từ thẩm của không khí.

Đường cong B–H có thể được mô hình hóa bằng một hàm giải tích [56]:

$$B = B_r + \mu_0 \mu_r H + E e^{K_1(K_2+H)} \quad (3.3)$$

Trong đó:

B_r : Mật độ từ dư,

μ_r : Độ từ thẩm tương đối,

μ_0 : Độ từ thẩm của không khí,

E: Hệ số chuyển đổi đơn vị, trong mô hình này E=1 T

Tham số K_2 được xác định theo biểu thức:

$$K_2 = \frac{\ln[(B_r + (\mu_r - 1) \cdot \mu_0 \cdot \mu_{H_{ic}}) \cdot E^{-1}]}{K_1} - H_{ic} \quad (3.4)$$

Trong đó:

H_{ic} : Cường độ khử từ nội tại,

K_1 : Tham số điều chỉnh hình dạng của điểm gấp khúc (điểm knee – điểm gồi) trên đường cong B–H.

Tham số K_1 xác định độ sắc nét của điểm gấp khúc trên đường cong B–H, giá trị K_1 càng lớn thì điểm gấp khúc càng rõ nét, thể hiện sự chuyển đổi đột ngột hơn giữa vùng tuyến tính và vùng bão hòa của vật liệu từ.

Từ hóa hồi phục của các nam châm vĩnh cửu được tính toán bằng một mô hình tuyến tính. Từ hóa hồi phục được ước lượng bằng một đường thẳng song song với độ dốc ban đầu của đường cong B–H, với độ dốc được xác định theo công thức:

$$k = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (3.5)$$

Trong đó:

k: Độ dốc của đường thẳng tuyến tính mô phỏng từ hóa hồi phục,

μ_0 : Độ từ thẩm của không khí,

μ_r : Độ từ thẩm tương đối của vật liệu.

Từ hóa dư mới có thể được biểu diễn bằng công thức sau:

$$B_s^{new} = B^s - k \cdot H^s \quad (3.6)$$

Trong đó:

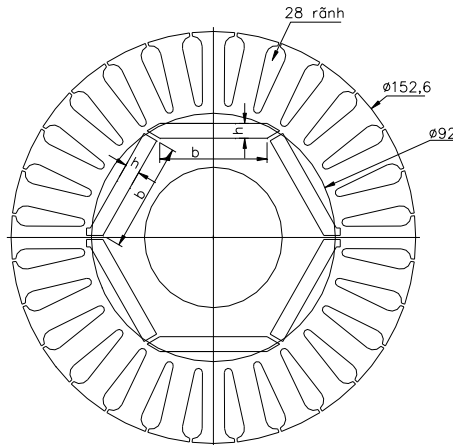
B_s^{new} và H^s là giá trị từ cảm và cường độ từ trường hiện tại, tương ứng,

B^s là giá trị từ cảm ban đầu khi từ hóa đạt mức cực đại,

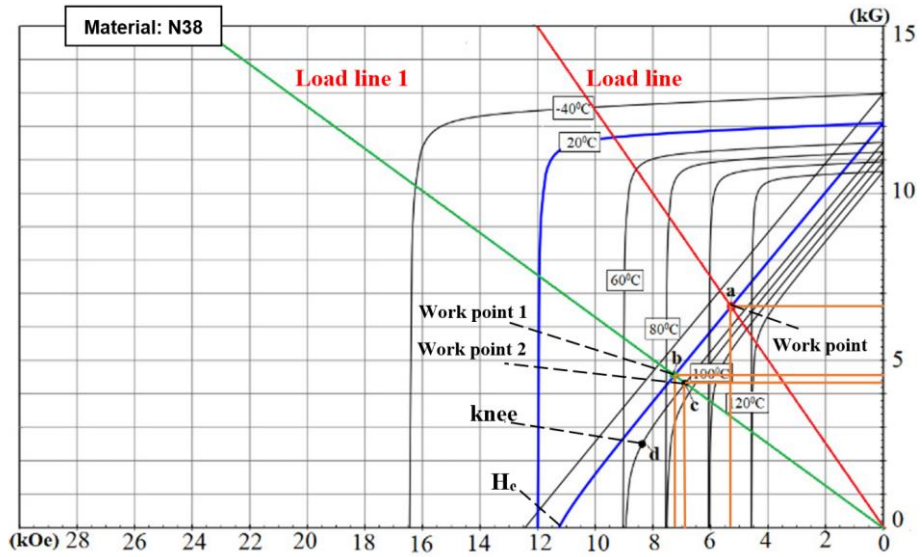
Nếu điểm làm việc hiện tại của nam châm nằm trong phần tuyến tính của đường cong B–H, giá trị từ dư sẽ không thay đổi. Tuy nhiên, nếu điểm làm việc rơi xuống dưới điểm gấp khúc của đường cong, điều này sẽ tạo ra hiện tượng khử từ. Đồng thời, mối quan hệ B–H mới sẽ được tính toán lại bằng cách sử dụng các công thức từ (3.3) và (3.4).

3.1.2.2. Phân tích quá trình khử từ bất đối xứng của NCVC trong quá trình khởi động Ex-LSPMSM

Trong động cơ Ex-LSPMSM, hiện tượng khử từ NCVC thường xảy ra trong quá trình khởi động. Phân tích hiện tượng khử từ NCVC trong quá trình khởi động của Ex-LSPMSM 3.000 vòng/phút, công suất 15 kW được chuyển đổi từ động cơ không đồng bộ lồng sóc (IM) với NCVC 3 thanh, có kết cấu rôto như hình 3.2 và đặc tính khử từ như hình 3.3.



Hình 3.2. Cấu hình rôto Ex-LSPMSM 3.000 vòng/phút [83].



Hình 3.3. Đường cong đặc tính khử từ của NCVC NdFeB-N38 [83].

Hiện tượng khử từ NCVC trong Ex-LSPMSM có thể xảy ra do nhiều nguyên nhân, trong đó đáng chú ý là dòng điện lớn trong quá trình khởi động trực tiếp từ lưới, sự cố ngắn mạch dây quấn stato hoặc các điều kiện vận hành bất thường.

Đặc tính khử từ là một trong những đặc tính quan trọng nhất của NCVC, đặc tính khử từ nằm ở góc phần tư thứ hai. Đặc tính khử từ thường được biểu thị dưới hai dạng $B(H)$ hoặc $J(H)$, điểm làm việc của NCVC trong quá trình vận hành Ex-LSPMSM trên đặc tính khử từ là giao điểm của đường đặc tính tải với đường thẳng $B(H)$ trong Hình 3.3 [47]. Khi cung cấp điện cho cuộn dây stato của Ex-LSPMSM, mật độ từ thông của NCVC được xác định theo công thức sau:

$$B_m = B_r + \mu_r \mu_0 \cdot H_m \quad (3.7)$$

Trong đó: B_m - mật độ từ thông, T; B_r - Cảm ứng dư, T; H_m - Từ trường khử từ, A/m; μ_0 - độ từ thẩm chân không; μ_r - độ từ thẩm.

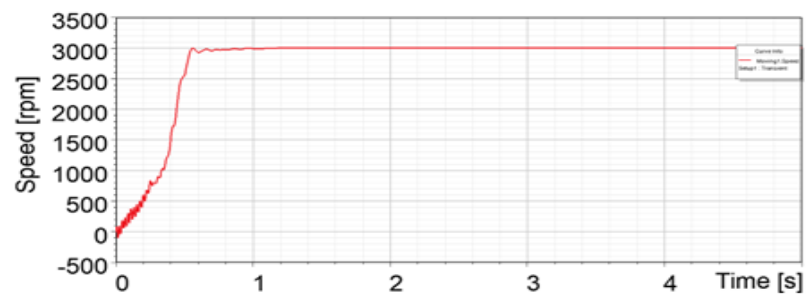
Theo Hình 3.3, khi thiết kế động cơ ở chế độ định mức, điểm làm việc (work point) của NCVC thường được chọn sao cho năng lượng dư trong NCVC là lớn nhất, tức là cực đại [47].

Khi Ex-LSPMSM khởi động, dòng điện khởi động sẽ tăng từ (4÷8) lần dòng điện định mức, khi đó đặc tính tải của động cơ sẽ thay đổi từ đường tải (load line)

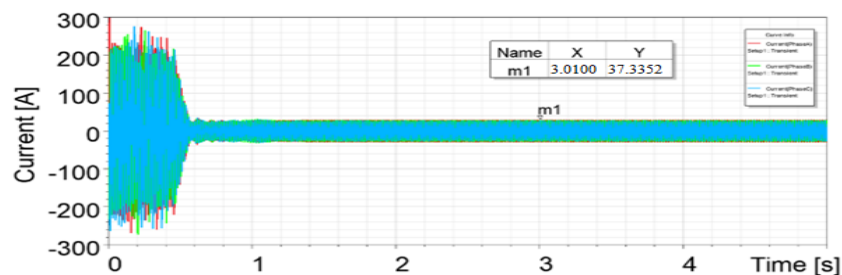
sang đường tải (load line1), điểm làm việc (work point) trên đặc tính khử từ sẽ thay đổi thành điểm làm việc 1 (work point 1).

Trong một số trường hợp, chẳng hạn như khởi động liên tục, nhiệt độ của động cơ tại thời điểm khởi động lớn. Giả sử động cơ khởi động ở nhiệt độ 60°C , điểm làm việc trên đặc tính khử từ là điểm làm việc (work point 2) và trên đặc tính khử từ tồn tại một điểm khử từ không phục hồi được gọi là điểm gối (knee) (Hình 3.3). Khi điểm làm việc (work point 2) vượt quá điểm gối (knee) theo chiều ngược chiều kim đồng hồ quá trình khử từ một phần sẽ xảy ra, ảnh hưởng đến các thông số làm việc của Ex-LSPMSM.

Trên hình 3.4 thể hiện đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM trong trường hợp không bị khử từ.



a) Đặc tính tốc độ

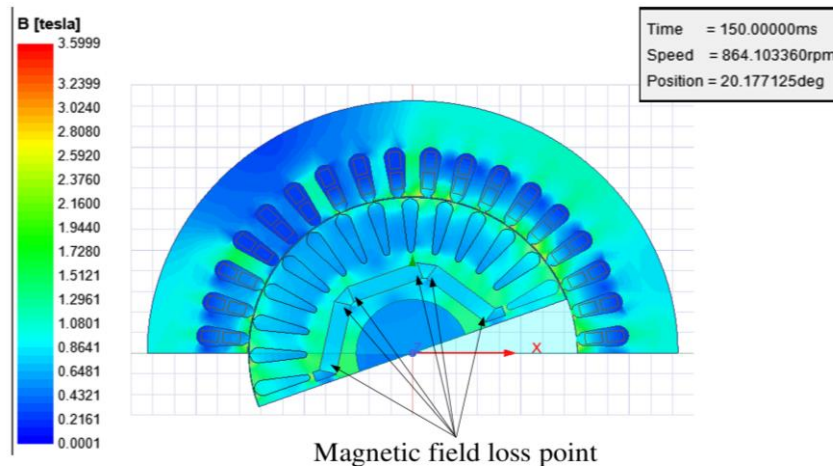


b) Đặc tính dòng điện

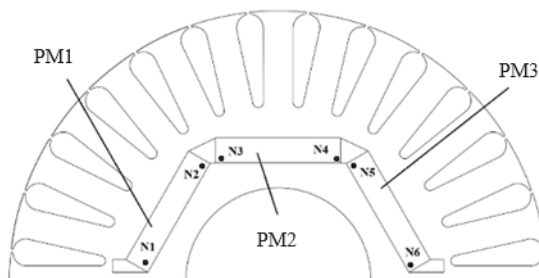
Hình 3.4. Đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM.

Kết quả ở Hình 3.4 cho thấy Ex-LSPMSM có thể khởi động và đồng bộ hoàn toàn sau khoảng thời gian $t = 0,58$ s, với dòng điện làm việc ổn định khoảng 26,4 A. Tuy nhiên, dòng điện khởi động cực đại có thể lên tới 162 A, và trong một số thời điểm, dòng xung khởi động có thể đạt tới 278 A. Mức dòng điện này có thể gây ra sự khử từ cục bộ của NCVC.

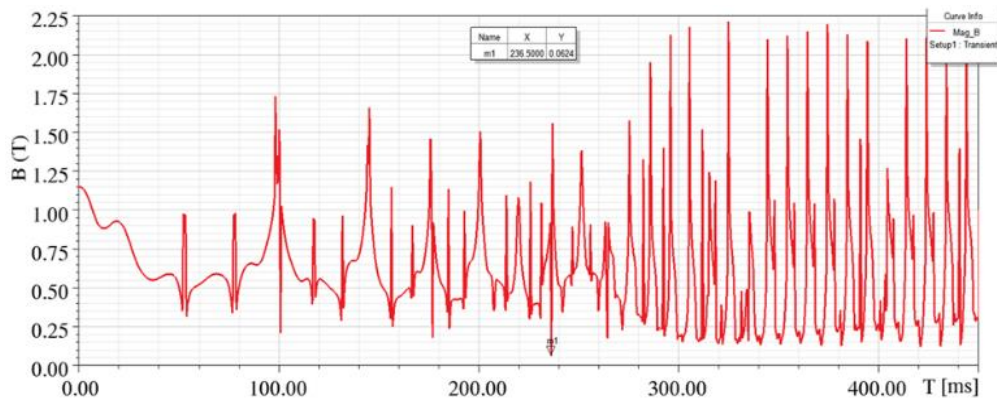
Hình 3.5 là kết quả mô phỏng phân bố mật độ từ thông sau 150 ms, tính từ thời điểm khởi động. Từ kết quả ở Hình 3.5, NCVC có độ suy giảm từ trường lớn nhất tại các vị trí góc của nó, tương ứng với các điểm từ N_1 đến N_6 như ở Hình 3.6. Các điểm $N_1 \div N_6$ là các điểm có khả năng bị khử từ cao nhất. Kết quả phân tích mật độ từ thông của điểm N_1 theo thời gian trong quá trình khởi động được thể hiện ở Hình 3.7.



Hình 3.5. Phân bố mật độ từ thông ở 150 ms.



Hình 3.6. Điểm khảo sát mật độ từ thông làm việc của NCVC.



Hình 3.7. Mật độ từ thông của điểm N_1 trên NCVC1 theo thời gian.

Kết quả ở Hình 3.7 cho thấy, dưới tác dụng của từ trường ngoài do dòng điện khởi động tạo ra trong quá trình khởi động, độ tự cảm từ tại điểm N_1 thay đổi theo

thời gian và có giá trị nhỏ nhất $B_{\min} = 0,061$ (T) tại thời điểm $t_{\min} = 235$ ms. Các khảo sát tương tự đối với các điểm N_2 đến N_6 cho kết quả ở Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Giá trị của mỗi điểm được chọn

Điểm	NCVC1		NCVC 2		NCVC 3	
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
$B_{\min}$ (T)	0,061	0,28	1,0	0,86	0,25	0,78
$T_{\min}$ (ms)	235	135	300	405	498	278

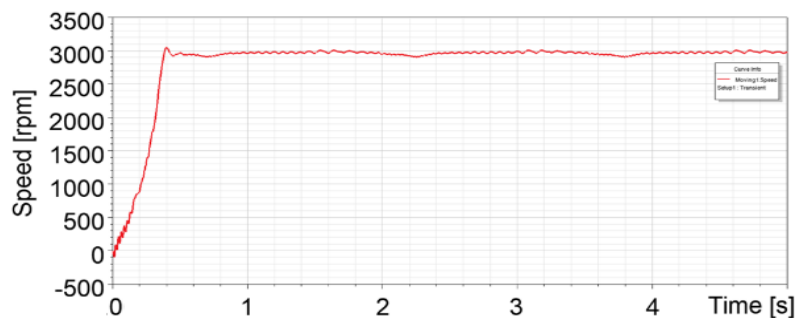
Kết quả ở Bảng 3.1 cho thấy, với cấu trúc NCVC 3 thanh trên, hai thanh NCVC ngoài cùng có điểm làm việc có từ trường nhỏ nhất lần lượt là điểm N_5 ($B_{\min N_5} = 0,25T$) tại thời điểm 498 ms, tiếp theo là N_1 ($B_{\min N_1} = 0,061T$) tại thời điểm 235 ms. Điều này cho thấy điểm N_1 đã bắt đầu xảy ra khử từ một phần. Chứng tỏ rằng trong ba thanh NCVC, hai thanh nam châm ngoài cùng dễ bị khử từ hơn trong quá trình khởi động.

Giả sử khi khởi động nhiệt độ động cơ là 60°C , từ trường tại điểm knee ($B_{\text{knee}} = 0,3T$) (Hình 3.3), điều này dẫn đến sự khử từ NCVC tại điểm N_5 ($B_{\min N_5} = 0,25T$) và điểm N_2 ($B_{\min N_2} = 0,28T$) và điểm N_1 ($B_{\min N_1} = 0,061T$). Do đó, trong điều kiện khởi động của động cơ, sự khử từ một phần có thể xảy ra đối với một hoặc hai cặp NCVC ở ngoài cùng của Ex-LSPMSM.

Kết quả phân tích ở trên cho thấy điểm N_5 trên cặp NCVC3 và điểm N_1, N_2 trên cặp NCVC1 là vị trí có giá trị từ tính dư nhỏ nhất trong quá trình khởi động, với lần lượt $B_{\min N_5} = 0,25$ T, $B_{\min N_1} = 0,061T$ và $B_{\min N_2} = 0,28T$. Đây là các vị trí nguy hiểm nhất đối với hiện tượng khử từ cục bộ. Trên cơ sở đó, nghiên cứu lựa chọn hai NCVC2, NCVC3 để xây dựng các kịch bản suy giảm từ nhằm đánh giá độ nhạy của đặc tính làm việc của động cơ đối với khử từ không đồng đều của nam châm. Giả thiết các mức suy giảm từ 30% (NCVC3) và 35% (NCVC1) trong nghiên cứu này được sử dụng như các mức khảo sát đại diện cho vùng suy giảm từ mạnh, phục vụ mục đích đánh giá ảnh hưởng của khử từ đến khả năng khởi động và đồng bộ của động cơ, chứ không phải là các giá trị được xác định trực tiếp từ khả năng làm việc của Ex-LSPMSM.

Về nguyên tắc, mức suy giảm từ không hồi phục của nam châm phải được xác định trên cơ sở điểm làm việc cực tiểu của nam châm trong quá trình khởi động, có xét đến nhiệt độ làm việc và đường cong khử từ của vật liệu NdFeB-N38. Tuy nhiên, trong phạm vi luận án này, để đánh giá định tính và định lượng ảnh hưởng của khử từ đến đặc tính vận hành của Ex-LSPMSM, sử dụng hai mức suy giảm từ cục bộ 30%(NCVC3) và 35%(NCVC1) tại hai vị trí nguy hiểm nhất nêu trên như các kịch bản khảo sát độ nhạy. Kết quả thu được là cơ sở để nhận xét xu hướng suy giảm khả năng đồng bộ, tăng dao động tốc độ và giảm độ ổn định vận hành khi nam châm xuất hiện khử từ cục bộ ở các vùng làm việc bất lợi.

Kết quả nghiên cứu về đặc tính khởi động và dòng điện của Ex-LSPMSM khi hai cặp NCVC3 và NCVC1 bị khử từ một phần không đối xứng, kết quả nghiên cứu về đặc tính tốc độ được đưa ra trong Hình 3.8.

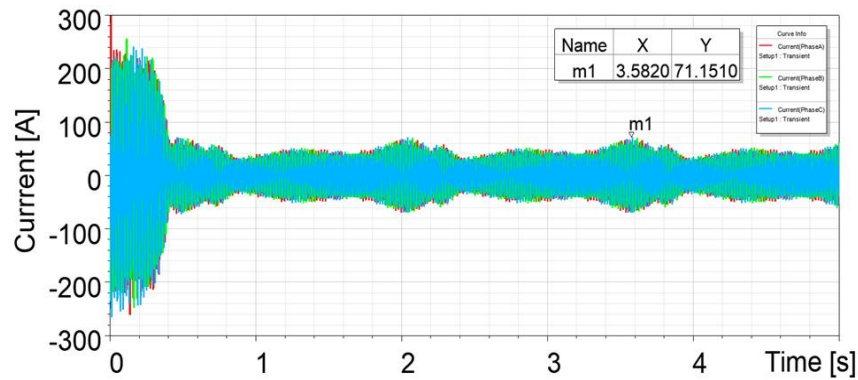


Hình 3.8. Đặc tính tốc độ của động cơ bị khử từ một phần không đối xứng.

Kết quả trong Hình 3.8 cho thấy thời gian để Ex-LSPMSM khởi động và đạt tốc độ đồng bộ là khoảng 0,4 giây, ngắn hơn thời gian 0,58 giây trong Hình 3.4a. Điều này được giải thích là do từ tính của NCVC1 và NCVC3 đã bị giảm, do đó lực hút từ tĩnh của rôto và stato đã giảm, làm cho thời gian khởi động nhanh hơn. Tuy nhiên, do hiện tượng khử từ một phần, Ex-LSPMSM không thể hoạt động ổn định ở tốc độ đồng bộ. Lúc này Ex-LSPMSM hoạt động dưới tốc độ đồng bộ và tốc độ động cơ dao động với biên độ dao động mạnh, gây ra rung động và tiếng ồn trong quá trình hoạt động.

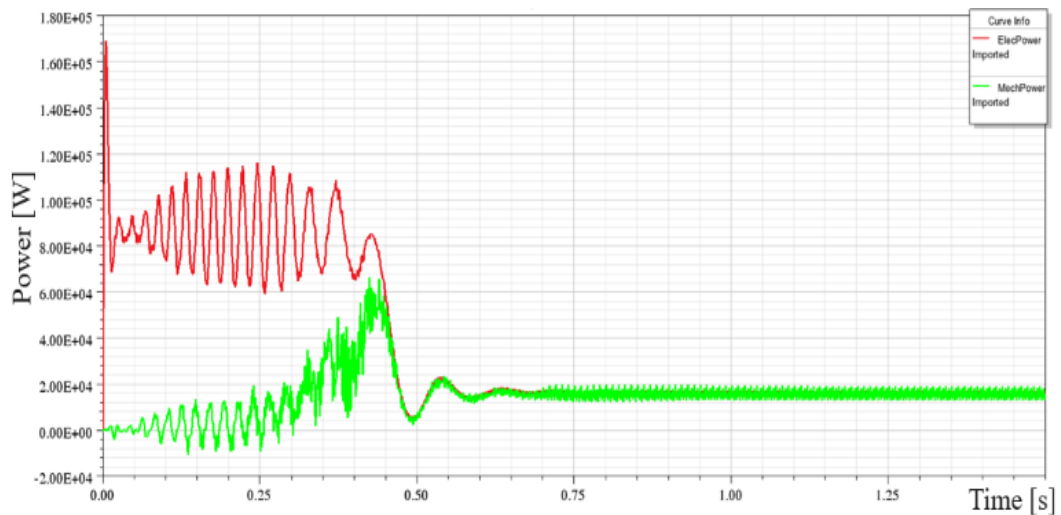
Đồ thị dòng điện trong Hình 3.9 cho thấy sau thời gian khởi động (0,4s), dòng điện làm việc của động cơ không ổn định, biên độ dòng điện dao động mạnh và giá trị tăng (giá trị hiệu dụng cực đại là 50,3 A) so với trường hợp không khử từ là 26,4 A (Hình 3.4b), tương ứng tăng 1,9 lần. Dòng điện cao và cùng với sự gia tăng nhiệt

độ có thể dẫn đến khử từ NCVC trong điều kiện làm việc bình thường của Ex-LSPMSM.



Hình 3.9. Đặc tính dòng điện của động cơ bị khử từ một phần.

Bên cạnh đó, hiệu suất của Ex-LSPMSM được xác định bởi đặc tính công suất điện từ và công suất cơ trong Hình 3.10. Mô phỏng tương ứng ở hai chế độ cho thấy hiệu suất của động cơ khi không khử từ $\eta = 93,3\%$ và hiệu suất của động cơ khi khử từ một phần (Hình 3.10) $\eta_1 = 90,10\%$. Hiệu suất của động cơ giảm đáng kể $\Delta\eta = 3,2\%$, hiệu suất này thấp hơn hiệu suất của cùng loại IM ($90,3\%$).



Hình 3.10. Công suất điện từ và công suất cơ của Ex-LSPMSM.

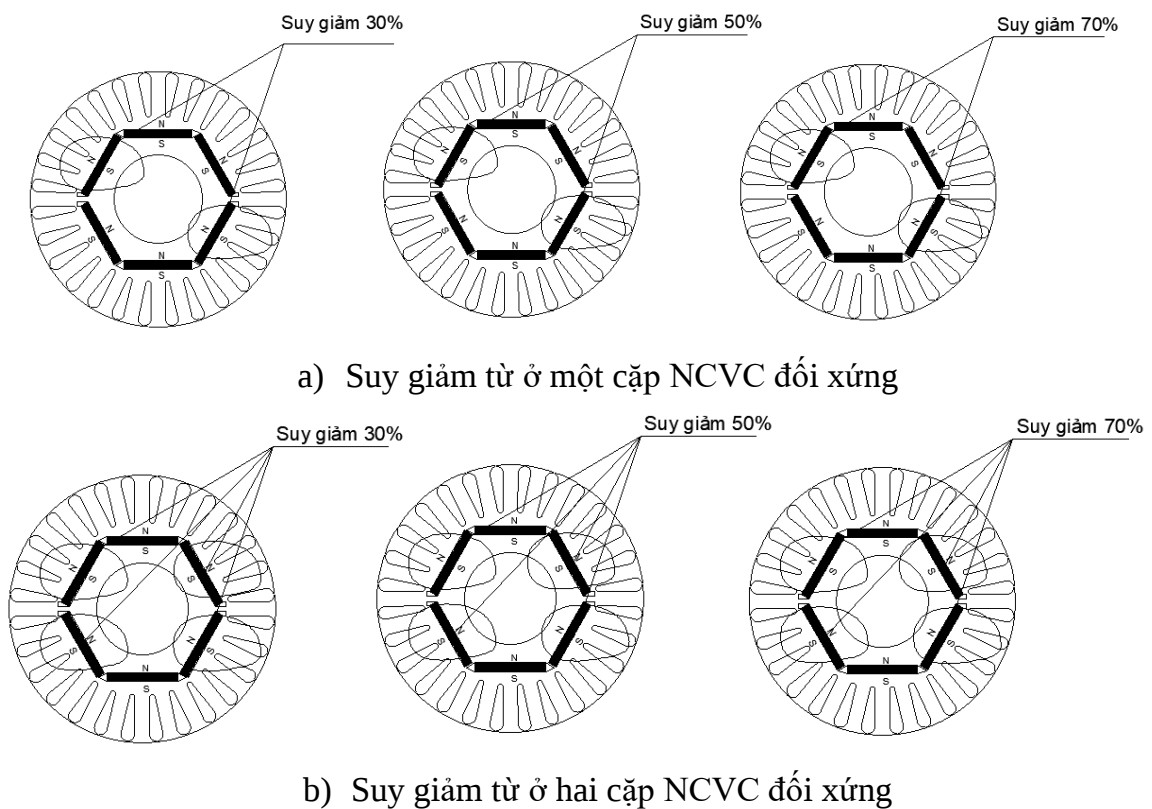
Kết quả nghiên cứu trên mô hình mô phỏng cho thấy: trong quá trình khởi động Ex-LSPMSM với cấu trúc 3 thanh, hai thanh ngoài dễ bị khử từ nhất, mức độ khử từ của các thanh không giống nhau. Trong trường hợp hai cặp nam châm bị khử từ một phần, đặc tính làm việc của Ex-LSPMSM kém hơn nhiều, chẳng hạn như: tốc

độ làm việc dao động dẫn đến mất đồng bộ, biên độ dòng điện dao động lớn, hiệu suất động cơ giảm mạnh theo các thông số đã phân tích.

3.1.2.3. Phân tích khử từ đối xứng của các cặp nam châm đối với Ex-LSPMSM

Cấu hình của động cơ ba pha Ex-LSPMSM (15 kW) điện áp 380/660V có dạng như hình 3.2, trong đó kích thước của NCVC có giá trị tương ứng độ dày h (mm) và bề rộng b (mm) [5],[47].

Nghiên cứu ứng dụng mô hình mô phỏng này để khảo sát ảnh hưởng của một số trường hợp suy giảm từ của NCVC đến vận hành của Ex-LSPMSM. Trong thực tế, suy giảm từ đối xứng của NCVC do chất lượng nam châm không tốt bị khử từ trong quá trình vận hành. Nghiên cứu một số kịch bản NCVC bị khử từ trong một số trường hợp sau:



Hình 3.11. Một số kịch bản suy giảm từ của NCVC

Do quá trình khử từ thông thường tác động lên NCVC là đối xứng nhau về mặt kết cấu, nên ta xét suy giảm từ của NCVC trong 2 dạng cơ bản sau đây:

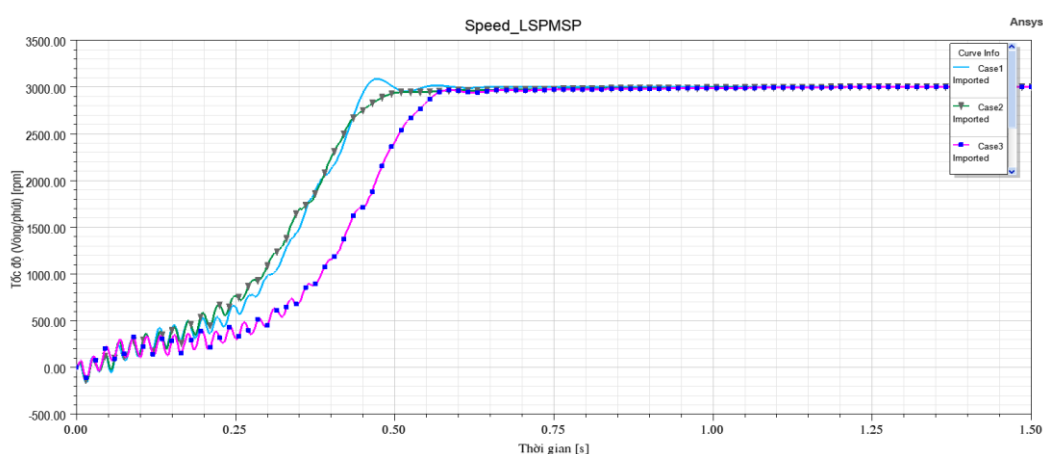
- Suy giảm từ ở 1 cặp NCVC đối xứng nhau
- Suy giảm từ ở 2 cặp NCVC đối xứng nhau

Ta cũng xét độ suy giảm từ của NCVC ở mức độ từ 30% đến 70%. Mức độ suy giảm từ này phản ánh tổng quan ảnh hưởng của suy giảm từ của NCVC. Nếu mức độ suy giảm nhỏ hơn hoặc lớn hơn nữa qua nghiên cứu này cũng có thể suy ra để đánh giá được. Từ đó, ta có 06 kịch bản được xét đến như sau:

Bảng 3.2. Vị trí và mức độ suy giảm từ

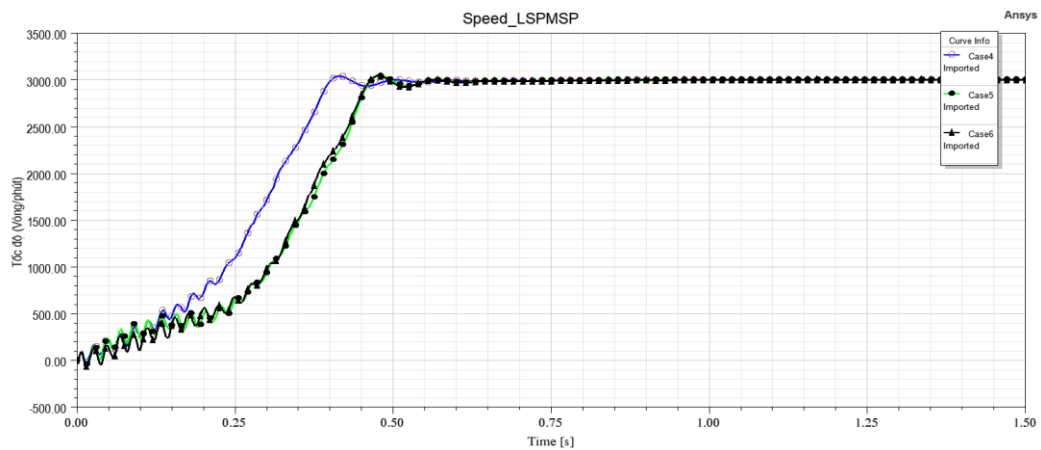
STT	Vị trí suy giảm từ	Mức độ suy giảm
Trường hợp 1	1 cặp NCVC đối xứng nhau	70% Br
Trường hợp 2	1 cặp NCVC đối xứng nhau	50% Br
Trường hợp 3	1 cặp NCVC đối xứng nhau	30% Br
Trường hợp 4	2 cặp NCVC đối xứng nhau	70% Br
Trường hợp 5	2 cặp NCVC đối xứng nhau	50% Br
Trường hợp 6	2 cặp NCVC đối xứng nhau	30% Br

Khi mô phỏng đối với 1 cặp NCVC bị suy giảm từ ở trường hợp 1÷3, kết quả mô phỏng đối với đường đặc tính tốc độ khi khởi động như sau:



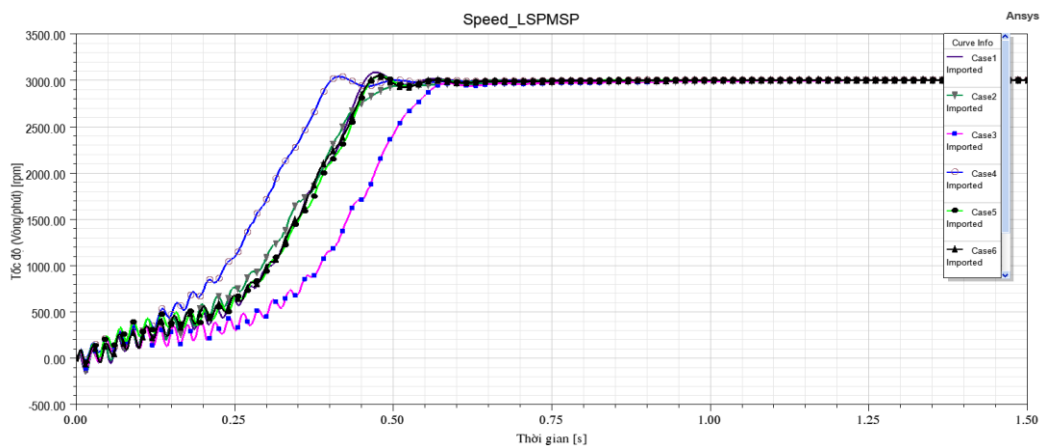
Hình 3.12. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM ở dạng suy giảm từ ở một cặp NCVC đối xứng nhau

Như vậy, từ hình 3.12 cho thấy đối với mức độ suy giảm từ thì ở trường hợp 1 cho đặc tính khởi động tốt nhất, thời gian đi vào tốc độ đồng bộ ổn định nhanh hơn 2 trường hợp còn lại. Nguyên nhân có thể giải thích do một khối NCVC lúc khởi động gần như không còn tác dụng, do đó mômen kéo của NCVC trong khởi động giảm xuống nên đặc tính khởi động sẽ tốt hơn.



Hình 3.13. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ ở hai cặp NCVC đối xứng nhau

Tương tự, đối với trường hợp suy giảm từ ở hai cặp NCVC đối xứng nhau. Nhận thấy trường hợp 4 cho đặc tính khởi động tốt nhất, thời gian đi vào tốc độ đồng bộ ổn định nhanh hơn 2 trường hợp còn lại.

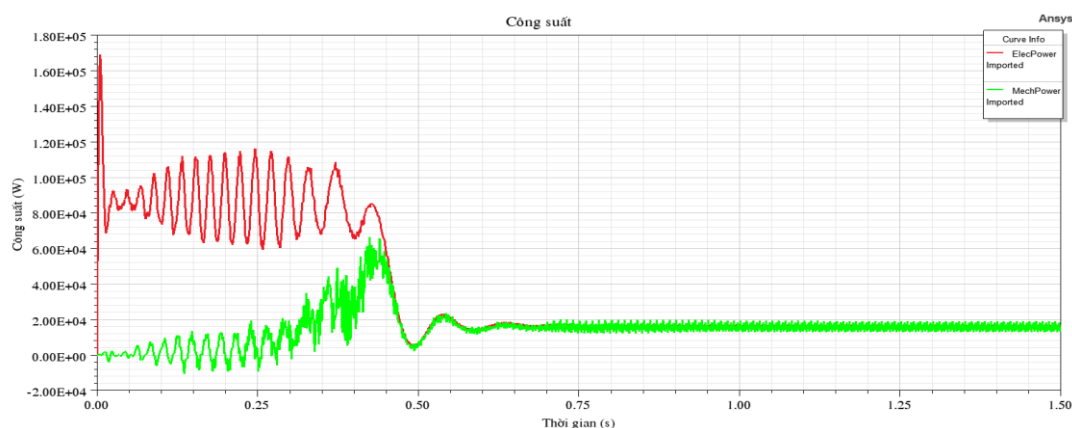


Hình 3.14. Đặc tính tốc độ của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ của NCVC ở hai dạng một và hai cặp NCVC đối xứng nhau

Từ hình 3.14 nhận thấy rằng, đối với suy giảm từ trong 2 dạng một và hai cặp NCVC đối xứng nhau thì chất lượng khởi động ở dạng hai cặp NCVC đối xứng cho chất lượng khởi động cao hơn, thời gian đi vào đồng bộ hoá và ổn định tốc độ nhanh hơn. Nguyên nhân có thể giải thích tương tự như đã giải thích ở trên, lúc này mômen kéo của NCVC trong quá trình khởi động của hai cặp đối xứng giảm so với một khối, dẫn đến chất lượng khởi động tốt hơn.

Bên cạnh đó, để nghiên cứu suy giảm từ đến hiệu suất LSPMSM trong quá trình vận hành xác lập, nghiên cứu cũng mô phỏng để tính toán hiệu suất đối với từng trường

hợp đã nêu. Như hình 3.15 bên dưới là đặc tính về công suất điện từ và công suất cơ để tính toán hiệu suất động cơ trong quá trình mô phỏng.



Hình 3.15. Công suất điện từ và công suất cơ trong quá trình mô phỏng Ex-LSPMSM trong trường hợp 1

Sau khi mô phỏng đối với từng trường hợp cụ thể, tổng hợp lại hiệu suất mô phỏng trong 6 trường hợp xét đến được thể hiện trong bảng 3.3 bên dưới.

Bảng 3.3. Hiệu suất của Ex-LSPMSM khi suy giảm từ ở một cặp NCVC đối xứng

STT	Hiệu suất η (%)
Trường hợp 1	91,2
Trường hợp 2	92,8
Trường hợp 3	93,3
Trường hợp 4	90,2
Trường hợp 5	92,5
Trường hợp 6	92,8

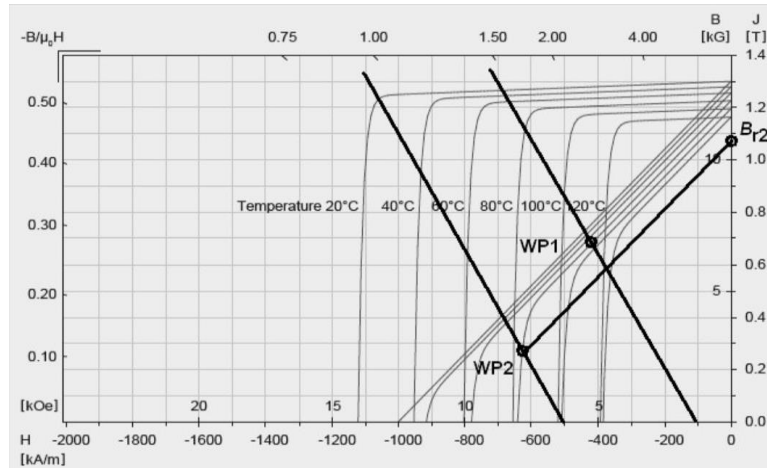
Từ bảng 3.3 ta nhận thấy rằng, trường hợp 3 ở đây sẽ cho hiệu suất cao nhất (93,3%) nhưng đặc tính khởi động kém nhất. Ngược lại đối với trường hợp 4 có đặc tính khởi động tốt nhất nhưng hiệu suất lại thấp nhất (90,2%). Nguyên nhân có thể hiểu là ở trường hợp 4 do khử từ mạnh nhất nên đặc tính khởi động của Ex-LSPMSM và hiệu suất gần như trở về trạng thái của động cơ không đồng bộ. Bên cạnh đó cũng thấy rằng, đối với hiệu suất thì mức độ khử từ ở hai dạng một và hai cặp NCVC dưới 30% là đáng kể.

3.1.3. Điều kiện đảm bảo không bị khử từ NCVC của Ex-LSPMSM

Việc tính toán, thiết kế NCVC sao cho tránh được hiện tượng khử từ trong quá trình khởi động của Ex-LSPMSM là rất quan trọng [56]. Theo [96], có hai loại đường cong khử từ thường được sử dụng: mật độ từ thông qua nam châm là hàm của trường từ (đường cong BH) và độ phân cực từ dưới dạng hàm của trường từ (đường cong JH). Mỗi điểm trên đường cong JH (H_m , J_m) có thể liên quan đến một điểm tương ứng trên đường cong BH (H_m , B_m)

$$B_m = \mu_0 H_m + J_m \quad (3.8)$$

Nếu điểm làm việc thiết kế nằm trong vùng tuyến tính, sẽ không có nguy cơ khử từ. Nếu đường làm việc cắt đường cong BH bên dưới điểm uốn của đường cong khử từ, sẽ xảy ra hiện tượng khử từ của nam châm vĩnh cửu. Để tránh nguy cơ khử từ này, nhà thiết kế phải đảm bảo rằng điểm làm việc nằm cách xa khu vực điểm gối của đường cong từ trễ trong những điều kiện xấu nhất. Đối với nam châm vĩnh cửu, có hai yếu tố dẫn đến khử từ là nhiệt độ hoặc dòng điện làm việc quá cao. Hình 3.16 bên dưới là quá trình khử từ không phục hồi do dòng điện quá cao gây ra. Trong trường hợp xét máy điện làm việc ở 80°C tại điểm làm việc W_{P1} , khi dòng điện làm việc quá cao, điểm làm việc sẽ dịch chuyển đến điểm W_{P2} . Sau quá trình khử từ không phục hồi, từ dư sẽ chuyển xuống điểm $B_{r2} < B_r$ nguyên bản và lúc này đường đặc tính mới sẽ là đường W_{P2} và B_{r2} thay vì đường cong BH tính toán ban đầu cho máy điện.



Hình 3.16. Khử từ do dòng điện quá cao.

Trong quá trình khởi động, NCVC chịu tác động của 3 loại sức từ động [40]. Ba loại này gồm: sức từ động dòng stato F_s , sức từ động dòng rôto F_r , F_g là sức từ

động sinh ra bởi dòng điện trong cuộn dây stato do từ thông NCVC biến đổi gây ra. Ba sức từ động này cùng F_{pm} do NCVC sinh ra gây ra hậu quả là hiện tượng khử từ không phục hồi trong đó điểm làm việc của NCVC bên dưới điểm uốn. Trường hợp xấu nhất của quá trình khử từ không phục hồi là tất cả các sức từ động có chiều ngược với hướng của F_{pm} . Tổng hợp bốn sức từ động F_s , F_r , F_g và F_{pm} sinh ra sức từ động tổng F , được xác định như sau [34]:

$$F = F_{pm} + F_s + F_r + F_g \quad (3.9)$$

Trong quá trình khởi động, lồng sóc tạo ra hiệu ứng tấm chắn điện từ bảo vệ NCVC khỏi khử từ do từ trường F_δ đi qua các thanh lồng sóc. Tuy nhiên, tấm chắn điện từ lồng sóc không ảnh hưởng đến F_g vì vận tốc rôto bằng vận tốc đồng bộ. Tác động của tấm chắn điện từ bảo vệ có thể được xác định bằng độ thấm thấu độ sâu và được xác định theo công thức

$$B_x = B_0 \cdot e^{-(x/\Delta)} \quad (3.10)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot \mu_1 \cdot \sigma_1}} \quad (3.11)$$

Trong đó, B_0 là mật độ từ thông tại bề mặt thanh lồng sóc, x là khoảng không gian giữa một điểm trên thanh lồng sóc và bề mặt, Δ là độ sâu thẩm thấu, μ_1 , σ_1 , s , f_1 là độ từ thẩm, độ dẫn, độ trượt và tần số theo thứ tự.

F_g quay cùng tốc độ với rôto, vì thế biên độ của nó không ảnh hưởng bởi hiệu ứng màn chắn. F_g được xác định bởi công thức

$$F_g = \frac{0.45 \cdot m \cdot N \cdot k_{w1} \cdot \psi_M}{\sqrt{2}p} \cdot \frac{1}{(r_1/\omega_r) + L} \quad (3.12)$$

Trong đó, N là số vòng một pha, k_{w1} là hệ số dây quấn cơ bản, p là số đôi cực, m là số pha, L là điện cảm pha, ψ_M là từ thông móc vòng do NCVC sinh ra.

Khi bắt đầu khởi động, R_1/ω_r rất lớn so với L vì lúc đó ω_r bằng 0 dẫn đến F_g rất lớn. Sau đó trị số R_1/ω_r giảm đi rất nhanh, và L đóng vai trò quan trọng trong vận hành. Lúc này F_g gần như ổn định và không thay đổi nhiều. Như vậy có thể thấy rằng sau khi khởi động, biên độ của F_δ bị làm suy yếu đáng kể nhờ có màn chắn điện từ, nhưng vẫn còn một lượng F_δ vượt qua thanh dẫn lồng sóc, gây ra khử từ NCVC. Bên

cạnh đó, biên độ F_g không bị tác động của màn chắn điện từ, biên độ này tăng đột ngột lúc ban đầu khởi động và có xu hướng ổn định về sau.

Như vậy, nếu thiết kế không tốt có thể sẽ xảy ra hiện tượng khử từ không phục hồi ở quá trình quá độ của động cơ như khởi động, ngắn mạch, mất đồng bộ do dòng điện stato có giá trị lớn. Khi xảy ra quá trình khử từ không phục hồi này, theo phân tích ở trên đường đặc tính làm việc của NCVC sẽ bị thay đổi. Giá trị từ dư ban đầu khi xảy ra hiện tượng khử từ không phục hồi của NCVC là $B_{r2} < B_r$. Theo công thức trên, giá trị E_0 phụ thuộc bậc nhất vào B_r do vậy E_0 bị giảm xuống do hiện tượng khử từ không phục hồi này.

Để tránh khử từ không phục hồi như trên đã phân tích thì bề dày NCVC phải đảm bảo theo công thức sau [34]:

$$I \leq l_M \frac{2}{m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot H_C}{\sqrt{2} \cdot N \cdot k_w} \quad (3.13)$$

$$I \cdot \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot N \cdot k_w}{2 \cdot p \cdot H_C} \leq l_M \quad (3.14)$$

Trong đó, I là giá trị dòng điện đỉnh trong quá trình khởi động. Giá trị này được xác định khi mô phỏng LSPMSM từ mô hình toán ở mục 2.

3.2. Phân tích lựa chọn tham số của nam châm vĩnh cửu

3.2.1. Phương pháp phân tích tham số

Giả sử $X \subseteq \mathbb{R}^n$ là tập hợp các vector quyết định khả thi x , tập khả thi X thường được xác định bởi các ràng buộc hình học, các định luật vật lý, và các yếu tố thực tiễn trong hệ thống. Hàm mục tiêu $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ được sử dụng để đánh giá mỗi vector quyết định. Trong nội dung này, ta sử dụng bài toán tối thiểu hóa mà không làm mất tính tổng quát, bởi vì bài toán tối đa hóa hàm f là tương đương với tối thiểu hóa hàm $-f$ [54].

Với ký hiệu này, bài toán phân tích tham số được biểu diễn như sau:

$$y^* = \min_x f(x) \quad (3.15)$$

với điều kiện: $x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$

Mục tiêu của bài toán là tìm nghiệm y^* , tương ứng với giá trị nhỏ nhất của hàm mục tiêu $f(x)$, trong đó $x \in X$. Nói chung, các phương pháp toán học được sử dụng

để xác định các điểm cực trị (cực tiểu cục bộ hoặc cực tiểu toàn cục) của hàm f . Trong lĩnh vực kỹ thuật, đặc biệt là kỹ thuật điện, phương pháp này thường được áp dụng trong quá trình xây dựng và phát triển các mô hình tính toán.

Trong phân tích tham số, mục tiêu là tìm nghiệm của một bài toán tiêu chuẩn dưới dạng hàm của một số tham số nhất định. Các tham số này là các biến có ảnh hưởng đến quá trình ra quyết định, nhưng nằm ngoài khả năng kiểm soát của người thiết kế. Trong ngữ cảnh thiết kế hệ thống, các tham số có thể bao gồm các yêu cầu thiết kế chưa được xác định rõ ràng, các điều kiện môi trường hoặc đặc tính của các phân hệ khác. Về mặt trực giác, bài toán tìm kiếm tham số có thể được xem như một ứng dụng của tiền bài toán tối ưu hóa tiêu chuẩn.

Giả sử $\theta \subseteq \mathbb{R}^p$ là tập hợp các vector tham số khả thi θ . Ta mở rộng phương trình (3-15) sang trường hợp tham số hóa như sau:

$$y^* = \min_x f(x, \theta) \quad (3.16)$$

với các ràng buộc:

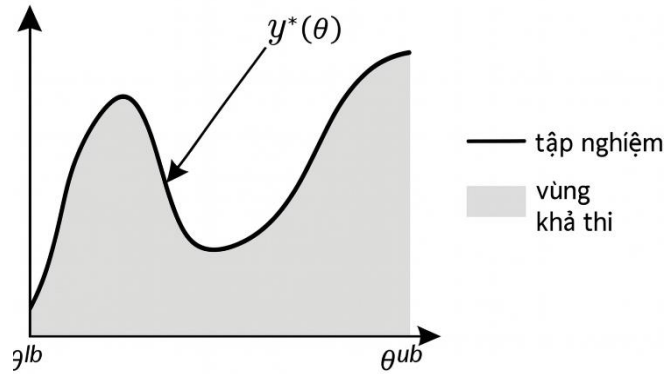
$$g_i(x, \theta) \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, q$$

$$h_i(x, \theta) \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, r$$

$$\theta_i \in \theta \subseteq \mathbb{R}^p, \quad x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$$

Trong trường hợp lựa chọn tham số, hàm mục tiêu được xác định như một hàm của vector tham số. Nói cách khác, $y^*(\theta)$ biểu diễn mối quan hệ giữa θ và $\min_{x \in X} f(x, \theta)$. Do đó, nghiệm phương trình, thay vì là một điểm duy nhất, có thể là một tập hợp (có khả năng vô hạn). Các ràng buộc g_i và h_i là những hàm phụ thuộc đồng thời vào biến thiết kế và tham số.

Trong luận án sử dụng phương pháp phân tích tham số, cụ thể phân tích kích thước bề rộng của NCVC khi chiều dày thay đổi với điều kiện đảm bảo khử từ trong thiết kế LSPMSM. Đây có thể coi là bài toán phân tích tham số với không gian 2 chiều. Hình 3.17 minh họa nghiệm của bài toán trong trường hợp hai chiều. Vùng được tô đậm biểu diễn vùng khả thi trong không gian mục tiêu. Đường đậm là giá trị cực đại của hàm mục tiêu ứng với một giá trị θ cho trước. Lưu ý rằng chiều x không được hiển thị trong hình là hướng vào mặt phẳng trang giấy.



Hình 3.17. Minh họa khái quát về tập nghiệm của bài toán phân tích tham số.

Không gian tham số khả thi có thể được xác định một cách đơn giản bằng các giới hạn trên và dưới, hoặc có thể bởi các ràng buộc tổng quát hơn (phi tuyến). Trong một số ứng dụng, việc định nghĩa các ràng buộc dưới dạng hàm của cả x và θ là hữu ích. Ví dụ, tham số có thể là một đáp ứng của các biến thiết kế, tức là $\theta = \theta(x)$, với ánh xạ $\theta: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$. Ràng buộc này, $\theta = \theta(x)$, sẽ được biểu diễn dưới dạng một ràng buộc đẳng thức trong phương trình (3.16).

3.2.2. Ứng dụng phương pháp phân tích tham số để lựa chọn thông số NCVC

3.2.2.1. Mô hình tính toán hiệu suất Ex-LSPMSM

Trong quá trình vận hành xác lập, Ex-LSPMSM có các tổn hao chính như sau: tổn hao trên cuộn dây stato, tổn hao sắt từ và tổn hao cơ.

Tổn hao dây quấn trên stato hay còn gọi là tổn thất đồng P_{cu} được xác định theo công thức [112].

$$P_{cu} = 3I^2 R \quad (3.17)$$

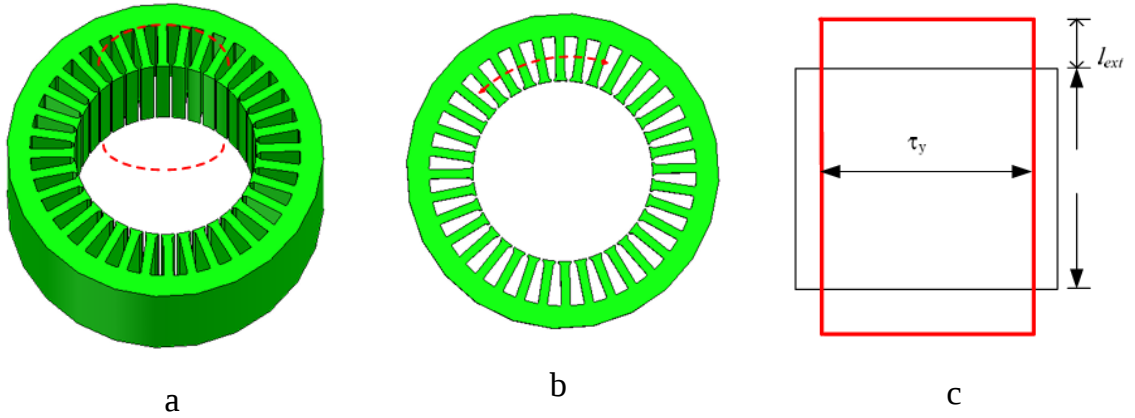
Điện trở cuộn dây stato R có thể được ước tính là điện trở DC (R_{dc}):

$$R_{dc} = \rho_c \frac{l_c N_c}{A} \quad (3.18)$$

Trong đó: ρ_c là điện trở suất của dây dẫn stato, l_c là chiều dài của một vòng dây quấn được xác định theo công thức:

$$l_c = 2(L + l_{end}) \quad (3.19)$$

Trong đó: $2L$ – chiều dài dây dẫn trong rãnh stato; $2l_{end}$ – chiều dài dây đầu nối ở hai đầu rãnh stato, có thể xác định theo mô tả trên hình 3.18.



Hình 3.18. Chiều dài một vòng dây quấn stato [112]

Chiều dài l_{end} được xác định:

$$l_{end} = 2l_{ext} + \tau_y \quad (3.20)$$

Trong đó: l_{ext} là chiều dài mở rộng đầu cuộn dây và là giá trị thường nằm trong khoảng từ 10 đến 30 mm, tùy thuộc vào kích thước máy, τ_y là bước cuộn dây tính bằng mm và được xác định

$$\tau_y = \frac{\pi(D+2(H_{s0}+H_{s1})+H_{s2}))}{p} \beta \quad (3.21)$$

Trong đó: β - là tỷ lệ bước ngắn; D - Đường kính stato tại phía khe hở không khí (mm); H_{s0} , H_{s1} , H_{s2} - Chiều cao của đầu răng stato, nêm rãnh, và phần từ nêm đến đáy rãnh (mm)

Tổn hao sắt từ trong Ex-LSPMSM được xác định gần đúng như sau

$$w_i = K_e f^2 B_{\max}^2 + K_h f B_{\max}^2 \quad (3.22)$$

Trong đó: f - là tần số; K_e , K_h - là hệ số tổn thất dòng xoáy và từ trễ; $B_{\max}$ - là mật độ từ thông cực đại.

Dưới tác động của từ thông không sin với nhiều thành phần sóng hài bậc cao, thì tổng tổn hao sắt từ trong động cơ được xác định như sau:

$$W_i = W_1(\alpha, B_{\max}) + \sum_{n=2}^M \{W_n(B_{r,n}) + W_n(B_{\theta,n})\} \quad (3.23)$$

Trong đó, W_1 và W_n lần lượt là tổn hao sắt cơ bản và tổn hao sắt thành phần sóng hài thứ n ; α là tỷ số trục của từ trường quay. Các đại lượng $B_{r,n}$ và $B_{\theta,n}$ lần lượt

biểu thị thành phần sóng hài bậc n của mật độ từ cảm theo hướng xuyên tâm và hướng chu vi.

Tổn hao cơ bao gồm tổn hao quạt gió làm mát và tổn hao do ma sát cơ P_{wf} . Thông thường giá trị này ước tính 1% tổng công suất đầu ra.

$$P_{wf} = 0.01P_{out} \quad (3.24)$$

Công suất đầu ra của động cơ

$$P_{out} = n_{phase} E_1 I_{ph} \quad (3.25)$$

Trong đó: n_{phase} là số pha của máy, I_{ph} là giá trị hiệu dụng của dòng điện cuộn dây và E_1 là giá trị hiệu dụng của thành phần cơ bản của suất điện động ngược được xác định theo công thức.

Từ đó, hiệu suất của hệ thống có thể được xác định theo biểu thức:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{core} + P_{cu} + P_{wf}} \quad (3.26)$$

Trong đó:

P_{out} : công suất ra hữu ích, P_{core} : tổn hao lõi sắt,

P_{cu} : tổn hao đồng trong cuộn dây, P_{wf} : tổn hao gió và ma sát.

3.2.2.2. Tính toán kích thước của nam châm vĩnh cửu (NCVC)

Thể tích của nam châm vĩnh cửu trong động cơ tỷ lệ thuận với công suất đầu ra. Do đó, thể tích sơ bộ của NCVC được lựa chọn sao cho đáp ứng công suất yêu cầu. Thể tích sơ bộ cần thiết của NCVC trong động cơ Ex-LSPMSM được xác định theo công thức [47]:

$$V_M = \frac{2k_{of}(1+k_{EC})P_2}{\pi^2 \xi 2pf B_r H_C} \quad (3.27)$$

Trong đó:

- P_2 : công suất đầu ra của động cơ;
- H_C : lực kháng từ của vật liệu nam châm;
- k_{of} : hệ số quá tải;
- k_{fd} : hệ số dạng từ hóa;
- k_{EC} : hệ số suất điện động;
- ξ : hệ số sử dụng nam châm;

- p : số đôi cực của động cơ;
- f : tần số nguồn;
- B_r : mật độ từ dư.

Mặt khác, để tránh hiện tượng khử từ, chiều dày tối thiểu của NCVC theo hướng từ hóa cần được đảm bảo theo công thức [34]:

$$l_M \geq \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2} N k_{ws}}{2 p H_C} I_p \quad (3.28)$$

Trong đó:

- l_M : chiều dày của NCVC theo hướng từ hóa;
- I_p : giá trị đỉnh của dòng điện trong quá trình khởi động;
- N : số vòng dây trên một pha;
- k_{ws} : hệ số dạng rãnh stato;
- m : số pha của động cơ.

Với động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, có: $m = 3$; $k_{ws} = 0,92$; $N = 120$ vòng/pha; $H_C = 950000$ A/m; $I = 26,2$ A. Khi sử dụng cho phụ tải quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò thì bội số dòng khởi động từ $2 \div 3$ lần dòng định mức, chọn $I_{kd} = 2,2 I_{dm} \rightarrow I_p = 2,2 \cdot 26,2 = 57,6$ (A)

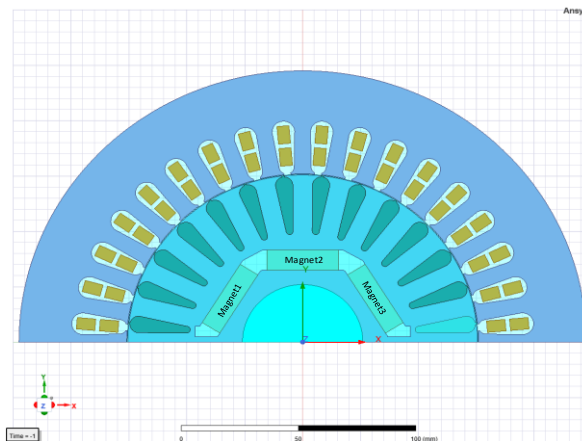
$$\rightarrow l_M \geq \frac{3}{2} \frac{4}{3,14} \frac{\sqrt{2} \cdot 120 \cdot 0,92}{2 \cdot 950000} \cdot 57,6 = 9 \text{ mm} \rightarrow \text{chọn } l_M = 9 \text{ mm}$$

Từ phân tích giải tích về lý thuyết ở phần trên cho thấy Ex-LSPMSM là động cơ có hiệu suất cao, tuy nhiên trong vận hành do ảnh hưởng của dòng quá độ trong khởi động sẽ có thể xảy ra quá trình khử từ của NCVC. Ảnh hưởng khử từ tác động đến tất cả các thông số vận hành của động cơ, qua đó ảnh hưởng đến hiệu suất vận hành ở trạng thái xác lập của động cơ. Trong nghiên cứu này, sẽ lựa chọn kích thước NCVC để tối đa hóa hiệu suất vận hành và tránh hiện tượng khử từ trong động cơ. Đối tượng khảo sát là động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, 2 cực có các thông số chính như sau:

Bảng 3.4. Thông số động cơ Ex-LSPMSM

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Đường kính ngoài stato	D_{out}	245	mm
Đường kính trong stato	D_{in}	152	mm
Đường kính ngoài rôto	D	151	mm
Đường kính trục rôto	D_t	52	mm
Vật liệu thép stato	<i>Steel 1008</i>		
Số rãnh stato	Z_1	36	rãnh
Số rãnh rôto	Z_2	28	rãnh
Chiều dài khe hở không khí	δ	0,5	mm
Điện áp nguồn cấp	U_n	380/660	V
Tần số nguồn cấp	f	50	Hz
Nam châm vĩnh cửu	<i>NdFeB-N38</i>		

Cấu hình rôto Ex-LSPMSM 15 kW, $2p = 2$ mô phỏng như hình 3.19:

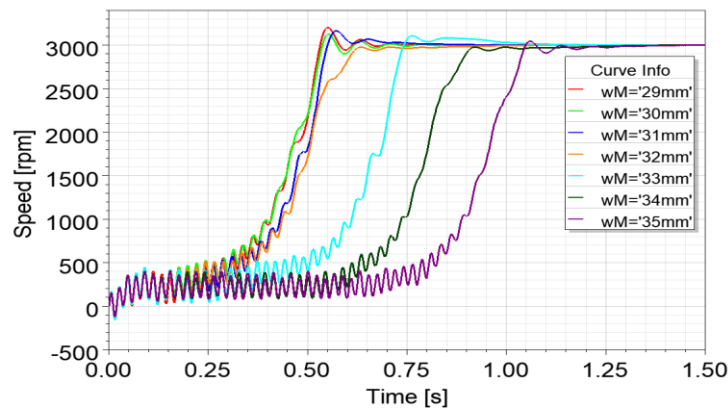


Hình 3.19. Cấu hình Ex-LSPMSM thực nghiệm 15 kW, $2p = 2$

Kết cấu rôto của động cơ Ex-LSPMSM thực nghiệm gồm hai cực, mỗi cực bố trí ba thanh nam châm vĩnh cửu (NCVC) có kích thước và đặc tính giống nhau. Dựa trên các thông số thực nghiệm của Ex-LSPMSM và sử dụng các công thức sơ bộ (3.27) và (3.28), thể tích cần thiết V_M của nam châm có thể được tính toán cho quá trình chế tạo. Để tránh hiện tượng khử từ, có thể lựa chọn chiều dày nam châm $l_M = 9$ mm. Kịch bản mô phỏng được thiết lập với chiều dày thanh nam châm $l_M = 9$ mm,

trong khi chiều rộng w_M được thay đổi, đảm bảo rằng thể tích V_M của nam châm không thay đổi quá 10% so với giá trị tính toán ban đầu. Do đó, bài toán mô phỏng được thực hiện với giá trị w_M thay đổi từ 29 mm đến 35 mm, với bước tăng 1 mm, tương ứng 7 trường hợp mô phỏng.

Với kích bản w_M thay đổi từ 29 ÷ 35 mm bước 1 mm, kết quả mô phỏng đặc tính tốc độ khởi động Ex-LSPMSM như hình 3.20 bên dưới



Hình 3.20. Đặc tính tốc độ khởi động của Ex-LSPMSM 15 kW, $2p = 2$

Hình 3.20 cho thấy, động cơ Ex-LSPMSM có thể khởi động với tải định mức tại các giá trị khác nhau của w_M . Tuy nhiên, khi chiều rộng nam châm w_M tăng lên, quá trình khởi động trở nên khó khăn hơn. Đặc biệt, khi $w_M \geq 33$ mm, thời gian đồng bộ hóa của động cơ tăng đáng kể, dẫn đến động cơ khởi động chậm và quá trình bắt đồng bộ diễn ra rất chậm. Kết quả đưa ra trong bảng 3.5.

Bảng 3.5. Thời gian khởi động

w_M (mm)	t_{st} (s)	$\Delta\omega_{max}$ (vòng/phút)
29	0,734	200
30	0,767	126
31	0,848	163
32	1,059	15
33	1,128	110
34	1,352	0
35	1,405	44

Trong đó:

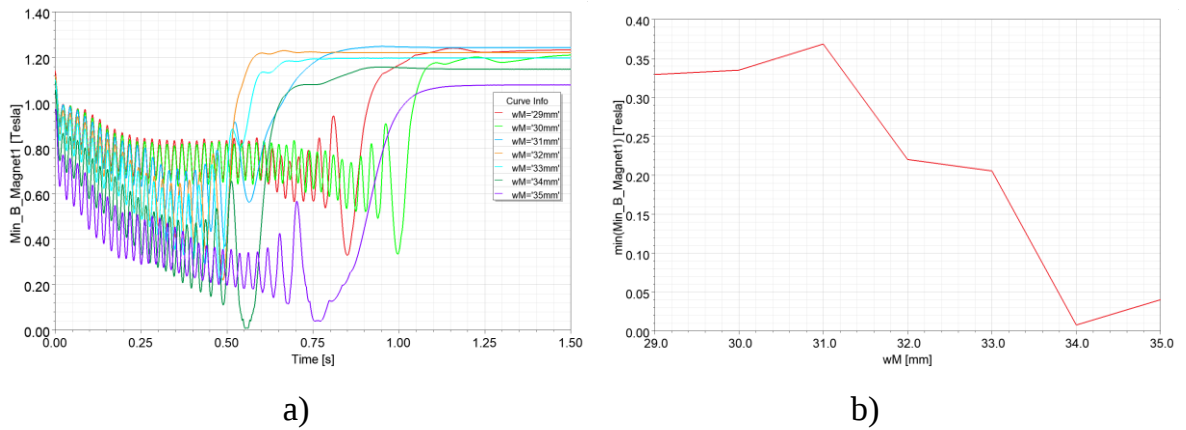
t_{st} : thời gian đồng bộ hóa – là khoảng thời gian từ khi bắt đầu khởi động đến khi tốc độ rôto đạt trạng thái đồng bộ ổn định;

$\Delta\omega_{max}$: dao động tốc độ cực đại trong quá trình quá độ.

Như vậy, có thể thấy là bề rộng w_M càng lớn thời gian đồng bộ hóa t_{st} càng lớn, động cơ vào đồng bộ khó khăn. Trường hợp lớn nhất ứng với $w_M = 35$ mm, thời gian vào đồng bộ 1.4s so với $w_M = 29$ mm thì thời gian vào đồng bộ w_M lớn hơn gấp đôi.

Để đánh giá khả năng khử từ của từng thanh NCVC trong quá trình khởi động, ta mô phỏng để tìm điểm làm việc có trị số B cực tiểu (B_{min}) trên mỗi thanh NCVC. Tại điểm B_{min} này nguy cơ xảy ra quá trình khử từ không phục hồi là cao nhất đối với NCVC. Kết quả mô phỏng tìm điểm B_{min} cho từng thanh NCVC như sau:

Kết quả mô phỏng B_{min} cho thanh NCVC1 trong quá trình khởi động của động cơ như hình 3.21 bên dưới.

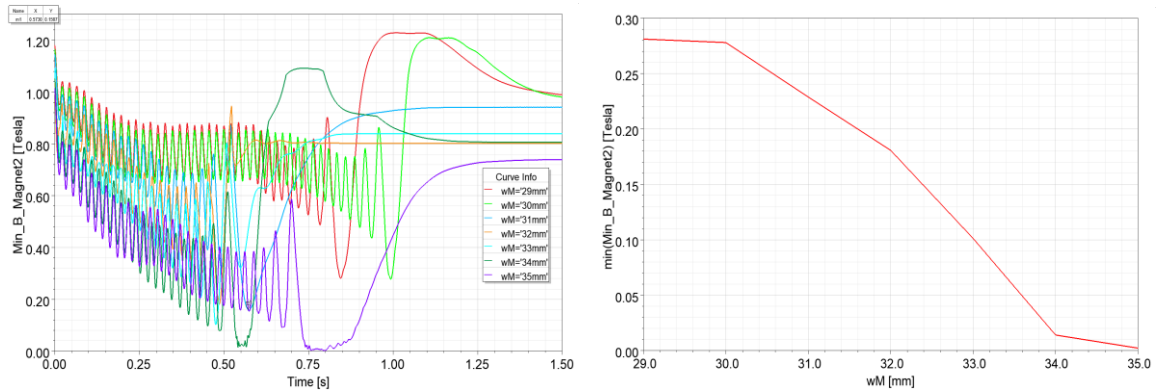


Hình 3.21. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCVC1.

a) Đặc tính khử từ theo thời gian; b) Điểm làm việc nhỏ nhất theo sự thay đổi của w_M .

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng trong quá trình khởi động, NCVC1 chịu ảnh hưởng đáng kể của dòng điện khởi động, như thể hiện trong Hình 3.21(a). Khi chiều rộng nam châm w_M tăng, giá trị B_{min} giảm, điều đó cho thấy thanh nam châm vĩnh cửu bị khử từ nghiêm trọng hơn. Giá trị B_{min} nhỏ nhất của các thanh NCVC khi $w_M \geq 34$ mm gần như bằng không, như thể hiện trong Hình 3.21(b). Do đó, khi $w_M \geq 34$ mm, NCVC1 có nguy cơ rất cao xảy ra hiện tượng khử từ.

Kết quả mô phỏng $B_{\min}$ cho thanh NCV2 trong quá trình khởi động của động cơ như hình 3.22 bên dưới.

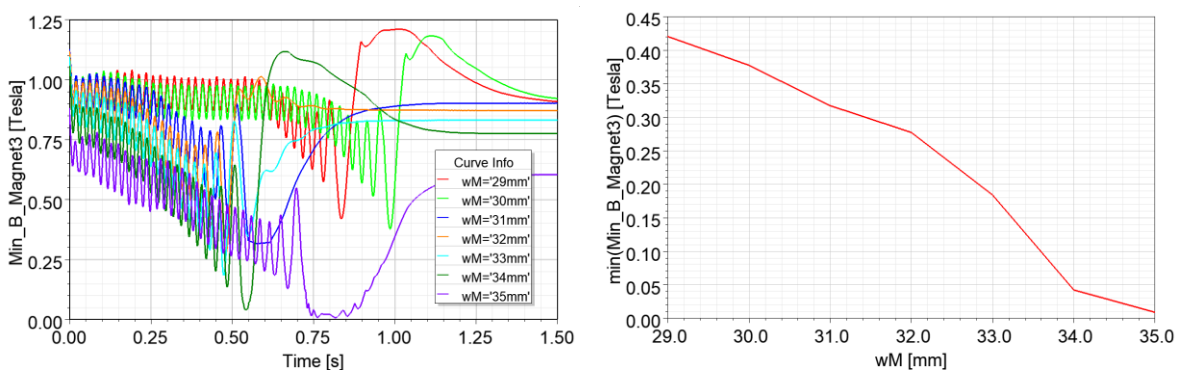


Hình 3.22. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCV2;

a) Đặc tính khử từ theo thời gian; b) Điểm làm việc nhỏ nhất theo sự thay đổi của w_M

Cũng tương tự như thanh 1 với bề rộng w_M lớn hơn hoặc bằng 34 mm, thanh NCV2 có điểm làm việc thấp nhất xấp xỉ không, có khả năng bị khử từ không phục hồi. Bên cạnh đó cũng có thể thấy là với $w_M = 35$ mm thời gian duy trì quá điểm làm việc thấp nhất của thanh NCV2 tương đối dài.

Kết quả mô phỏng $B_{\min}$ cho thanh NCV3 trong quá trình khởi động của động cơ như hình 3.23 bên dưới.



Hình 3.23. Điểm cực tiểu toàn cục của trạng thái làm việc của NCV3;

a) Đặc tính khử từ theo thời gian; b) Điểm làm việc nhỏ nhất theo sự thay đổi của w_M .

Cũng tương tự như thanh 1 và thanh số 2 với chiều dài w_M lớn hơn hoặc bằng 34 mm, thanh NCV3 có $B_{\min}$ thấp nhất xấp xỉ không (nhưng vẫn lớn hơn giá trị của thanh NCV3 số 1 và số 2). Như vậy, lúc này với thanh NCV3 số 3 này vẫn có khả năng

năng bị khử từ. Bên cạnh đó cũng có thể thấy là, với $w_M = 35$ mm thời gian duy trì điểm làm việc thấp nhất của thanh NCVC số 3 tương tự như thanh số 2.

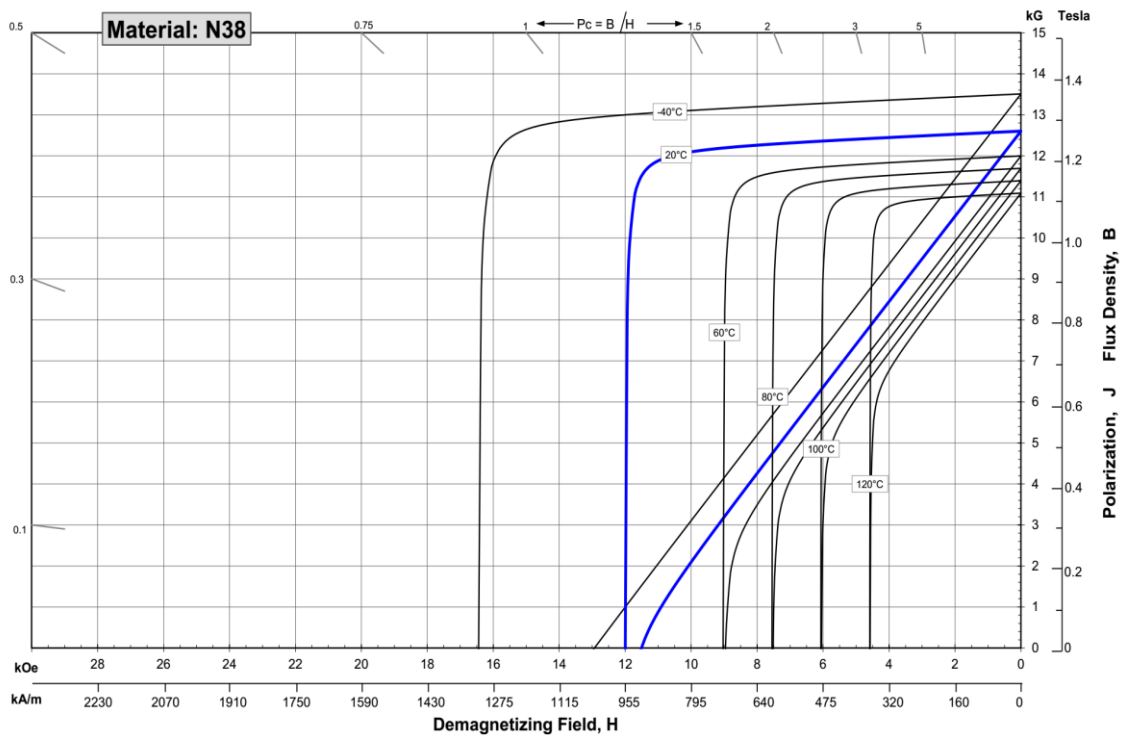
Tổng kết giá trị điểm làm việc mô phỏng thấp nhất trong các thanh NCVC tương ứng với chiều rộng như bảng 3.6 bên dưới:

Bảng 3.6. Điểm làm việc nhỏ nhất trong quá trình khởi động của các thanh NCVC

w_M (mm)	B_{min} (Tesla) NCVC số 1	B_{min} (Tesla) NCVC số 2	B_{min} (Tesla) NCVC số 3
29	0,329	0,281	0,420
30	0,335	0,278	0,377
31	0,368	0,249	0,317
32	0,220	0,181	0,277
33	0,205	0,101	0,184
34	0,008	0,014	0,043
35	0,004	0,002	0,009

Kết quả trong Bảng 3.6 cho thấy khi chiều rộng nam châm w_M tăng từ 29 mm lên 35 mm thì điểm làm việc cực tiểu B_{min} của các thanh NCVC giảm rõ rệt. Ở miền $w_M = 29 \div 33$ mm, các giá trị B_{min} vẫn còn tương đối lớn; tuy nhiên, khi $w_M \geq 34$ mm thì B_{min} của cả ba thanh NCVC suy giảm đột ngột, lần lượt đạt 0,008 T; 0,014 T; 0,043 T tại $w_M = 34$ mm và 0,004 T; 0,002 T; 0,009 T tại $w_M = 35$ mm. Điều này cho thấy khi tăng w_M , mặc dù từ thông kích từ và sức điện động ngược có xu hướng tăng, nhưng điểm làm việc của nam châm lại dịch chuyển về gần vùng gối của đường cong khử từ, làm gia tăng nguy cơ khử từ không phục hồi.

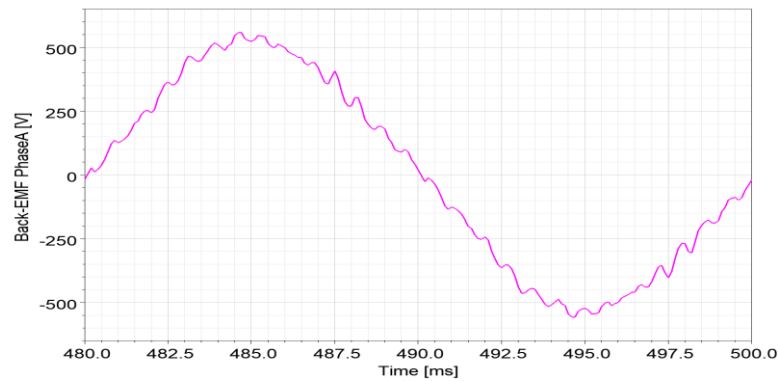
Vật liệu cũng là yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến khử từ không phục hồi của NCVC. Trong quá trình mô phỏng tác giả sử dụng vật liệu NCVC là NdFeB-N38 của Arnold Magnetic Technologies ở nhiệt độ 20°C. Đặc tính của NdFeB-N38 như hình 3.24 bên dưới [30].



Hình 3.24. Đường cong khử từ của vật liệu NdFeB-N38 của Arnold Magnetic Technologies [30]

Đối chiếu với đặc tính khử từ của vật liệu NdFeB-N38 trong Hình 3.24 cho thấy, ở nhiệt độ 20°C, điểm gồi của đường cong khử từ xấp xỉ $B_{knee} \approx 0,05T$. Như vậy, đối với các trường hợp $w_M \geq 34$ mm, các giá trị B_{min} của các thanh NCVC đều đã nhỏ hơn hoặc tiệm cận thấp hơn ngưỡng này, do đó nam châm đã đi vào vùng có nguy cơ khử từ không phục hồi. Khi nhiệt độ làm việc của rôto tăng lên khoảng 60°C, điểm gồi tăng lên xấp xỉ $B_{knee} \approx 0,3T$, khi đó miền làm việc an toàn của nam châm tiếp tục thu hẹp; trong trường hợp này, ngay cả một số cấu hình có $w_M \geq 31$ mm cũng xuất hiện ít nhất một thanh NCVC có $B_{min} < 0,3T$. Kết quả này cho thấy nhiệt độ làm việc có ảnh hưởng rất lớn đến khả năng chống khử từ của nam châm, và việc lựa chọn w_M không thể chỉ dựa trên yêu cầu tăng từ thông mà phải đồng thời thỏa mãn điều kiện an toàn khử từ.

Kết quả mô phỏng dạng sóng sức điện động ngược ở chế độ vận hành xác lập của Ex-LSPMSM như hình 3.25 bên dưới.



Hình 3.25. Dạng sóng B-EMF của Ex-LSPMSM 15 kW, $2p=2$ với $w_M = 35$ mm

Tính toán biên độ của dạng sóng sức điện động ngược của Ex-LSPMSM như bảng 3.7 bên dưới.

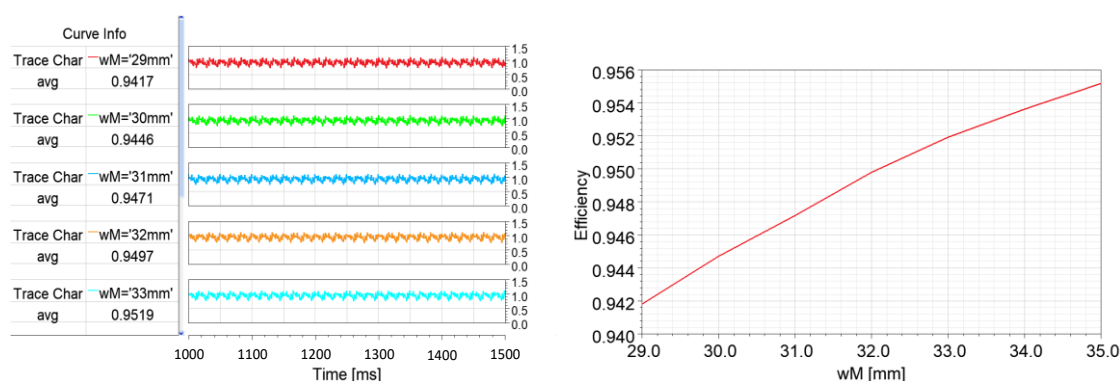
Bảng 3.7. Biên độ sức điện động ngược không tải của Ex-LSPMSM 15 kW.

w_M (mm)	Biên độ B-EMF định mức (V)	Biên độ B-EMF theo mô phỏng FEM (V)	Sai số (%)
29	380	346.8	8.7
30	380	349.1	8.1
31	380	354.4	6.7
32	380	360.2	5.8
33	380	365.5	3.8
34	380	371.3	2.3
35	380	375.5	1.2

Bảng 3.7 trình bày kết quả so sánh biên độ dạng sóng sức điện động ngược B-EMF của động cơ Ex-LSPMSM 15 kW khi thay đổi bề rộng nam châm w_M . Kết quả cho thấy khi w_M tăng từ 29 mm lên 35 mm, thì kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn tăng từ 346,8 V lên 375,5 V. Sai số so với giá trị định mức trong khoảng từ 1,2% đến 8,7%, trong đó sai số lớn nhất xuất hiện tại $w_M = 29$ mm và giảm dần khi bề rộng nam châm tăng.

Để đảm bảo nguồn từ cho Ex-LSPMSM làm việc thì lựa chọn bề rộng của NCVC để sai số của EMF nhỏ hơn 5%, khi đó chiều rộng tương ứng $w_M \geq 33$ mm.

Với kích bản mô phỏng w_M thay đổi từ 29 ÷ 35 mm bước 1 mm, kết quả mô phỏng hiệu suất làm việc của Ex-LSPMSM ở trạng thái xác lập như hình 3.26 bên dưới



Hình 3.26. Đặc tính hiệu suất ở trạng thái vận hành xác lập của Ex-LSPMSM;
a) Đặc tính hiệu suất theo thời gian, b) Giá trị trung bình của hiệu suất so với w_M

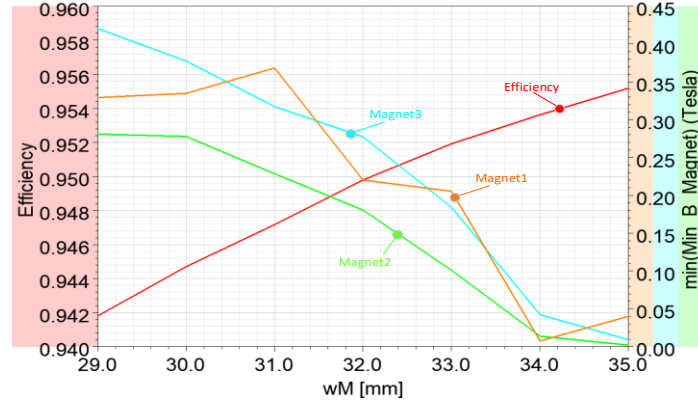
Tổng hợp hiệu suất làm việc của Ex-LSPMSM ở chế độ vận hành xác lập đối với các bề rộng NCVC khác nhau như bảng 3.8 bên dưới

Bảng 3.8. Hiệu suất làm việc của Ex-LSPMSM ở trạng thái vận hành xác lập

w_M (mm)	Hiệu suất η
29	0.9417
30	0.9446
31	0.9471
32	0.9497
33	0.9519
34	0.9536
35	0.9551

Kết quả mô phỏng về hiệu suất với các w_M khác nhau như ở hình 3.26 và bảng 3.8 cho thấy w_M càng tăng thì hiệu suất càng tăng. Nguyên nhân khi w_M tăng thì giá trị B-EMF sẽ tăng, động cơ làm việc đủ kích từ, hệ số công suất tăng, dòng làm việc thấp hơn, nên tổn hao thấp dẫn đến hiệu suất động cơ tăng lên. Bên cạnh đó, căn cứ vào tiêu chuẩn IEC/EN 60034-30-1:2014 cho động cơ xoay chiều tần số 50 Hz, động cơ 2 cực, với các giá trị hiệu suất đạt được khi mô phỏng đều được xếp lớp IE4 (93.3%)

Với các giá trị w_M biến đổi từ 29÷35 mm, tổng hợp đồ thị giữa hiệu suất, điểm làm việc nhỏ nhất các thanh NCVC của Ex-LSPMSM theo bề rộng mô phỏng như hình 3.27 bên dưới



Hình 3.27. Hiệu suất và điểm làm việc nhỏ nhất theo sự thay đổi của w_M

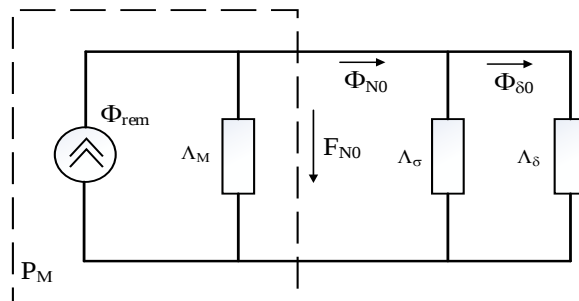
Ta nhận thấy, để đảm bảo mức hiệu suất IE4 ($\geq 93.3\%$) thì có thể nói tất cả các w_M khác nhau trong giới hạn xét đều đạt yêu cầu. Mặt khác với Ex-LSPMSM 15 kW thực nghiệm, lựa chọn w_M càng lớn thì hiệu suất càng tăng.

Như vậy, sự phân tích ở trên cho thấy rằng để đảm bảo thông số làm việc và tránh nguy cơ khử từ có thể xảy ra trong quá trình khởi động, có thể lựa chọn kích thước NCVC với chiều dày 9 mm và chiều rộng 33 mm khi bội số dòng khởi động cao hoặc chiều rộng 34 mm khi bội số dòng khởi động nhỏ (đường đặc tính tải không bị suy giảm về phía trái góc I/4), khi đó vẫn đảm bảo hiệu suất động cơ ở giá trị 95,19 %, hoặc 95,36%.

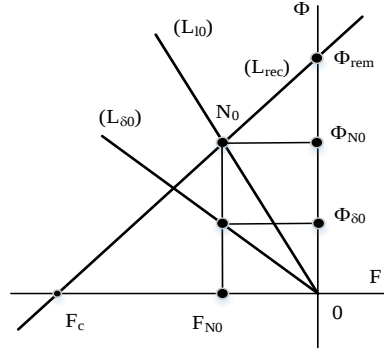
3.3. Phân tích kiểm tra lựa chọn loại NCVC

3.3.1. Mật độ từ thông do NCVC sinh ra trong khe hở không khí

Sơ đồ mạch điện tương đương cho động cơ Ex-LSPMSM $2p = 2$ ở chế độ không tải được đưa ra trên Hình 3.28 và đặc tính làm việc của nam châm vĩnh cửu trên Hình 3.29 [45].



Hình 3.28. Sơ đồ mạch từ thay thế của Ex-LSPMSM ở chế độ không tải [45]



Hình 3.29. Đặc tính làm việc của nam châm vĩnh cửu [45]

Trong đó: (L_{rec}) - đường đặc tính khử từ của NCVC; (L_{10}) - đường đặc tính tải ở chế độ không tải; $(L_{\delta 0})$ - Đặc tính khi động cơ mang tải

Phương trình của các đường L_{rec} và L_{10} được viết như sau:

$$\Phi = \Phi_{rem} + \Lambda_M \cdot F \quad (3.35)$$

$$\Phi = -\Lambda_t \cdot F \quad (3.36)$$

Như vậy điểm làm việc của NCVC N_0 (Φ_{N0} , F_{N0}) được xác định:

$$\Phi_{N0} = \Phi_{rem} \frac{\Lambda_t}{\Lambda_t + \Lambda_M} \quad (3.37)$$

$$F_{N0} = \frac{\Phi_{rem}}{\Lambda_t + \Lambda_M} \quad (3.38)$$

Từ dẫn mạch từ ở chế độ không tải được xác định:

$$\Lambda_t = \Lambda_\delta + \Lambda_\sigma = k_{\sigma M} \cdot \Lambda_\delta \quad (3.39)$$

Trong đó: Λ_δ là từ dẫn của khe hở không khí, nó là từ dẫn hữu ích, tương ứng với từ thông hữu ích chạy khép kín từ rôto qua khe hở không khí sang stato. Λ_σ là thành phần từ dẫn tản, tương ứng với từ thông khép kín của mỗi thanh nam châm vĩnh cửu hay từ thông tản qua rãnh stato, rôto, vật liệu không dẫn từ, khe hở không khí giữa nam châm và lá thép.

Độ từ dẫn của NCVC được xác định

$$\Lambda_M = \frac{\mu_0 \mu_{rec} S_M}{h_m} \quad (3.40)$$

Trong đó, S_M , là tiết diện cắt ngang của nam châm vĩnh cửu

Như vậy, từ thông của khe hở không khí được xác định

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_M / k_{\sigma M} + \Lambda_\delta} \Phi_{rem} \quad (3.41)$$

Trong đó, hệ số từ thông tản $k_{\sigma M}$ được xác định

$$k_{\sigma M} = 1 + \frac{4h_m}{\pi\mu_{rec}\alpha_p\tau_p} \ln\left[1 + \frac{\pi\delta}{(1-\alpha_p)\tau_p}\right] \quad (3.42)$$

Lúc đó, từ dẫn khe hở không khí Λ_δ được xác định

$$\Lambda_\delta = (\alpha_p\tau_p L_{Fe}\mu_0)/(\delta k_C) \quad (3.43)$$

Trong đó: τ_p : Bước cực từ, δ : Khe hở không khí, k_C : Hệ số điều chỉnh khe hở không khí, $k_C = k_{Cs}.k_{Cr}$ được xác định khi có mặt rãnh stato và rôto.

$$k_{Cs} = \tau_{ss}/(\tau_{ss} - \gamma_s\delta) \quad (3.45)$$

$$\gamma_s = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{0s}}{2\delta} \arctg \frac{b_{0s}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{0s}}{2\delta}\right)^2} \right] \quad (3.46)$$

Tương tự xác định cho hệ số k_{Cr} . Như vậy, từ công thức (3.40) nếu bỏ qua bão hòa mạch từ, từ thông khe hở không khí ở chế độ không tải được xác định:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{\Phi_{rem}}{k_{\sigma M} + \mu_{rec} k_C \frac{C_\Phi}{C_p}} \quad (3.47)$$

Trong đó: $C_\Phi = \frac{2\alpha_p}{1+\alpha_p} \quad (3.48)$

$$C_p = \mu_{rec} \frac{\Lambda_\delta + \Lambda_r}{\Lambda_M} \quad (3.49)$$

Từ phương trình (3.47) có thể tính toán được mật độ từ thông khe hở không khí B_{0r} ở chế độ không tải

$$B_{0r} = \frac{B_{rem}}{k_{\sigma M} + \mu_{rec} k_C \frac{C_\Phi}{C_p}} \quad (3.50)$$

B-EMF được xác định

$$E_0 = 4.44fwk_w \frac{\Phi_{rem}}{k_{\sigma M} + \mu_{rec} k_C \frac{C_\Phi}{C_p}} = 4.44fwk_w \frac{1}{k_{\sigma M} + \mu_{rec} k_C \frac{C_\Phi}{C_p}} \cdot \frac{D.l_{Fe}}{p} \cdot B_{rem} \quad (3.51)$$

Từ công thức (3.51) cho thấy, B-EMF phụ thuộc vào mật độ từ dư của NCVC. Mọi quan hệ giữa B_r và E_0 là quan hệ tuyến tính, khi B_r tăng thì E_0 tăng và ngược lại. Bên cạnh đó, cũng có thể thấy rằng giá trị B-EMF còn phụ thuộc vào hệ số cực từ α_p , nghĩa là phụ thuộc vào chiều dài của NCVC trong mạch từ.

3.3.2. Phân tích lựa chọn loại NCVC

Các thông số đặc trưng của nam châm vĩnh cửu, bao gồm lực kháng từ, từ dư, tích năng lượng, nhiệt độ Curie và mật độ từ thông hữu hiệu, được liệt kê trong Bảng 3.9 [86].

Bảng 3.9. Các thông số đặc trưng của nam châm vĩnh cửu

Loại NCVC	B_r (T)	H_{cB} (kA/m)	H_{cJ} (kA/m)	BH_{max} (kJ/m ³)
N35	1,170	876	1,590	263
N38	1,220	907	1,590	286
N40	1,220	939	1,590	302
N42	1,280	987	1,590	318

Trong đó: B_r - Mật độ từ thông dư; H_{cB} - Cường độ từ trường kháng từ cực tiểu; H_{cJ} - Cường độ từ trường kháng từ cực đại; BH_{max} - Tích năng lượng cực đại

Việc lựa chọn nam châm vĩnh cửu NdFeB phải tránh hiện tượng khử từ [44]. Việc tính toán kích thước nam châm NdFeB trong thiết kế động cơ Ex-LSPMSM thường được thực hiện theo các bước sau [10]:

Bước 1. Sơ bộ lựa chọn loại nam châm vĩnh cửu dùng cho thiết kế động cơ nhằm xác định các tham số ban đầu (B_r , H_{cB} , H_{cJ} , BH_{max}).

Bước 2. Tính toán sơ bộ bề rộng cực đại của nam châm W_{max} :

$$W_{max} = \sqrt{2}R_{1max} \quad (3.52)$$

Bước 3. Tính toán thể tích tối thiểu của nam châm vĩnh cửu:

$$V_m = \frac{2.k_{ocf}.k_{fd}.(1+k_{EC}).P_n}{\pi^2.\xi.2.p.f.B_r.H_c} \quad (3.53)$$

Bước 4. Tính toán chiều dày tối thiểu của nam châm vĩnh cửu L_m :

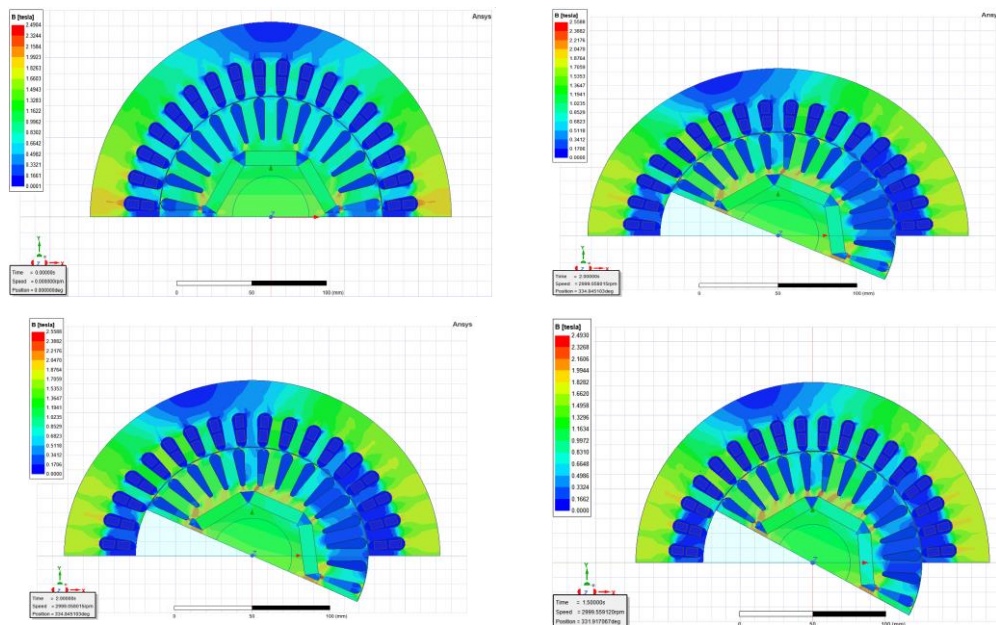
$$L_m = \frac{V_m}{H_m.W_m} \quad (3.54)$$

Trong đó, R_{1max} - Khoảng cách từ tâm đến đáy rãnh rôto; k_{ocf} - Hệ số quá tải; k_{fd} - Hệ số dạng từ hóa; k_{EC} - Hệ số sức điện động (0,6 ÷ 0,95); P_n - Công suất định mức; ξ - Hệ số sử dụng nam châm (0,3 ÷ 0,7); B_r - Mật độ từ thông dư; H_c - Cường độ từ trường kháng từ cực đại; H_m - Chiều dài nam châm vĩnh cửu.

Các công thức (3.52), (3.53) và (3.54) phụ thuộc vào nhiều hệ số (k_{fd} , k_{EC} , k_{ocf} , ξ ...), Các hệ số này có dải biến thiên lớn, và việc lựa chọn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm. Chính các yếu tố này khiến cho việc lựa chọn sơ bộ nam châm NdFeB ở Bước 1 có thể thiếu chính xác, từ đó ảnh hưởng đáng kể đến các tham số làm việc của động cơ Ex-LSPMSM.

Nghiên cứu Ex-LSPMSM được thiết kế trên nguyên mẫu Ex-IM với công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút và điện áp danh định 380/660V. Lựa chọn sơ bộ NCVC ban đầu NdFeB loại N38, cấu trúc NCVC trong rôto động cơ sử dụng loại kết cấu 3 thanh, sử dụng các công thức (3.52), (3.53) và (3.54) để xác định kích thước sơ bộ của NCVC N38 cần sử dụng là: W.L = 9x34 (mm). Các thông số cấu trúc của Ex-LSPMSM được mô hình hóa trên phần mềm Ansys/Maxwell phân tích so sánh các đặc tính khởi động, đặc tính mômen xoắn, đặc tính dòng điện cũng như sức điện động không tải, hiệu suất của Ex-LSPMSM sử dụng NCVC (N35, N38, N40, N42).

Phân bố từ trường trong Ex-LSPMSM ở Hình 3.30.



Hình 3.30. Phân bố từ trường trong động cơ.

Kết quả nghiên cứu có thể tính toán các thông số: Từ trường lớn nhất trong mạch từ (B_{max}), hiệu suất (η) và hệ số công suất ($\cos\varphi$) được trình bày ở bảng 3.10.

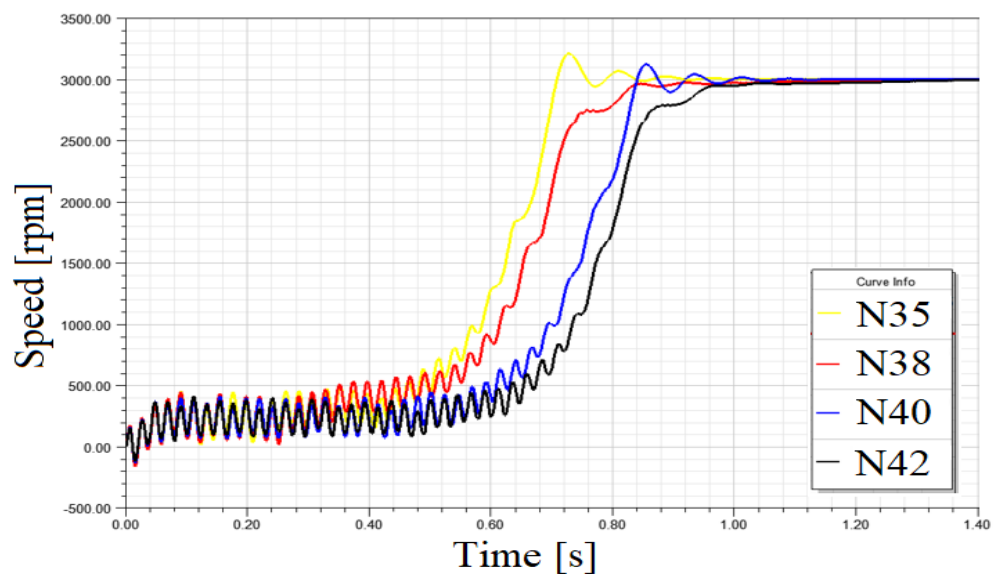
Bảng 3.10. Giá trị hiệu suất và hệ số công suất của động cơ.

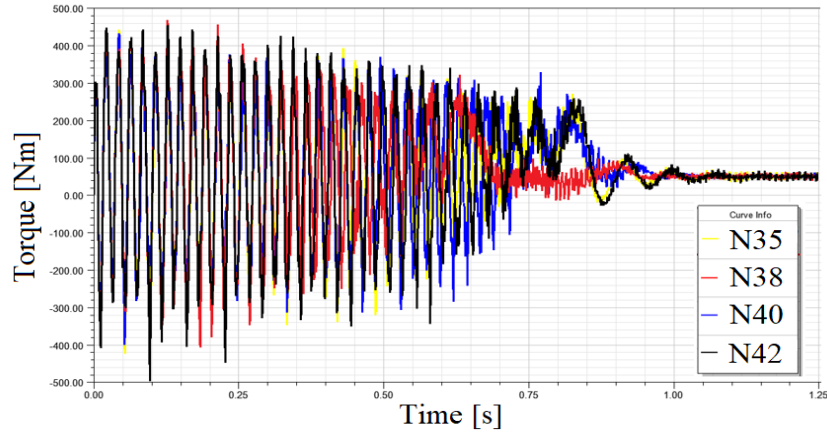
Loại	$B_{max}(T)$	η (%)	$\cos\varphi$
N35	1,8	95,7	0,956
N38	1,9	96,31	0,961
N40	2,05	96,6	0,967
N42	2,2	95,6	0,953

Từ Hình 3.30 và Bảng 3.10 có thể thấy rằng khi sử dụng nam châm N38, mật độ từ trường trong mạch từ chưa đạt đến trạng thái bão hòa (vật liệu thép 1008 cho phép đến 2,1T), khi sử dụng nam châm N42 mạch từ làm việc trong trạng thái bão hòa với mật độ từ thông khoảng (2,2T), đối với nam châm N35, mật độ từ trường trong mạch đạt 1,8T chưa đạt ngưỡng bão hòa, khi sử dụng nam châm N40 mật độ từ trường đạt giá trị 2,05T, khi đó hiệu suất của động cơ đạt (96,6%), cùng với hệ số công suất (0,967), cao hơn so với trường hợp sử dụng NCVC N38. Việc sử dụng nam châm có khả năng chịu nhiệt độ cao làm cho từ trường của nam châm không bị suy giảm dẫn tới hiệu suất của Ex-LSPMSM tăng lên so với loại thường.

* Đặc tính khởi động và mômen của Ex-LSPMSM

Đặc tính khởi động và đặc điểm mômen của Ex-LSPMSM trong Hình 3.31.





Hình 3.31. Đặc tính khởi động và mômen của Ex-LSPMSM.

Kết quả mô phỏng cho phép phân tích các thông số khởi động của động cơ bao gồm: thời gian đạt tốc độ đồng bộ (t_s), thời gian quá độ (t_{trans}), tốc độ (ω), mômen cực đại (M_{max}) và độ gợn mômen ($RipT$). Độ gợn mômen của Ex-LSPMSM trong một chu kỳ được tính toán [50]:

$$RipT = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_e} \quad (3.55)$$

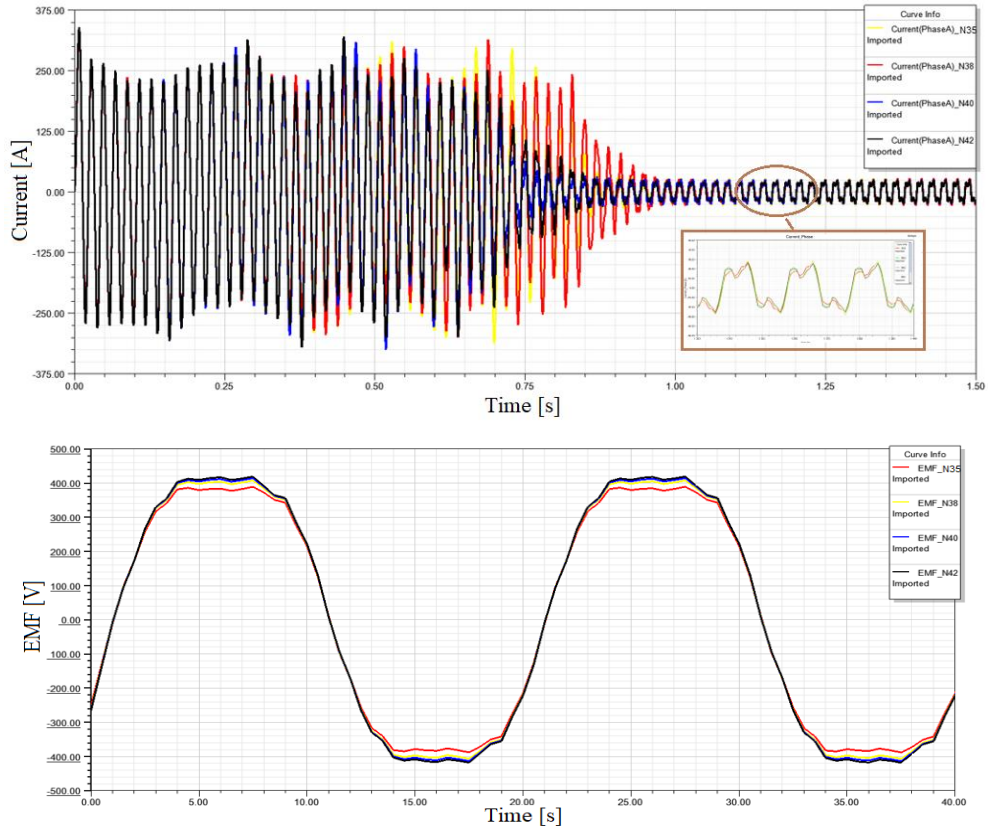
Trong đó, T_{max} – giá trị mômen cực đại; T_{min} – giá trị mômen cực tiểu; T_e – giá trị mômen trung bình của động cơ điện, M_m ; R_{ipT} – độ gợn sóng mômen, %.

Bảng 3.11. Đặc tính mômen của Ex-LSPMSM.

Loại	t_s (s)	t_{trans} (s)	$RipT$ (%)	M_{max} (Nm)
N35	0.71	1.12	26.1	420
N38	1.14	1.14	23.6	415
N40	0.84	1.12	26.3	435
N42	1.33	1.33	29.8	428

Từ kết quả ở Hình 3.31 và Bảng 3.11, có thể thấy rằng: Thời gian đồng bộ nhỏ nhất ($t_s = 0,71$ s) là khi sử dụng NCVC N35, thời gian đồng bộ lớn nhất là khi sử dụng NCVC N42 ($t_s = 1,33$ s); thời gian quá độ nhỏ nhất ($t_{trans} = 1,12$ s) khi sử dụng NCVC N35 và NCVC N40; thời gian quá độ lớn nhất ($t_{trans} = 1,33$ s) khi sử dụng NCVC N42. Trong trường hợp sử dụng NCVC N35, độ gợn mômen đạt 26,1%; nhỏ nhất là 23,6% khi sử dụng nam châm vĩnh cửu N38, và lớn nhất là 29,8% khi sử dụng nam châm N42.

Đặc tính dòng điện và sức điện động không tải (E) trong Hình 3.32.



Hình 3.32. Đặc tính dòng điện và đặc tính sức điện động ngược (B-EMF) của Ex-LSPMSM.

Tổng méo sóng hài (THD) của dòng điện và giá trị sức điện động không tải (E) cũng thay đổi tùy theo từng trường hợp sử dụng các loại nam châm vĩnh cửu khác nhau. Công thức sau được sử dụng để tính toán:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots}}{I_1} \quad (3.56)$$

$$\Delta E\% = \frac{E_{1NB} - 380}{E_{1NB}} 100\% \quad (3.57)$$

Trong đó, E_{1NB} là giá trị hiệu dụng của thành phần hài bậc nhất của sức điện động không tải.

Bảng 3.12. Kết quả tính toán đặc tính dòng điện và sức điện động ngược.

Loại	t_{trans} (s)	I_{max} (A)	THD_i (%)	E_{1NB} (V)	ΔE (%)
N35	0,90	308	17,8	389	+2,3
N38	0,95	314	16,1	400	+5,2
N40	0,80	312	14,3	410	+7,1
N42	0,85	337	17,6	420	+10,5

Kết quả nghiên cứu từ Hình 3.32 và Bảng 3.12 cho thấy thời gian quá độ của dòng điện (t_{trans}) nhỏ nhất khi sử dụng nam châm vĩnh cửu loại N38, N40 ($t_{\text{trans}} = 0,8$ s), tiếp theo là N42 ($t_{\text{trans}} = 0,85$ s), N35 ($t_{\text{trans}} = 0,9$ s). Dòng điện khởi động cực đại nhỏ nhất đạt được khi sử dụng N35 ($I_{\text{max}} = 308$ A), tiếp theo là N40 ($I_{\text{max}} = 312$ A), N38 ($I_{\text{max}} = 314$ A) và lớn nhất là N42 ($I_{\text{max}} = 337$ A). Chỉ số độ méo hài dòng điện (THDi) nhỏ nhất tương ứng với loại N40, tiếp theo là N38, N42 và lớn nhất là N35. Đối với sức điện động không tải, giá trị lớn nhất đạt được khi sử dụng N42 ($E_{\text{NB}} = 420$ V), tiếp theo là N40, N38 và nhỏ nhất là N35.

Các kết quả đưa ra trong bảng 3.11 và bảng 3.12 cho thấy khi sử dụng nam châm N38, N40 cho các kết quả khá tương đồng, chênh lệch nhau không lớn. Nếu sử dụng N40 cho các chỉ số hiệu suất cao (sai lệch với N38 là $\Delta\eta = 0,29\%$). Thời gian vào đồng bộ nhanh (sai lệch với N38 là $\Delta t_s = 0,3$ s). Thời gian quá độ thấp (sai lệch với N38 là $\Delta t_{\text{trans}} = 0,025$ s). Trong khi đó với N38 thì cho độ gọn mômen thấp (sai lệch với N40 là $\Delta \text{RipT} = 2,7\%$) sai số so với sức điện động ngược thấp. Ngoài ra, với nam châm N40 thì mật độ từ thông trong mạch từ $B_{\text{max}} = 2,05$ T, điều này sẽ gây ra một số điểm bão hòa trong mạch từ (hình 3.30). Đồng thời với đó là giá thành của nam châm N40 cao hơn giá thành của nam châm N38. Do vậy, trong luận án dùng nam châm N38 là phù hợp cho động cơ Ex-LSPMSM 160 mm.

3.4. Kết luận

Chương 3 đã trình bày một cách hệ thống và toàn diện ảnh hưởng khử từ đến hoạt động của động cơ phòng nổ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (Ex-LSPMSM). Kết hợp phân tích lý thuyết, mô phỏng phần tử hữu hạn và đánh giá số liệu để xác định ảnh hưởng của tham số hình học nam châm lên trạng thái từ hóa và khả năng đồng bộ của động cơ. Các kết quả thu được đóng vai trò quan trọng trong việc định hướng tối ưu hóa rôto và nâng cao độ tin cậy vận hành của Ex-LSPMSM.

Trước hết, Chương 3 đã phân tích đặc tính khử từ của vật liệu nam châm NdFeB-N38 thông qua đường cong khử từ BH và JH, làm rõ vai trò của điểm uốn trong việc xác định vùng làm việc an toàn. Tại 20°C , điểm knee của vật liệu ở mức

khoảng 0,05 T, trong khi ở 60°C tăng lên xấp xỉ 0,3 T, cho thấy nhiệt độ làm việc của rôto là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng giữ từ của nam châm.

Đồng thời với đó, dòng điện khởi động cũng ảnh hưởng lớn đến vấn đề khử từ của NCVC. Trong chương 3 đã phân tích được khả năng khử từ mất đối xứng khi khởi động Ex-LSPMSM cũng như ảnh hưởng của hiện tượng khử từ đối xứng đến quá trình vận hành của động cơ. Từ đó xác định điều kiện giới hạn chiều dày, chiều rộng để tránh hiện tượng khử từ. Kết quả mô phỏng trường điện từ cho thấy chiều rộng nam châm w_M ảnh hưởng đáng kể đến phân bố từ thông trong khe hở không khí và khả năng xảy ra khử từ.

Từ kết quả phân tích lý thuyết và chứng minh trên kết quả mô phỏng đã lựa chọn được thông số phù hợp của NCVC. Trong đó, để tránh hiện tượng khử từ xảy ra thì chiều dày của NCVC lựa chọn là $l_M = 9$ mm. Để đảm bảo được nguồn kích từ do NCVC tạo ra thì lựa chọn được bề rộng NCVC là $w_M = 33$ mm với trường hợp bội số dòng khởi động lớn hoặc 34 mm với bội số dòng khởi động nhỏ và chủng loại NCVC lựa chọn N38 là phù hợp trong chế tạo Ex-LSPMSM.

CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Chế tạo, lắp ráp động cơ Ex-LSPMSM

Trong nghiên cứu này, cấu trúc rôto của động cơ Ex-LSPMSM được chế tạo dựa trên kết quả của Chương 2 và Chương 3 với quá trình chế tạo rôto được thực hiện theo các bước:

- Gia công lõi thép rôto: Lõi rôto được dập từ vật liệu tôn silic kỹ thuật điện, có đặc tính tổn hao thấp và độ thấm từ cao, nhằm đảm bảo giảm tổn hao sắt và nâng cao hiệu suất. Các lá thép được ép chặt, đảm bảo độ chính xác hình học và hạn chế sai lệch khe hở không khí so với thiết kế.

- Gia công rãnh chứa nam châm: Rãnh rôto được gia công bằng máy cắt dây CNC để đảm bảo độ chính xác về kích thước, vị trí và góc đặt nam châm. Sai số gia công được kiểm soát trong phạm vi $\pm 0,01$ mm nhằm đảm bảo độ đồng đều phân bố từ trường khi lắp nam châm.

- Lắp đặt nam châm vĩnh cửu NdFeB-N38: Nam châm được xử lý bề mặt bằng lớp phủ Ni-Cu-Ni để chống oxy hóa và ăn mòn. Quá trình lắp đặt sử dụng keo chuyên dụng có tác dụng cố định cơ học.

- Cân bằng động rôto: Sau khi lắp nam châm vĩnh cửu, rôto được cân bằng động theo tiêu chuẩn ISO 1940/1 G2.5, nhằm đảm bảo độ ổn định cơ học trong quá trình vận hành ở tốc độ định mức 3.000 vòng/phút.



Hình 4.1. Kết cấu rôto sau khi chế tạo

- Lắp ghép với stato: Rôto hoàn thiện được lắp với stato đã quấn dây quấn ba pha. Khe hở không khí được kiểm tra lại để đảm bảo giá trị thiết kế. Công đoạn này

đặc biệt quan trọng, vì khe hở không khí ảnh hưởng trực tiếp đến từ thông liên kết và mômen khởi động của động cơ.

Toàn bộ quá trình chế tạo được thực hiện trong điều kiện kiểm soát chất lượng chặt chẽ, đảm bảo sai số giữa mô hình mô phỏng và mẫu thực nghiệm nhỏ nhất có thể. Việc chế tạo rôto và lắp đặt động cơ hoàn chỉnh không chỉ là bước chuyển tiếp từ mô phỏng sang thực nghiệm, mà còn đóng vai trò then chốt trong việc kiểm chứng tính chính xác và khả năng ứng dụng của mô hình lý thuyết đã xây dựng.

4.2. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm được xây dựng tại Bộ môn Điện khí hóa, Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Do điều kiện cơ sở vật chất và trang thiết bị hiện có còn hạn chế, mô hình thực nghiệm trong nghiên cứu này chủ yếu được sử dụng để đánh giá một số đặc tính vận hành cơ bản của động cơ, như dạng sóng dòng điện, sức điện động không tải và hiệu suất. Động cơ Ex-LSPMSM thực nghiệm được ghép nối cơ khí với máy phát điện đồng bộ ba pha; đầu ra của máy phát được nối với tải gồm bóng đèn và điện trở.

Dòng điện được đo bằng biến dòng đo lường có tỷ số biến dòng 400/5 A. Việc lựa chọn CT 400/5 A nhằm bảo đảm phù hợp với miền dòng điện khởi động của động cơ thu được từ mô phỏng, trong đó dòng điện cực đại đạt khoảng 312-314 A. Với tỷ số biến dòng này, các giá trị dòng điện nêu trên tương ứng với dòng điện thứ cấp khoảng 3,90 A đến 3,93 A, nhỏ hơn dòng thứ cấp định mức 5 A của thiết bị đo. Do đó, CT 400/5 A đáp ứng được yêu cầu đo đặc dòng điện khởi động của động cơ trong nghiên cứu này, đồng thời bảo đảm việc ghi nhận tín hiệu dòng điện trong cả giai đoạn quá độ và chế độ làm việc xác lập.

Đo lường tín hiệu điện áp sử dụng máy biến áp cách ly NDK – 50AIEC (415/380/220/110/48/24/12V). Tín hiệu của máy biến áp và máy biến dòng được đưa vào máy hiện sóng (Oscilloscope), mô hình thí nghiệm được thể hiện trên hình 4.2. Trên cơ sở hệ đo này, các kết quả thực nghiệm trong chương được sử dụng để đánh giá định lượng đặc tính dòng điện, mức độ méo hài và sức điện động không tải của động cơ, đồng thời đối chiếu với kết quả mô phỏng nhằm kiểm chứng tính hợp lý của mô hình nghiên cứu. Các thiết bị chính trong mô hình thí nghiệm bao gồm:

* Động cơ Ex-LSPMSM: Thông số động cơ chế tạo từ động cơ nguyên mẫu Ex-IM 15 kW, điện áp 380/660 V, $2p = 2$, loại có thông số cơ bản trong bảng 4.1:

Bảng 4.1. Thông số động cơ

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Đường kính ngoài stato	D_n	245	mm	
Đường kính trong stato	D'	152	mm	
Đường kính ngoài rôto	D	151	mm	
Đường kính trục rôto	D_t	52	mm	
Vật liệu thép stato	Steel 1008			
Số rãnh stato	Z_1	36	rãnh	
Số rãnh rôto	Z_2	28	rãnh	
Chiều dài khe hở không khí	g	0,5	mm	
Điện áp nguồn cấp	U_{dm}	380/660	V	
Tần số nguồn cấp	f	50	Hz	

Rôto động cơ được cải hoán để thành Ex-LSPMSM sử dụng loại nam châm N38, có kích thước 35 x 34 x 9 mm (do phụ tải trong phòng thí nghiệm được tăng dần nên bội số dòng khởi động nhỏ).

* Động cơ máy phát loại máy phát tốc độ 3.000 vòng/phút, thông số cơ bản của máy phát trong bảng 4.2:

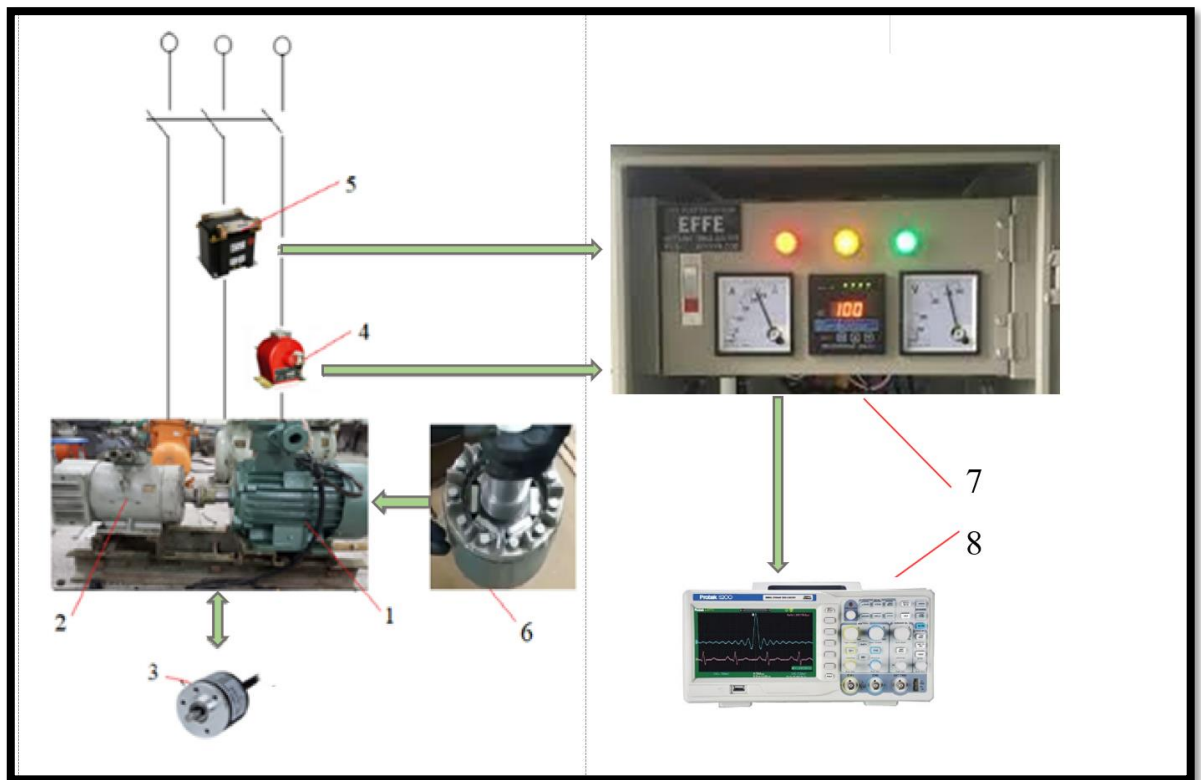
Bảng 4.2. Thông số của máy phát điện

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Công suất	P	15	kW	$S=18,75\text{kVA}$
Tốc độ vòng quay	N	3000	vòng/phút	(2 cực)
Điện áp	U	380	V	
Tần số	F	50	Hz	
Hệ số công suất	$\cos\varphi$	0,8		
Hệ thống làm mát				Quạt gió
Cấp bảo vệ/Cách điện				IP55

Máy phát được cấp đầu ra cho các tải bao gồm điện trở và bóng đèn.

Cấu trúc mô hình thí nghiệm được minh họa ở Hình 4.2, bao gồm các thành phần chính:

- 1 – Động cơ Ex-LSPMSM;
- 2 – Máy phát điện;
- 3 – Đầu đo tốc độ;
- 4 – Biến dòng CT;
- 5 – Máy biến áp;
- 6 – Kết cấu rôto đã chế tạo;
- 7 – Tủ đo lường U, I, $\cos\varphi$;
- 8 – Máy hiện sóng





Hình 4.2. Mô hình thử nghiệm trong phòng thí nghiệm

4.3. Kết quả thực nghiệm

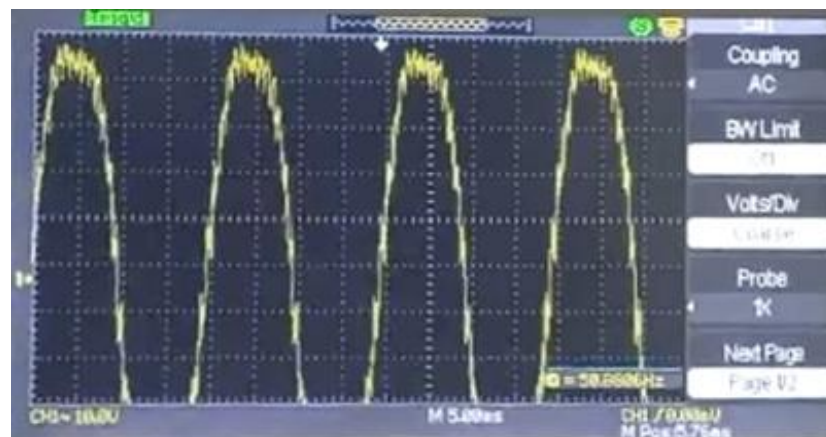
Kết quả khảo sát đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM trên máy hiện sóng với mô hình thử nghiệm trong phòng thí nghiệm được đưa ra ở Hình 4.3.



Hình 4.3. Đặc tính dòng điện của Ex-LSPMSM trên máy hiện sóng

Kết quả trong Hình 4.3 cho thấy đặc tính dòng điện có dạng sin, tương tự như hình dạng dòng điện thể hiện trong kết quả mô phỏng trên Hình 2.21 (Chương 2).

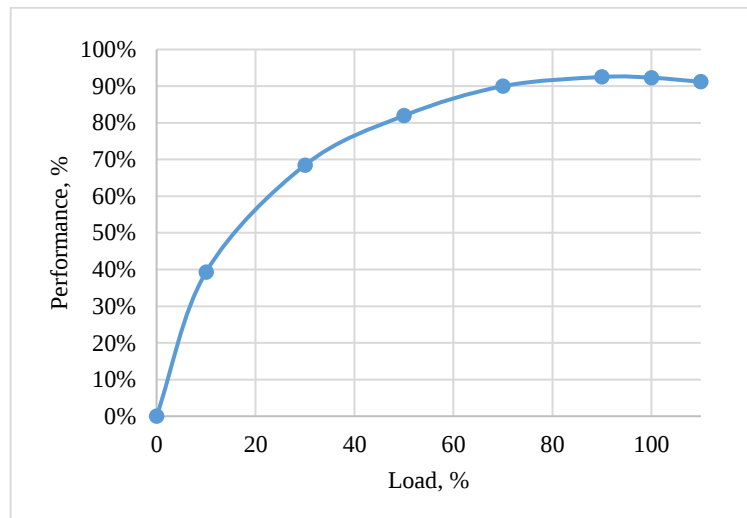
Hình 4.4 trình bày kết quả đo sức điện động của Ex-LSPMSM



Hình 4.4. Kết quả đo sức điện động của Ex-LSPMSM

Kết quả đo sức điện động (EMF) thể hiện trong hình 4.4 cho thấy đặc tính EMF có dạng hình sin hoàn toàn phù hợp với các kết quả mô phỏng trên Hình 2.23 (Chương 2)

Khi các thông số tải thay đổi từ $0 \div 110\%$ tải định mức và hiệu suất chuyển đổi của cơ cấu ghép nối cơ khí và máy phát là 82%, đặc tính hiệu suất của động cơ Ex-LSPMSM được thể hiện trong hình 4.5.



Hình 4.5. Đặc tính hiệu suất của Ex-LSPMSM

Kết quả trên Hình 4.5 cho thấy hiệu suất của động cơ đạt tối đa 92,9% ở mức tải khoảng 92% tải định mức. Khi tải động cơ vượt quá 100% tải định mức, hiệu suất động cơ có xu hướng giảm dần. Kết quả này thấp hơn mức hiệu suất thể hiện trong kết quả mô phỏng do các yếu tố sai số công nghệ trong quá trình chế tạo Ex-LSPMSM.

Kết quả đo dòng điện hình 4.3, sức điện động không tải hình 4.4 và hiệu suất hình 4.5 khi thực nghiệm được so sánh với kết quả mô phỏng trên các Hình 2.21, Hình 2.23 ở Chương 2 như trình bày trong bảng 4.3.

Bảng 4.3. Bảng so sánh kết quả dòng điện, sức điện động, hiệu suất khi thực nghiệm

STT	Giá trị		Mô phỏng	Thực nghiệm	Sai số (%)
1	Dòng điện	Biên độ (A)	26,2	25,4	3,1
2	EMF	Biên độ (V)	365,5	357,9	2,1
3	Hiệu suất	(%)	96,6	92,9	3,8

Kết quả trong bảng 4.3 cho thấy giá trị tương đồng giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm. Sai lệch giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm nằm trong khoảng 2,1%–3,8%. Kết quả này chứng tỏ phương án thiết kế và chế tạo được đề xuất là phù hợp.

4.4. Kết luận

Chương 4 đã thực hiện chế tạo và thí nghiệm động cơ Ex-LSPMSM công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút trên cơ sở phương án kết cấu rôto được lựa chọn từ các chương trước. Kết quả thực nghiệm cho thấy động cơ vận hành ổn định, dạng sóng dòng điện ở chế độ xác lập gần hình sin, sức điện động không tải có dạng gần sin và hiệu suất đạt giá trị cao ở vùng tải gần định mức.

Về mặt định lượng, kết quả thực nghiệm cho thấy đặc tính dòng điện cho giá trị biên độ dòng điện là 25,4 A giảm hơn dòng mô phỏng 26,2 A (sai khác 3,1%). Biên độ sức điện động ngược đạt 357,9 V sai khác 2,1%. Ngoài ra, dạng sóng của dòng điện và sức điện động ngược có nhiều thành phần sóng hài như mô phỏng đã chỉ ra. Thực nghiệm cũng đã chứng minh hiệu suất của động cơ đạt được 92,9% (sai khác 3,8%) so với 96,6% đạt được khi mô phỏng. Điều này là sai số do công nghệ chế tạo và quá trình đo tạo ra.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án đã nghiên cứu một cách có hệ thống động cơ Ex-LSPMSM có chiều cao tâm trục 160 mm nói chung và đối tượng cụ thể là loại 3K160M-2, hướng tới ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước trong khai thác mỏ hầm lò. Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước, luận án đã chỉ ra khoảng trống nghiên cứu đối với động cơ Ex-LSPMSM công suất trung bình, tốc độ cao, có yêu cầu vận hành tin cậy và phù hợp với điều kiện làm việc khắc nghiệt của ngành mỏ tại Việt Nam. Nội dung của luận án tập trung vào giải quyết các vấn đề:

- Luận án đã phân tích các phương án thiết kế khác nhau theo số lượng và cách bố trí NCVC dạng 2, 3 và 4 thanh cũng như kết cấu rãnh bố trí NCVC có cầu từ và không có cầu từ. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng cấu hình rôto 3 thanh NCVC không có cầu từ là phù hợp nhất với thời gian đồng bộ hóa ngắn ($t_s = 0,45$ s), độ gợn sóng mômen thấp ($RipT = 23,1\%$), tổng méo hài dòng điện nhỏ ($THDi = 14,3\%$) và hiệu suất cao ($\eta = 93,3\%$).

- Luận án đã phân tích đặc tính khử từ của NCVC và xác định điều kiện tránh khử từ đối với NCVC. Từ các phân tích kể trên, kết quả tính toán được kích thước NCVC phù hợp để chế tạo là $35 \times 34 \times 9$ mm và loại N38 được sử dụng để chế tạo Ex-LSPMSM.

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng, một động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút thực nghiệm đã được chế tạo và thử nghiệm trong phòng thí nghiệm. Kết quả thực nghiệm cho thấy các đặc tính dòng điện, điện áp và hiệu suất của động cơ phù hợp với kết quả mô phỏng, sai lệch nằm trong giới hạn cho phép. Hiệu suất cực đại của động cơ đạt khoảng 92,9% ở vùng tải gần định mức, củng cố tính hợp lý của mô hình nghiên cứu và cho thấy triển vọng ứng dụng thực tế của phương án đề xuất.

Những đóng góp mới của luận án bao gồm:

- Đề xuất kết cấu rôto với ba thanh NCVC không có cầu từ cho động cơ Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút phù hợp cho quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ.

- Sử dụng phương pháp phân tích tham số để lựa chọn hợp lý thông số của nam châm vĩnh cửu cho động cơ Ex-LSPMSM loại chiều cao tâm trục 160 mm, tốc độ 3.000 vòng/phút nhằm cải thiện đặc tính làm việc khi xét đến điều kiện khử từ.

- Chế tạo thử nghiệm thành công động cơ Ex-LSPMSM 15 kW, 3.000 vòng/phút trong phòng thí nghiệm ứng dụng cho các phụ tải quạt gió và bơm nước cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò.

2. Hạn chế và định hướng nghiên cứu

Mặc dù các kết quả của luận án đã được chứng minh thông qua cơ sở toán học, mô phỏng và thực nghiệm. Tuy nhiên, thời gian và nguồn lực nghiên cứu còn hạn chế. Kết quả nghiên cứu vẫn còn hạn chế về mặt thực nghiệm khi chưa kiểm chứng đầy đủ các thông số làm việc của Ex-LSPMSM. Ngoài ra, đối với bài toán phân tích lựa chọn thông số cần thiết phải xem xét tác động của nhiệt độ ảnh hưởng đến quá trình khử từ và chưa xét đến gam công suất lớn.

Để khắc phục các hạn chế của luận án, tác giả đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo, giải quyết các vấn đề còn tồn tại của luận án.

- Tiếp tục nghiên cứu mở rộng đối với động cơ Ex-LSPMSM có gam công suất lớn hơn, phù hợp với đặc thù khai thác mỏ.

- Triển khai các thuật toán tối ưu để có thể xem xét thêm các yếu tố ảnh hưởng của nhiệt độ, đặc điểm của tải đến việc lựa chọn kích thước hợp lý của NCVC.

- Đầu tư cơ sở vật chất để có thể tiến hành thực nghiệm các đặc tính thông số làm việc của động cơ.

- Kết hợp nghiên cứu động cơ Ex-LSPMSM với các giải pháp điều khiển để hạn chế dòng khởi động.

DANH MỤC CÁC BÀI BÁO, CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ ĐÃ CÔNG BỐ

Tiếng Việt

- [1] Đỗ Như Ý, Trịnh Biên Thùy (2022), Tối ưu hóa thiết kế động cơ điện phòng nổ hiệu suất cao ứng dụng cho quạt cục bộ trong các mỏ than hầm lò, Tạp chí Công nghiệp Mỏ, số 6, tr. 56–62.
- [2] Đỗ Như Ý, Bùi Ngọc Hùng, Trịnh Biên Thùy, Lưu Văn Uy (2023), Phân tích kinh tế – kỹ thuật sử dụng động cơ hiệu suất cao trong khai thác mỏ, Tạp chí Công Thương, số 50 (tháng 2), tr. 32–34.
- [3] Trịnh Biên Thùy, Lê Anh Tuấn, Đỗ Như Ý (2023), Ảnh hưởng của bề dày nam châm vĩnh cửu đến đặc tính khởi động của động cơ LSPMSM 3.000 vòng/phút, Hội nghị Khoa học toàn quốc về Cơ khí – Điện – Tự động hóa (MEAE 2023), Kỷ yếu hội nghị.
- [4] Đỗ Như Ý, Trịnh Biên Thùy, Bùi Đức Hùng, Lê Anh Tuấn (2023), Nghiên cứu ảnh hưởng của suy giảm từ đến đặc tính làm việc ở chế độ xác lập của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp 2 cực, 15 kW, Hội nghị Khoa học toàn quốc về Cơ khí – Điện – Tự động hóa (MEAE 2023), Kỷ yếu hội nghị.

Tiếng Anh

- [5] Thuy, T. B., Cuong, N. X., Tuan, L. A., Do, N. Y. (2023), Effect of Permanent Magnet Structure on Working Characteristics of LSPMSM 3000 rpm, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1275, no. 1, p. 012049.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1275/1/012049> (Index: Scopus)
- [6] Do, N. Y., Thuy, T. B., Tuan, L. A., Cuong, N. X. (2024), Rotor Configuration for Improved Working Characteristics of LSPMSM in Mining Applications, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, no. 3, pp. 79–86.
DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/079> (Scopus, ESCI (Q3))

- [7] Do, N. Y., Ngo, X. C., Le, A. T., Do, A. T., Thuy, T. B. (2024), Analysis of Permanent Magnet Demagnetization during the Starting Process of a Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor, Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 14, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.8576> (Scopus (Q2))
- [8] Thuy, T. B., Cuong, N. X., Tuan, L. A., Do, N. Y. (2024), Influence of the NdFeB Permanent Magnet on Working Characteristics of LSPMSM, International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA), Springer Proceedings. (Scopus (Q4))
- [9] Le Anh, T., Do Nhu, Y., Trinh Bien, T., & Nguyen Van, H. (2024). Studying on current and speed characteristics of LSPMSM of 15 kW, two-pole under remanence reduction of permanent magnets. In Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Electronics and Automation (EEA 2024).
- [10] Le Anh Tuan, Trinh Bien Thuy, Do Nhu Y (2025), "Parametric analysis to optimize a tradeoff between the efficiency and demagnetization of LSPMSM". International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 563 Vol. 16, No. 2, April 2026, pp. 563~576 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v16i2.pp563-576.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Bùi Đức Hùng và cộng sự (2012 - 2013) Nghiên cứu thiết kế, chế tạo động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu dải công suất đến 1 kW. Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [2] Bùi Minh Định (2018) “Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo động cơ điện tiết kiệm năng lượng sử dụng vật liệu có mật độ từ cảm cao” Chương trình: Nghiên cứu và phát triển công nghệ năng lượng báo cáo Bộ Khoa học Công nghệ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [3] Đỗ Như Ý (2023), Nghiên cứu thiết kế chế tạo hoàn thiện hệ thống điện – điều khiển tự động quạt thông gió cục bộ phục vụ khai thác mỏ hầm lò. Chủ nhiệm, Cấp nhà nước.
- [4] Đỗ Như Ý, Đỗ Anh Tuấn, Lê Anh Tuấn (2022), Thiết kế động cơ phòng nổ hiệu suất cao tốc độ 3.000 vòng/phút sử dụng cho quạt gió cục bộ trong khai thác mỏ hầm lò. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- [5] Đỗ Như Ý, Đỗ Anh Tuấn, Lê Anh Tuấn, Văn Uy Lưu (2022), “Thiết kế động cơ chống cháy nổ hiệu suất cao 3.000 vòng/phút để thông gió cục bộ trong khai thác hầm lò”, "Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam", Tập 64, số 10ĐB, 2022, trang 43-45.
- [6] Đỗ Như Ý, Lê Anh Tuấn, Ngô Xuân Cường, và Bùi Trung Kiên (2022), “Xác định các thông số nam châm vĩnh cửu trong động cơ LSPMSM tốc độ 3.000 vòng/phút”. Hội nghị khoa học lần thứ 7 - Đại học Công nghiệp Quảng Ninh, Quảng Ninh
- [7] Đỗ Như Ý, Ngô Thanh Tuấn, Ngô Xuân Cường, Lê Anh Tuấn (2021). Ứng dụng phương pháp mô phỏng số trong thiết kế động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM). Kỷ yếu Hội nghị Khoa học toàn quốc về Cơ khí – Điện – Tự động hóa (MEAE 2021), Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.

- [8] Đỗ Như Ý, Ngô Xuân Cường, Lê Anh Tuấn. Xác định thông số nam châm vĩnh cửu trong động cơ LSPMSM tốc độ 3.000 vòng/phút, HNKCQ Quốc Gia - ĐHCN Quảng Ninh, 2022
- [9] Lê Anh Tuấn (2017) “Tối ưu quá trình khởi động động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bằng cách điều chỉnh kết cấu roto” Luận án tiến sĩ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [10] Lê Anh Tuấn, Bùi Đức Hùng, Đỗ Như Ý (2022). Nghiên cứu ảnh hưởng của cấu hình nam châm vĩnh cửu đến đường cong tốc độ khởi động và dạng sóng dòng điện pha ở trạng thái ổn định của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) công suất 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng, số 7, tr. 8–12
- [11] Lê Anh Tuấn, Đỗ Như Ý, Bùi Đức Hùng. Nghiên cứu ảnh hưởng của kiểu dây quấn stato đến đặc tính khởi động của LSPMSM 5,5kW 3.000 vòng/phút bằng phương pháp số, Science Technology, 2022.
- [12] Nguyễn Hoàng Nghi, Cơ sở từ học và các vật liệu từ tiên tiến, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2012.
- [13] Nguyễn Vũ Thanh (2015) Nghiên cứu thiết kế tối ưu động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu. Luận án tiến sĩ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [14] Công ty Cổ phần Máy điện VIHEM. Motor điện 3 pha HEM 15 kW (20HP)-2P-3K160M2 tốc độ (2940~3000) r/min. Website doanh nghiệp.
- [15] Tạ Văn Đĩnh (2002) Phương pháp sai phân và phương pháp phần tử hữu hạn. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [16] Thân Đức Hiền (chủ biên), Lưu Tuấn Tài, Từ học và vật liệu từ, NXB Bách Khoa Hà Nội, Hà Nội, 2009.
- [17] Thông tư số 39/2015/TT-BCT ngày 18 tháng 11 năm 2015 của Bộ Công Thương về quy định hệ thống điện phân phối
- [18] Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 6627-30:2011 (IEC 60034-30:2008) về Máy điện quay – Phần 30: Cấp hiệu suất của động cơ cảm ứng lồng sóc ba pha một tốc độ.

- [19] Trần Khánh Hà, Nguyễn Hồng Thanh (2001) Thiết kế máy điện. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

Tiếng Anh

- [20] A. D. Aliabad, M. Mirsalim (2012) Analytic Modelling and Dynamic Analysis of Pole-Changing Line-Start Permanent-Magnet Motors. IET Electric Power Applications, Vol. 6, Iss. 3, pp. 149-155.
- [21] A. D. Aliabad, M. Mirsalim, N. F. Ershad (2010), Line-Start Permanent-Magnet Motors: Significant Improvements in Starting Torque, Synchronization, and Steady-State Performance. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 12.
- [22] A. Gozdowiak (2024), "Coil short-circuit in the stator winding of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2024, no. 1, 2024, <https://doi.org/10.15199/48.2024.01.15>.
- [23] A. Hassanpour Isfahani, S. Vaez-Zadeh, M. A. Rahman (2011), Evaluation of Synchronization Capability in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors. Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, pp. 1346 – 1350.
- [24] A. J. Sorgdrager, A. J. Grobler, and R. J. Wang, “Design procedure of a line-start permanent magnet synchronous machine,” in *Proc. 22nd Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*, Durban, South Africa, Jan. 30-31 2014, pp. 307-314, doi: 10.13140/2.1.2894.2084.
- [25] A. Mahmoudi, E. Roshandel, S. Kahourzade, F. Vakilipoor, and S. Drake (2024), “Bond graph model of line-start permanent-magnet synchronous motors,” *Electrical Engineering*, vol. 106, pp. 1667–1681, 2024, <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01654-w>.
- [26] A. Takahashi, S. Kikuchi, H. Mikami, K. Ide, A. Binder (2012), “d-q Space Vector Analysis for Line-Starting Permanent Magnet Synchronous Motors”, 2012 XXth International Conference on Electrical Machines.

- [27] A. Waheed and J. Ro (2020), “Analytical modeling for optimal rotor shape to design highly efficient line-start permanent magnet synchronous motor,” IEEE access, vol. 8, pp.145672-145686, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014718.
- [28] A. Waheed, B. Kim, Y.H. Cho (2020), “*Optimal Design of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Magnetic Equivalent Parameters*,” *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020, p. 4663. DOI: 10.3390/en13184663. <https://doi.org/10.3390/en13184663>
- [29] A.U. Ganesan and L.N. Chokkalingam (2019), Review on the evolution of technology advancements and applications of line-start synchronous machines. IET electric power applications, 13(1): 1-16. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5283>.
- [30] Anonymous. Neodymium Iron Boron Magnet Catalog. Available online: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Catalog-151021.pdf> (accessed on 7 May 2025).
- [31] B. C. Yu and L. S. Shao (2022), A Mine Ventilation System Energy Saving Technique Based on an Improved Equilibrium Optimizer. *Frontiers in Energy Research*, 10: 913817 <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.913817>
- [32] B. Yan, Y. Yang, and X. Wang (2020). Design of a large capacity line-start permanent magnet synchronous motor equipped with hybrid salient rotor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(8): 6662-6671. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3008360>.
- [33] B. Zöhra, M. Akar and M. Eker (2018), “Design of a novel line start synchronous motor rotor,” *Electronics*, vol. 8(1), p.25, 2018, doi: 10.3390/electronics8010025.
- [34] B.H. Lee, J.W. Jung and J.P. Hong (2018), “An improved analysis method of irreversible demagnetization for a single-phase line-start permanent magnet motor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54(11), pp.1-5, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2828507.

- [35] C. Debruyne, M. Polikarpova, S. Derammelaere, P. Sergeant, J. Pyrhönen, J.J. Desmet and L. Vandeveld (2013), “Evaluation of the efficiency of line-start permanent-magnet machines as a function of the operating temperature,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61(8), pp.4443-4454, 2013, doi: 10.1109/TIE.2013.2279127.
- [36] C. Mutize and R.J. Wang (2013), Performance comparison of induction motor and line start PM motor for cooling fan applications, in *Proceedings of the 21st Southern African Universities Power Engineering Conference*. 2013: North-West University, Potchefstroom, South Africa. p. 122-126.
- [37] D. Bo, and X. Bin (2013), Recent research of 2-pole asynchronous start permanent magnet synchronous motors. in *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 1090-1092. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754406>.
- [38] D. F. de Souza, P.P.F. da Silva, I.L. Sauer, A.T. de Almeida and H. Tatizawa (2024), “Life cycle assessment of electric motors-A systematic literature review,” *Journal of Cleaner Production*, p.142366, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142366.
- [39] D. Li, G. Feng, W. Li, B. Zhang and J. Zhang (2022), “Effect of stator slots on electromagnetic performance of a high-voltage line-start permanent magnet synchronous motor,” *Energies*, vol. 15(9), p.3358, 2022, doi: 10.3390/en15093358.
- [40] D. Li, G. Feng, W. Li, B. Zhang, Y. Xu, Y. Chen, J. Zheng and Q. Wu (2023), “Irreversible Demagnetization of a Large Capacity Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors considering Influence of Permanent Magnet Temperature,”. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023(1), p.6798493, 2023, doi: 10.1155/2023/6798493.
- [41] D. Mingardi and N. Bianchi (2017), “Line-start PM-assisted synchronous motor design, optimization, and tests,” *IEEE Transactions on Industrial*

- Electronics, vol. 64, no. 12, pp. 9739–9747, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2711557.
- [42] D. Mingardi, N. Bianchi, and M. Dai Prè (2017), Geometry of line start synchronous motors suitable for various pole combinations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5): 4360-4367. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2702581>.
- [43] D. Q. Nguyen, T.T. Nguyen, T.C. Le, M.D. Bui, Q.V. Dang (2024), “Analytical Association between the Analytical Technique and Finite Element Method for designing SPMSMs with Inner Rotor Type for Electric Vehicle Applications”. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no.3, pp. 14119-14124, 2024.
- [44] D. Rao, M. Bagianathan (2021), Selection of Optimal Magnets for Traction Motors to Prevent Demagnetization. *Machines*, 9(6), 124 (2021).
- [45] D. Stoia, M. Cernat, A.A. Jimoh and D.V. Nicolae (2009), September. Analytical design and analysis of line-start permanent magnet synchronous motors. In *AFRICON 2009* (pp. 1-7). IEEE. 10.1109/AFRCON.2009.5308177
- [46] D. Stoia, O. Chirilă, M. Cernat, K. Hameyer and D. Ban (2010), “The behaviour of the LSPMSM in asynchronous operation,” in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC*, 2010, pp. T4-45, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606795.
- [47] Do, N. Y., Le, T. A., Ngo, X. C. (2022). Effect of Permanent Magnet Structure on the Performance of LSPMSM with a Power of 22 kW and 3000 rpm. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1111(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012047>
- [48] Do, N.Y. and Ngo, X.C. (2021). Influence of Single-Phase Voltage Loss and Load Carrying Mode on Mine Drainage Pump Motor in Vietnam. *Inżynieria Mineralna*. <http://dx.doi.org/10.29227/IM-2021-02-31>.

- [49] Do, N.Y. and Ngo, X.C. (2022). Effect of harmonic components and load carrying factor on the operating mode of induction motor. in AIP Conference Proceedings. 2534(1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0105148>.
- [50] Do, N.Y., & Ngo, X.C. (2022). Effects of Voltage Unbalance on Matrix Converter Induction Motor Drive. International Conference on Engineering Research and Applications, 468476. Springer. https://doi.org/10.1007/9783031222009_53.
- [51] Do, N.Y., Do, A.T., Le, A.T., and Luu, V.U. (2022). Design of high-performance explosion proof motor of 3,000 rpm for local exhaust ventilation in underground mining. Version B of Vietnam Journal of Science and Technology, 64(10DB): 43-45. [https://doi.org/10.31276/VJST.64\(10DB\)](https://doi.org/10.31276/VJST.64(10DB)).
- [52] Do, T.D., Do, Y.N., and Dai, P.D. (2018). A robust suboptimal control system design of chaotic PMSMs. Electrical Engineering, 100(3): 1455-1466. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0603-6>.
- [53] E. De Souza (2015). Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. Applied Thermal Engineering, 90: 1092-1097. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.048>.
- [54] E. Galvan (2016), *Parametric Optimization: Applications in Systems Design*, Ph.D. dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, USA, Dec. 2016.
- [55] F. Ghoroghchian, A. Damaki Aliabad and E. Amiri (2020), "Design and analysis of consequent-pole line start permanent magnet synchronous motor," IET Electric Power Applications, vol. 14(4):678-84, 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0524.
- [56] F. Mahmouditabar, A. Vahedi, and P. Ojaghlu (2018), "Investigation of Demagnetization Effect in an Interior V-Shaped Magnet Synchronous Motor at Dynamic and Static Conditions," Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, vol. 14, no. 1, pp. 22-27, Mar. 2018, <https://doi.org/10.22068/IJEEE.14.1.22>.

- [57] F. Yu, L. Yao, S. Chen, Y. Wang, and J.X. Shen (2020), "Demagnetization Analysis and Optimization Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," In 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 704-709, Hamamatsu, Japan, Nov. 2020, IEEE, <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291158>.
- [58] G. Chingale, and R. Ugale, (2014), Harmonic filter design for line start permanent magnet synchronous motor. in 2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2014.6838503>.
- [59] H. Chen, X. Wang, and K. Wang (2017), "Demagnetization analysis of line-start permanent magnet synchronous motor with composite rotor under abnormal conditions," in 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Harbin, China, Aug. 2017, IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8080977>.
- [60] H. Farooq, "Development of a pre-sizing tool for the design of line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM)," M.Sc. thesis, Dept. Elect. Eng., Univ. of Nottingham, Nottingham, U.K., 2024. [Online]. Available: University of Nottingham eTheses Repository.
- [61] H. Qiu, Y. Zhang, C. Yang, and R. Yi (2020), Rotor structure with double cage for improved synchronous capability of line-start permanent magnet synchronous motors. Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika, (1). <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.040>.
- [62] H. Toda, Y. Zaizen, M. Namikawa, N. Shiga, Y. Oda, and S. Morimoto (2014), Iron Loss Deterioration by Shearing Process in Non-Oriented Electrical Steel with Different Thicknesses and Its Influence on Estimation of Motor Iron Loss. IEEJ Journal 3 Issue 1, p55-61.
- [63] H.J. Park, H.B. Hong and K.D. Lee (2022), "A study on a design considering the transient state of a line-start permanent magnet synchronous motor

- satisfying the requirements of the IE4 efficiency class”. *Energies*, vol. 15(24), p.9644, 2022, doi: 10.3390/en15249644.
- [64] J. Li, J. Song, Y. Cho (2010), High Performance Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor for Pumping System. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010)*, Bari, Italy, pp. 1308–1313.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637082>
- [65] J. Pecho and W. Hofmann (2019), “Analysis of the effects of parameter variations on the start-up characteristics of LSPMSM,” in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe)*, 2019, pp. P-1, doi: 10.23919/EPE.2019.8914800.
- [66] J. W. Heim and R. L. Vander Wal, (2023), NdFeB Permanent Magnet Uses, Projected Growth Rates and Nd Plus Dy Demands across End-Use Sectors through 2050: A Review. *Minerals*, 13(10): 1274. <https://doi.org/10.3390/min13101274>.
- [67] J.M. Tabora, L. Correa dos Santos Júnior, E. Ortiz de Matos, T. Mota Soares, A.R. Arrifano Manito, M.E. de Lima Tostes and U. Holanda Bezerra (2023), “Exploring the Effects of Voltage Variation and Load on the Electrical and Thermal Performance of Permanent-Magnet Synchronous Motors,” *Energies*, vol. 17(1), p.8, 2023, doi: 10.3390/en17010008.
- [68] J.-T. Song, J. Li, and Y.-H. Cho (2010), “*Design of Low-Cost Line-Start Permanent Magnet Motor with Optimized Rotor Shape*,” *14th Biennial IEEE Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*, 2010, pp. 1–4, DOI: 10.1109/COMPUMAG.2010.5662321
- [69] J.X. Shen, P. Li, M.J Jin and G. Yang (2013), “Investigation and countermeasures for demagnetization in line start permanent magnet synchronous motors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49(7), pp.4068-4071, 2013, doi: 10.1109/TMAG.2013.2244582.

- [70] K. H. Kim, J. Li, J. H. Jang, and Y.-H. Cho (2012), “A Study on Line Start Permanent Magnet Machine with Improved Saliency Ratio,” *Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEFPA)*, 2012, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICEFPA.2012.6292319
- [71] Ł. Knypiński, L. Nowak and C. Jedryczka (2015), “Optimization of the rotor geometry of the line-start permanent magnet synchronous motor by the use of particle swarm optimization”. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 34(3), pp.882-892, 2015, doi: 10.1108/COMPEL-10-2014-0276.
- [72] L. S. Maraaba, A. M. Memon, M. Abido, and L. M. AlHems (2021), An efficient acoustic-based diagnosis of inter-turn fault in interior mount LSPMSM. *Applied Acoustics*, 173: 107661. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107661>.
- [73] L. S. Maraaba, Z. M. Al-Hamouz, A. S. Milhem, and S. Twaha (2019), Comprehensive parameters identification and dynamic model validation of interior-mount line-start permanent magnet synchronous motors. *Machines*, 7(1): 4. <https://doi.org/10.3390/machines7010004>.
- [74] L. S. Maraaba, Z. M. Al-Hamouz, and M. A. Abido (2019), Mathematical modeling, simulation and experimental testing of interior-mount LSPMSM under stator inter-turn fault *IEEE Trans Energy Convers* 34 (3) 1213-22
- [75] Le, T.A., Bui, D.H., and Do, N.Y. (2022), Studying effect of proposal permanent magnet configurations on starting speed curve and phase current waveform of line start magnet synchronous motors 15 kw, 3.000 rpm in steady state. *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, 20(7): 8-12.
- [76] M. Baranski, W. Szelag, and W. Lyskawinski, W (2019), “An analysis of a start-up process in LSPMSMs with aluminum and copper rotor bars considering the coupling of electromagnetic and thermal phenomena,”

- Archives of Electrical Engineering, vol. 68, no. 4, 2019
<https://doi.org/10.24425/aee.2019.130693>.
- [77] M. Baranski, W. Szelag, W. Lyskawinski (2020), Analysis of the Partial Demagnetization Process of Magnets in a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor. *Energies*, Vol. 13, No. 21, Article 5562. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13215562>
- [78] M. F. Palangar (2021), *Design, Analysis and Optimization of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors: Simultaneous Electromagnetic and Thermal Analysis*, Ph.D. dissertation, Dept. Electrical Engineering, Flinders University, Adelaide, Australia, 2021. [Online]. Available: https://flex.flinders.edu.au/file/8616886a-3b6f-4c97-a9d0-95452aa86a65/1/Faramarezi%20Palangar%20Thesis2021_LibraryCopy.pdf
- [79] M. F. Palangar, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, W. L. Soong (2020), “*Optimum Design of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Mathematical Method*,” *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-6, 2020. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236205>
- [80] M. Farghali, A.I. Osman, I.M. Mohamed, Z. Chen, L. Chen, I. Ihara, P.S. Yap, D.W. Rooney (2023), “Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 21(4), pp.2003-2039, 2023, doi: 10.1007/s10311-023-01591-5.
- [81] M. Gwozdziwicz, J. Zawilak (2017), Induced pole permanent magnet synchronous motor. In: *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, pp. 1-4, (2017).
- [82] M.H. Soreshjani and A. Sadoughi (2014), Conceptual comparison of line-start permanent magnet synchronous and induction machines for line-fed of different conditions. *Journal of World’s Electrical Engineering Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2014.

- [83] M.H. Soreshjani, R. Heidari and A. Ghafari (2014), "The application of classical Direct Torque and Flux Control (DTFC) for line-start permanent magnet synchronous and its comparison with permanent magnet synchronous motor," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 9(6), pp.1954-1959, doi: 10.5370/JEET.2014.9.6.1954.
- [84] M.J. Bala, C. Jana, S.K. Chowdhury, and N.K. Deb (2022). Performance analysis of different rotor configuration of LSPMSM for Electric Vehicles. in 2022 IEEE Calcutta Conference (CALCON). 223-227. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CALCON56258.2022.10060046>.
- [85] N. T. Lan, L. A. Tuan, T. D. Khanh, N. X. Cuong, and D. N. Y. (2025), "Analysis of the Influence of Permanent Magnet Parameters on Cogging Torque in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors," *Inżynieria Mineralna*, vol. 1, no. 2, pp. 23–31, 2025, doi: 10.29227/IM-2025-02-03.
- [86] Neodymium iron boron magnets Catalog, <https://www.arnoldmagnetics.com/>, last accessed 2023/06/21.
- [87] P. Yu, C. Zhu, Y. Shen, and G. Zhang (2018), "Demagnetization analysis of line-start permanent magnet synchronous motors during its starting process," in 2018 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering, pp. 54-57 Atlantis Press, 2018, <https://doi.org/10.2991/eame-18.2018.11>.
- [88] P. Zhou, Y. Xu, and W. Zhang (2023), Design Consideration on a Low-Cost Permanent Magnetization Remanufacturing Method for Low-Efficiency Induction Motors. *Energies*, 16(17): 6142. <https://doi.org/10.3390/en16176142>.
- [89] R. Islam, K. Vero, and J. P. Borah (2024), "Historical overview and recent advances in permanent magnet materials", *Materials Today Communications*, 41, Article 110538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110538>

- [90] R. J. Wang, J. P. Els, and A. Sorgdrager, (2014) A study of rotor topologies of line start PM motors for cooling fan applications. Proceedings of the 22nd South African Universities Power Engineering Conference, 2014, pp. 1-6.
- [91] R. T. Ugale, B. N. Chaudhari, and A. Pramanik (2014), Overview of research evolution in line start permanent magnet synchronous motors, IET Electric Power Applications, Vol. 8, Iss. 4, pp. 141-154.
- [92] R.T. Ugale and B.N. Chaudhari (2020), Performance enhancement of line start permanent magnet synchronous motor with a special consequent pole rotor. IEEE Transactions on Energy Conversion, 36(3): 1972-1982. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3038725>.
- [93] S. Baka , S. Sashidhar, and B. Fernandes (2018). Design and optimization of a two-pole line-start ferrite assisted synchronous reluctance motor. in 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). 131-137. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507187>.
- [94] S. Baka , S. Sashidhar, and B. Fernandes (2018). Multi-barrier two-pole line-start synchronous reluctance motor with high saliency for a bore-well submersible pump. in 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 475-480. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2018.8352223>.
- [95] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, W. P. Hew, and M. N. Uddin (2013), “Design and performance improvement of a line-start PMSM,” in *Proc. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Denver, CO, USA, 2013, pp. 5042–5047, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647381.
- [96] S. Ruoho (2011), “Modeling Demagnetization of Sintered NdFeB Magnet Material in Time-Discretized Finite Element Analysis,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Aalto Univ., USA, 2011.
- [97] S. Sjukvist (2016), “Demagnetization and Fault Simulations of Permanent Magnet Generators,” Ph.D. dissertation, Faculty of Science and Technology, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala 2016.

- [98] S. Yin, A. Wang, C. Wang, and J. Li (2021), “*Optimization Design of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor Applied for Small Direct Drive,*” *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 48210–48219, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068707
- [99] S. Zhironkin and M. Cehlár (2021), Coal mining sustainable development: economics and technological Outlook. *Energies*, 14(16): 5029. <https://doi.org/10.3390/en14165029>.
- [100] T. Zawilak (2020), "Influence of rotor's cage resistance on demagnetization process in the line start permanent magnet synchronous motor," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 69, no. 2, pp. 249-258, 2020 <https://doi.org/10.24425/aee.2020.133023>.
- [101] T. Zawilak and C. Jędryczka (2023), “Risk of irreversible demagnetisation under transient states of the line start permanent magnet synchronous motor taking into account magnet temperature,” *Archives of Electrical Engineering*, pp.1107-1119, 2023, doi: 10.24425/aee.2023.147429.
- [102] T. Zawilak, M. Gwozdziwicz (2018) “Demagnetization Process in Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor.” *2018 International Symposium on Electrical Machines (ISEM 2018)*, pp. 1–5.
- [103] Tuan, L.A, Hung, B.D., Tuan, P.A. (2016), Saturable q-axis magnetizing inductance calculation of Line Start-Permanent Magnet Synchronous Motors using Lumped Parameter Model. In: *IEEE ICSET*, pp. 364 -368 (2016).
- [104] V. Babu, T. Maity, and H. Prasad (2015). Energy saving techniques for ventilation fans used in underground coal mines—A survey. *Journal of Mining Science*, 51: 1001-1008. <https://doi.org/10.1134/S1062739115050198>.
- [105] V. Biyani, R. Jinesh, T.A. Tharani Esvar, V.S. Sithartha Sourya and K.P. Pinkymol (2022), "Vector control implementation in PMSM motor drive for electric-vehicle application," in 2022 4th international conference on energy, power and environment, Shillong, India, 2022, IEEE <https://doi.org/10.1109/ICEPE55035.2022.9798140>.

- [106] V. Elistatova (2016), Optimal Design of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors of High Efficiency. Doctoral Dissertation, Université Lille-de-France (2016).
- [107] V. Elistratova, M. Hecquet, P. Brochet, D. Vizireanu and M. Dessoude (2013), “Analytical approach for optimal design of a line-start internal permanent magnet synchronous motor,” in 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013, pp. 1-7, doi: 10.1109/EPE.2013.6631924.
- [108] W. Huang, J. Wang, J. Zhao, L. Zhou, and Z. Zhang (2020), Demagnetization Analysis and Magnet Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Power Steering Applications. In: 2020 IEEE 1st CIYCEE, pp. 1-6, (2020).
- [109] W. Li, H. Zhang, J. Zhang, Y. Li, and M. Li (2015), Dynamic Irreversible Demagnetization Behavior of Line-start Permanent Magnet Synchronous Motors in the Starting Process. In: Electric Power Components and Systems, vol. 43(14), pp.1621-1629.
- [110] W. Zhao, M. Tian, X. Wang, Y. Sun (2020), “Analysis of the Synchronization Process and the Synchronization Capability for a Novel 6/8-Pole Changing LSPMSM”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 56, NO. 2, FEBRUARY 2020.
- [111] X. Li, Z. Xue, X. Yan, L. Zhang, W. Ma, and W. Hua (2021), Low-complexity multivector-based model predictive torque control for PMSM with voltage preselection. In: IEEE Trans. Power Electron. vol. 36(10), pp.11726-11738.
- [112] Y. Duan (2010), *Method for Design and Optimization of Surface-Mounted Permanent Magnet Machines and Induction Machines*, Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2010.

PHỤ LỤC

TÍNH TOÁN THIẾT KẾ ĐỘNG CƠ EX-LSPMSM – 3.000 vòng/phút

1. Phân tích phương án thiết kế động cơ Ex-LSPMSM

Trong thiết kế máy điện có hai phương án chính đó là thiết kế mới hoàn toàn và thiết kế cải tiến sử dụng các dây công nghệ dây truyền hiện có.

Thiết kế đầu tư mới hoàn toàn: Với phương pháp này cần thiết phải đầu tư máy móc dây truyền mới hoàn toàn, điều này đòi hỏi nguồn lực lớn tuy nhiên phương án thiết kế này có thể đưa ra các thiết kế mới, đột phá thích hợp nếu có nguồn lực đầu tư lớn về kinh tế cũng như nghiên cứu, nhà xưởng và dây truyền sản xuất.

Thiết kế cải tiến: Phương án thiết kế này sẽ sử dụng lại được toàn bộ công nghệ dây truyền hiện có, giải pháp này được sử dụng rất nhiều trong thiết kế máy nói chung và thiết kế máy điện nói riêng. Việc thực hiện liên tục nhằm cải thiện các tính năng của máy điện. Phương án này sử dụng các thiết kế đã đưa vào sản xuất thiết kế lại theo hướng cải tiến từ đó có thể sử dụng lại một phần dây chuyền công nghệ cũ giúp tiết kiệm công sức và tài chính.

Cân nhắc giữa hai phương án thấy phương án thiết kế cải tiến có rất nhiều ưu điểm hơn so với thiết kế mới vì vậy sẽ sử dụng phương án này đưa vào tính toán thiết kế trong. Và trong nội dung luận án, động cơ Ex-LSPMSM sẽ được cải tiến từ động cơ không đồng bộ 3 pha rôto lồng sóc phòng nổ có cùng công suất. Do vậy việc tính toán thiết kế động cơ Ex-LSPMSM được tính qua hai bước cơ bản là tính toán thiết kế động cơ Ex-IM có hiệu suất IE1 (phù hợp với hiệu suất công bố hiện tại và năng lực sản xuất của các nhà sản xuất trong nước). Sau đó tính toán thiết kế động cơ Ex-LSPMSM IE2 dựa trên thông số cơ bản của động cơ Ex-IM, giải pháp thiết kế này có thể tận dụng lại toàn bộ dây truyền sản xuất của động cơ Ex-IM mà vẫn tạo ra được chủng loại động cơ thế hệ mới Ex-LSPMSM có hiệu suất cao IE2.

2. Thiết kế động cơ Ex-IM cơ sở 15 kW

Bảng A.1. Thông số của động cơ Ex-IM cơ sở được đưa ra trong bảng sau

TT	Thông số	Giá trị
1	Công suất (kW)	15
2	Chiều cao tâm trục h (cm)	16
3	Tốc độ (vòng/phút)	3000
4	Hiệu suất yêu cầu IE1 (%)	88,7 (IEC60034)
5	Hệ số công suất cosφ	0,89
6	Điện áp định mức U_{dm} (V)	380/660 đấu Δ/Y
7	Dòng điện định mức I_{dm} (A)	28,9/16,7
8	Tần số f (Hz)	50
9	Bội số dòng điện khởi động I_{kd}/I_{dm} D.O.L	7,5
10	Bội số mômen max M_{max}/M_{dm}	2,3
11	Bội số mômen khởi động M_{kd}/M_{dm}	1,8
12	Cấp bảo vệ	IP55
13	Cấp cách điện	F
14	Chế độ làm việc	S1
15	Dạng lắp đặt	Ngang
16	Môi trường làm việc	Hàm mở

2.1. Tính toán các kích thước chủ yếu

1. Số đôi cực từ

$$p = \frac{60f}{n_{db}} = \frac{60.50}{3000} = 1 \text{ hay } 2p = 2$$

- Từ yêu cầu ban đầu ta lựa chọn chiều cao tâm trục $h=16$ cm

2. Đường kính ngoài stato:

- Theo tài liệu [1] đường kính ngoài D_n chọn $(24,5 \div 27,2)$ cm, ở đây ta chọn $D_n=24,5$ cm.

3. Đường kính trong stato

- Theo bảng 10.2 [1] chọn $k_D = (0,52 \div 0,64)$

$$D = k_D D_n = (0,52 \div 0,64) 24,5 = 12,74 \div 15,68 \text{ (cm)}$$

→ Chọn $D = 15,2 \text{ cm}$

4. Công suất tính toán

$$P' = \frac{k_E P_{dm}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,982 \cdot 15}{0,887 \cdot 0,89} = 18,12 \text{ kVA}$$

Trong đó $k_E = 0,982$ theo hình 10-2 tài liệu [1]

$\eta = 88,7\%$, $\cos \varphi = 0,89$ theo yêu cầu thiết kế đặt ra.

5. Chiều dài tính toán lõi sắt stato

Theo tài liệu [1] Sơ bộ chọn $k_d = 0,92$; lấy $\alpha_\delta = 0,64$, $k_s = 1,11$, $A = 250 \text{ A/cm}$, $B_\delta = 0,53 \text{ T}$.

$$l_\delta = \frac{6,1 \cdot P' \cdot 10^7}{\alpha_\delta \cdot k_s \cdot k_d \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot n_{db}} = \frac{6,1 \cdot 18,12 \cdot 10^7}{0,64 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 250 \cdot 0,53 \cdot 15,2^2 \cdot 3000} = 18,4 \text{ cm}$$

Chọn chiều dài lõi sắt: $l_\delta = l_1 = l_2 = 18,8 \text{ cm}$

6. Bước cực

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 15,2}{2} = 23,88 \text{ cm}$$

7. Dòng điện pha định mức

$$I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,887 \cdot 0,89} = 16,7 \text{ A}$$

2.2. Tính toán dây quấn, rãnh stato và khe hở không khí:

1. Số rãnh stato

Lấy $q_1 = 6$ suy ra số rãnh stato $z_1 = 2mpq_1 = 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 6 = 36$ rãnh

2. Bước rãnh stato

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 15,2}{36} = 1,33 \text{ cm}$$

3. Số thanh dẫn tác dụng của một rãnh

Chọn số mạch nhánh song song $a_1 = 2$

Số cạnh tác dụng trong một rãnh:

$$u_{r1} = \frac{A \cdot a_1 \cdot t_1}{I_1} = \frac{150 \cdot 2,1 \cdot 33}{16,7} = 41,1$$

Chọn dây quấn đồng khuôn hai lớp do đó u_{r1} phải là một số nguyên chẵn, chọn $u_{r1}=40$

4. Số vòng dây quấn nối tiếp của một pha

$$w_1 = p \cdot q_1 \frac{u_{r1}}{a_1} = 1,6 \cdot \frac{40}{2} = 120 \text{ vòng}$$

5. Tiết diện và đường kính dây dẫn:

Sơ bộ chọn mật độ dòng điện $J'_1 = 4,5 A/mm^2$

$$s'_1 = \frac{I_1}{J'_1 a_1} = \frac{16,9}{4,5 \cdot 2} = 1,8 mm^2$$

Chọn số sợi chập $n_1=3$

Suy ra đường kính dây quấn cần thiết:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot s'_1}{\pi \cdot n_1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,8}{\pi \cdot 3}} = 0,874 mm$$

Chọn đường kính dây tiêu chuẩn:

$$d_1 = \phi(0,85) + \phi(0,9) \cdot 2 \text{ (mm)}$$

$$s_1 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 \cdot n_1 + d_2^2 \cdot n_2) = \frac{\pi}{4} (0,85^2 + 0,9^2 \cdot 2) = 1,84 mm^2$$

Đạt yêu cầu

6. Hệ số dây quấn

Chọn kiểu dây quấn hai lớp bước ngắn $y=15$

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{y \cdot 2 \cdot p}{Z_1} = \frac{15 \cdot 2}{36} = 0,833$$

Hệ số bước ngắn:

$$k_y = \sin \beta \frac{\pi}{2} = \sin \frac{0,833 \cdot \pi}{2} = 0,9659$$

Hệ số bước rải:

$$k_r = \frac{\sin q_1 \frac{a}{2}}{q_1 \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \left(6 \cdot \frac{10}{2} \right)}{6 \cdot \sin \left(\frac{10}{2} \right)} = 0,96$$

Trong đó:

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^0}{Z_1} = \frac{360}{36} = 10^0$$

Hệ số dây quấn:

$$k_d = k_y k_r = 0,9659 \cdot 0,96 = 0,927$$

7. Từ thông trong khe hở không khí

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4 \cdot k_s \cdot k_d \cdot f \cdot w_1} = \frac{0,982 \cdot 380}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,927 \cdot 50 \cdot 120} = 0,015 \text{ Wb}$$

8. Mật độ từ thông ở khe hở không khí

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^4}{\alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_1} = \frac{0,015 \cdot 10^4}{0,64 \cdot 23,88 \cdot 18,8} = 0,522 \text{ T}$$

Kết luận: không sai khác nhiều so với lựa chọn sơ bộ (0,53T) nên không cần phải chọn lại

9. Sơ bộ chiều rộng của răng stato

$$b'_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{0,522 \cdot 1,33}{1,15 \cdot 0,96} = 0,629 \text{ cm}$$

Sơ bộ chọn $B_{z1}=1,15\text{T}$, hệ số ép chặt $k_c=0,96$

10. Sơ bộ chiều cao gông stato

$$h'_{g1} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{2 \cdot B_{g1} \cdot l_1 \cdot k_c} = \frac{0,015 \cdot 10^4}{2 \cdot 1,78 \cdot 18,8 \cdot 0,96} = 2,33 \text{ cm}$$

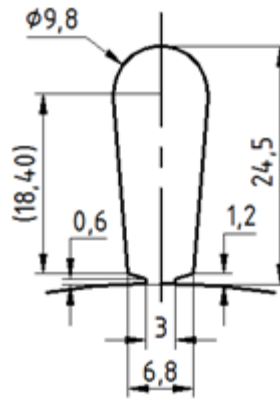
ở đây chọn $B_{gi}=1,78\text{T}$

11. Lựa chọn kích thước rãnh

$$h_{r1}=24,5\text{mm}; h_{12}=18,4\text{mm}; b_1=6,8\text{mm};$$

$$b_{41}=3\text{mm}; d_2=0,98\text{mm}; h_{41}=0,6\text{mm}$$

Diện tích rãnh: $s_r=193,65 \text{ mm}^2$



Hình A.1. Rãnh stato

$$s_d = \frac{\pi(d_1^2 \cdot n_1 + d_2^2 \cdot n_2)u_{r1}}{4} = \frac{\pi(0,85^2 + 0,9^2 \cdot 2) \cdot 40}{4} = 73,59 \text{ mm}^2$$

Hệ số lấp đầy:

$$k_d = \frac{s_d}{s_s} = \frac{73,59}{193,65} = 0,38 < 0,47$$

Phù hợp với điều kiện công nghệ lồng tay.

12. Bề rộng rãnh stato

$$b_{z11} = \frac{\pi}{Z}(D + 2h_{41} + 2 \cdot 0,06) - b_1 = \frac{\pi}{36}(15,2 + 2 \cdot 0,12) - 0,68 = 0,667 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} b_{z12} &= \frac{\pi}{Z}(D + 2h_{41} + 2 \cdot 0,12 + 2h_{12}) - d_2 \\ &= \frac{\pi}{36}(15,2 + 2 \cdot 0,12 + 2 \cdot 1,84) - 0,98 = 0,688 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$b_{z1} = \frac{b_{z11} + b_{z12}}{2} = \frac{0,667 + 0,688}{2} = 0,677 \text{ cm}$$

Đạt yêu cầu Chiều cao gông stato:

$$h_{g1} = \frac{D_n - D}{2} - h_{r1} + \frac{d_2}{6} = \frac{24,5 - 15,2}{2} - 2,45 + \frac{0,98}{6} = 2,36$$

Kết luận: đạt yêu cầu

13. Khe hở không khí

$$\delta = \frac{D}{1600} \left(1 + \frac{9}{2p}\right) = \frac{152}{1600} \left(1 + \frac{9}{2}\right) = 0,52 \text{ mm}$$

Theo các máy đã chế tạo chọn: $\delta = 0,5 \text{ mm} = 0,05 \text{ cm}$

2.3. Tính toán dây quấn, rãnh và gông rôto

1. Số rãnh rôto

Theo bảng 10.6 [1], với $Z_1 = 36$ rãnh, chọn $Z_2 = 28$ rãnh

2. Đường kính ngoài rôto

$$D' = D - 2\delta = 15,2 - 2 \cdot 0,05 = 15,1 \text{ cm}$$

3. Bước rãnh rôto

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D'}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 15,1}{28} = 1,69 \text{ cm}$$

4. Sơ bộ xác định chiều rộng răng rôto

$$b'_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_c} = \frac{0,522 \cdot 1,69}{1,1 \cdot 0,96} = 0,835 \text{ cm}$$

ở đây chọn $B_{z2} = 1,1T$

5. Đường kính trục rôto:

$$D_t \approx 0,3D = 0,3 \cdot 15,2 = 4,56 \text{ cm}$$

Theo các máy đã chế tạo chọn $D_t = 5,2 \text{ cm}$

6. Dòng điện trong thanh dẫn rôto

$$I_{td} = I_2 = k_I I_1 \frac{6 \cdot w_1 \cdot k_d}{Z_2} = 0,92 \cdot 16,7 \cdot \frac{6 \cdot 12 \cdot 0,927}{28} = 355 \text{ A}$$

Ở đây lấy $k_I = 0,92$ theo hình 10-5 [1]

7. Dòng điện trong vòng ngắn mạch

$$I_v = \frac{I_{td}}{2 \cdot \sin \frac{\pi p}{Z_2}} = \frac{355}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{28}} = 1585,3 \text{ A}$$

8. Tiết diện thanh dẫn nhôm

$$s'_{td} = \frac{I_{td}}{J'_2} = \frac{355}{2,7} = 131,48 \text{ mm}^2$$

Sơ bộ chọn $J'_2 = 2,7 \text{ A/mm}^2$

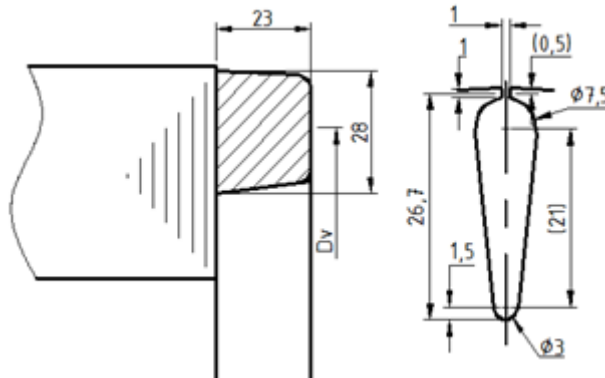
9. Tiết diện vành ngắn mạch

Sơ bộ chọn mật độ dòng điện trong vòng ngắn mạch $J'_v = 2,5 \text{ A/mm}^2$

$$s'_v = \frac{I_v}{J'_v} = \frac{1585,3}{2,5} = 634,12 \text{ mm}^2$$

10. Kích thước rãnh rôto và vành ngăn mạch

Chọn loại rãnh hình quả lê như hình vẽ:



Hình A.2. Rãnh rôto và vành ngăn mạch

$$h_{r2}=26,7 \text{ mm}; h_{12}=21 \text{ mm}; h_{42}=0,5 \text{ mm};$$

$$b_{21}=7,5 \text{ mm}; b_{42}=1 \text{ mm}; b_{22}=3 \text{ mm}$$

11. Diện tích rãnh rôto

$$s_{r2} = 136,91 \text{ mm}^2$$

12. Diện tích vành ngăn mạch

$$s_v = a_v \cdot b_v = 23 \cdot 28 = 644 \text{ mm}^2$$

13. Bề rộng răng rôto

$$b_{z21} = \frac{\pi}{Z_2} (D' + 2(h_{42} + h_{r2} - 0,15 - 2,1)) - b_{21}$$

$$= \frac{\pi}{28} (15,1 + 2 \cdot (0,05 + 2,67 - 0,15 - 2,1)) - 0,75 = 0,839 \text{ cm}$$

$$b_{z22} = \frac{\pi}{Z_2} (D' - 2(h_{r2} - 0,15)) - b_{22}$$

$$= \frac{\pi}{28} (15,1 - 2 \cdot (2,67 - 0,15)) - 0,3 = 0,828 \text{ cm}$$

$$b_{z21} = \frac{b_{z21} + b_{z22}}{2} = \frac{0,839 + 0,828}{2} = 0,633 \text{ cm}$$

14. Chiều cao gông rôto

$$h_{g2} = \frac{D'}{2} - h_{r2} = \frac{15,1}{2} - 2,67 = 4,88 \text{ cm}$$

2.4. Tính toán mạch từ

1. Hệ số khe hở không khí

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - v_1 \delta} = \frac{1,33}{1,33 - 3,27 \cdot 0,05} = 1,14$$

$$v_1 = \frac{\left(\frac{b_{41}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{41}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,3}{0,05}\right)^2}{5 + \frac{0,3}{0,05}} = 3,27$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2}{t_2 - v_2 \delta} = \frac{1,69}{1,69 - 0,75 \cdot 0,05} = 1,017$$

$$v_2 = \frac{\left(\frac{b_{42}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{42}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,1}{0,05}\right)^2}{5 + \frac{0,1}{0,05}} = 0,57$$

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,16$$

2. Lựa chọn loại tôn

Dùng tôn nguội 50A600 tương đương tôn Nga 2013:

3. Sức từ động khe hở không khí

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 0,522 \cdot 1,16 \cdot 0,05 \cdot 10^4 = 484,4A$$

4. Mật độ từ thông ở răng stato

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{b_{z1} \cdot k_c} = \frac{0,522 \cdot 1,33}{0,677 \cdot 0,96} = 1,1T$$

5. Cường độ từ trường trên răng stato

Tra bảng V.5 [1] được: $H_{z1} = 3,7 \text{ A/cm}$

6. Sức từ động trên răng stato

$$F'_{z1} = 2h'_1 \cdot H_{z1} = 2 \left(h_{r1} - \frac{d_2}{3} \right) = 2 \cdot \left(2,67 - \frac{0,98}{3} \right) \cdot 3,7 = 17,34A$$

7. Mật độ từ thông trong răng rôto

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{b_{z2} \cdot k_c} = \frac{0,522 \cdot 1,69}{0,833 \cdot 0,96} = 1,1T$$

8. Cường độ từ trường trên răng rôto

Tra bảng V.5 [1] được: $H_{z2} = 3,7 \text{ A/cm}$

9. Sức từ động trên răng rôto

$$F_{z2} = 2 \cdot h'_{z2} \cdot H_{z2} = 2.2,67.3,7 = 19,76A$$

10. Hệ số bão hòa răng

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = \frac{484,4 + 17,34 + 19,76}{484,4} = 1,08$$

11. Mật độ từ thông trên gông stato

$$B_{g1} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{2 \cdot h_{g1} \cdot l_1 \cdot k_c} = \frac{0,015 \cdot 10^4}{2.2,36.1,88.0,95} = 1,76T$$

12. Cường độ từ trường ở gông stato

Tra bảng V.8 [1] được: $H_{g1}=16 \text{ A/cm}$

13. Chiều dài mạch từ ở gông stato

$$L_{g1} = \frac{\pi(D_n - h_{g1})}{2p} = \frac{\pi(24,5 - 2,36)}{2} = 34,78cm$$

14. Sức từ động trên gông stato

$$F_{g1} = L_{g1} \cdot H_{g1} = 34,78.16 = 556,48A$$

15. Mật độ từ thông trên gông rôto

$$B_{g2} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{2 \cdot h_{g2} \cdot l_2 \cdot k_c} = \frac{0,015 \cdot 10^4}{2.4,88.1,88.0,96} = 0,85T$$

16. Cường độ từ trường ở gông rôto

Tra bảng V.8 [1] được: $H_{g2}=1,38 \text{ A/cm}$

17. Chiều dài mạch từ ở gông rôto

$$L_{g2} = 2h_{g2} = 2.4,88 = 9,76cm$$

18. Sức từ động trên gông rôto

$$F_{g2} = L_{g2} \cdot H_{g2} = 9,76.1,38 = 13,7A$$

19. Tổng sức từ động của mạch từ

$$\begin{aligned} F &= F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{g1} + F_{g2} \\ &= 484,4 + 17,34 + 19,76 + 556,48 + 13,47 = 1091,4A \end{aligned}$$

20. Hệ số bão hòa toàn mạch

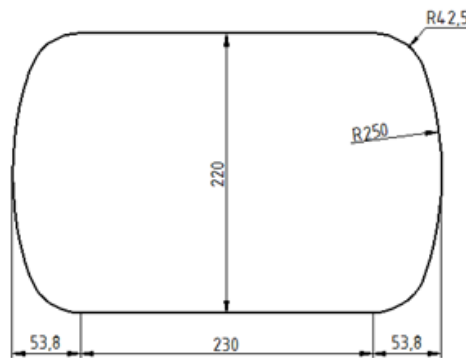
$$K_\mu = \frac{F}{F_\delta} = \frac{1091,4}{484,4} = 2,25$$

21. Dòng điện từ hóa

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F}{2,7 \cdot w_1 \cdot k_d} = \frac{1091,4}{2,7 \cdot 120 \cdot 0,927} = 3,63A$$

$$I_{\mu} \% = \frac{I_{\mu}}{I_1} = \frac{3,63}{16,7} \cdot 1000 = 22,24\%$$

2.5. Tính toán tham số của động cơ điện ở chế độ định mức



Hình A.3. Kích thước vòng dây stato

1. Chiều dài phần đầu nối dây quấn stato

$$l_{dl} = 271 \text{ mm}$$

2. Chiều dài một vòng dây

$$l_{tb} = 2(l_{dl} + 230) = 1002 \text{ mm}$$

3. Chiều dài dây quấn 1 pha của stato

$$L_1 = l_{tb} \cdot w_1 \cdot 10^{-3} = 1002 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 120,24 \text{ m}$$

4. Điện trở tác dụng của dây quấn stato

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{a_1 s_1} = \frac{1}{41} \cdot \frac{120,24}{2,184} = 0,797 \Omega$$

Tính theo tương đối:

$$r_1^* = r_1 \frac{I_1}{U_1} = 0,797 \cdot \frac{16,7}{380} = 0,034$$

5. Điện trở tác dụng của dây quấn rôto

$$r_{td} = \rho_{Al} \frac{l_2 \cdot 10^{-2}}{s_{r2}} = \frac{1}{25} \cdot \frac{18,8 \cdot 10^{-2}}{136,91} = 0,549 \cdot 10^{-4} \Omega$$

6. Điện trở vành ngắn mạch

$$r_v = \rho_{Al} \frac{\pi D_v \cdot 10^{-2}}{Z_2 \cdot s_v} = \frac{1}{25} \frac{\pi \cdot 12 \cdot 10^{-2}}{28.644} = 8,36 \cdot 10^{-7} \Omega$$

Với $D_v = D' - b_v - 0,4 = 15,1 - 2,8 - 0,3 = 12 \text{ cm}$

7. Điện trở rôto

$$r_2 = r_{td} + \frac{2r_v}{\Delta^2} = 0,549 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 8,36 \cdot 10^{-7}}{0,2239^2} = 0,883 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Với

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 2 \sin \frac{\pi}{28} = 0,2239$$

8. Hệ số quy đổi

$$\gamma = \frac{4m_1(w_1 k_d)^2}{Z_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (120 \cdot 0,927)^2}{28} = 5303,3$$

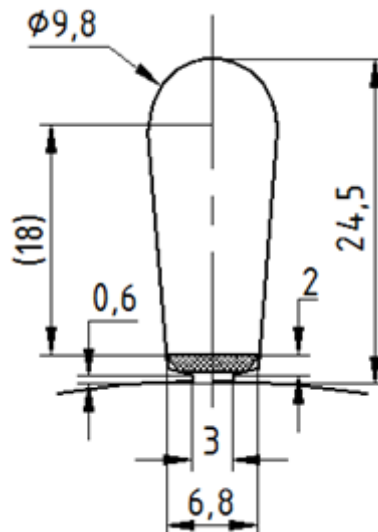
9. Điện trở rôto đã quy đổi

$$r'_2 = \gamma \cdot r_2 = 5303,3 \cdot 0,883 \cdot 10^{-4} = 0,468 \Omega$$

Tính theo đơn vị tương đối:

$$r_2^* = r_2 \frac{I_1}{U_1} = 0,468 \cdot \frac{16,7}{380} = 0,0199$$

10. Hệ số từ dẫn tản stato



Hình A.4. Kích thước rãnh rôto

$$\lambda_{r1} = \frac{h_{12}}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_n}{b_1} + \frac{h_{41}}{b_{41}} \right) k'_\beta = \frac{18}{3 \cdot 6,8} \cdot 0,906 + \left(\frac{2}{6,8} + \frac{0,6}{3} \right) \cdot 0,875 = 1,232$$

Với

$$k'_\beta = \frac{1 + 3\beta}{4} = \frac{1 + 3.0,833}{4} = 0,875$$

$$k_\beta = \frac{1 + 3k'_\beta}{4} = \frac{1 + 3.0,875}{4} = 0,906$$

11. Hệ số từ tản tập stato

$$\lambda_{t1} = \frac{0,9 \cdot t_1 (q_1 \cdot k_{d1})^2 \rho_{t1} \cdot k_{41}}{\delta \cdot k_\delta} \sigma_1$$

$$= \frac{0,9 \cdot 1,33 \cdot (6.0,927)^2 \cdot 0,6 \cdot 0,851}{0,05 \cdot 1,16} \cdot 0,003 = 0,978$$

Trong đó:

$$k_{41} = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{41}}{\delta \cdot t_1} = 1 - 0,033 \cdot \frac{0,3}{0,05 \cdot 1,33} = 0,851$$

Với $\rho_{t1}=0,6$ tra bảng 5.3 [1] ; $\sigma_1=0,033$ tra bảng 5.2a [1]

12. Hệ số từ tản phần đầu nối stato

$$\lambda_{d1} = 0,34 \frac{q_1}{l_\delta} (l_{d1} - 0,64\beta \cdot \tau)$$

$$= 0,34 \cdot \frac{6}{18,8} (27,1 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 23,88) = 1,559$$

13. Hệ số từ dẫn tản stato

$$\sum \lambda_1 = \lambda_{r1} + \lambda_{t1} + \lambda_{d1} = 1,232 + 0,978 + 1,559 = 3,769$$

14. Điện kháng dây quấn stato

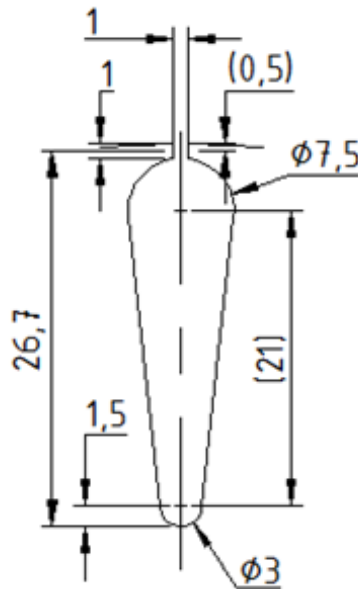
$$x_1 = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \sum \lambda_1$$

$$= 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{120}{100} \right)^2 \frac{18,8}{6} 3,769 = 1,343 \Omega$$

Tính theo đơn vị tương đối:

$$x_1^* = x_1 \frac{I_1}{U_1} = 1,343 \frac{16,7}{380} = 0,057$$

15. Hệ số từ dẫn tản rãnh rôto



Hình A.5. Kích thước rãnh rôto

$$\lambda_{r2} = \frac{h_{12}}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_{21}^2}{8 \cdot s_{r2}} \right)^2 + 0,66 - \frac{h_{42}}{2b_{21}} + \frac{h_{42}}{2b_{42}}$$

$$= \frac{21}{3 \cdot 7,5} \left(1 + \frac{\pi \cdot 7,5}{8 \cdot 136,91} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,5}{2 \cdot 7,5} + \frac{0,5}{1} = 2,385$$

16. Hệ số từ dẫn tập rôto

$$\lambda_{t2} = \frac{0,9 \cdot t_2 (q_2 \cdot k_{d2})^2 \rho_{t2} \cdot k_{42}}{\delta \cdot k_\delta} \sigma_2$$

$$= \frac{0,9 \cdot 1,69 \cdot (4,667)^2}{0,05 \cdot 1,16} \cdot 0,0042 = 2,399$$

$$\lambda_{t2} = \frac{0,9 t_2 (q_2 k_{d2})^2 \rho_{t2} k_{42}}{\delta \cdot k_\delta} \sigma_2 = \frac{0,9 \cdot 1,69 \cdot 4,667^2}{0,05 \cdot 1,16} \cdot 0,0042 = 2,399$$

Với $k_{d2}=1$; $k_{42}=1$; $\rho_{t2}=1$

$$q_2 = \frac{Z_2}{3 \cdot 2p} = \frac{28}{3 \cdot 2} = 4,667; \quad \sigma_2 = \frac{9,15}{100 \cdot q_2^2} = 0,0042$$

Theo bảng 5.2c [1].

17. Hệ số từ tản phần đầu nối

$$\lambda_{d2} = \frac{2,3D_v}{Z_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} \lg \frac{4,7 \cdot D_v}{a_v + 2 \cdot b_v} = \frac{2,3 \cdot 12}{28 \cdot 18,8 \cdot 0,2239^2} \lg \frac{4,7 \cdot 12}{2 + 2 \cdot 2,8} = 0,91$$

18. Hệ số từ tản rôto

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{r2} + \lambda_{t2} + \lambda_{d2} = 2,385 + 2,399 + 0,91 = 5,694$$

19. Điện kháng tản dây quấn rôto:

$$x_2 = 7,9 \cdot f \cdot l_2 \cdot \sum \lambda_2 \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 50 \cdot 18,8 \cdot 5,694 \cdot 10^{-8} = 4,228 \cdot 10^{-4} \Omega$$

20. Điện kháng roto đã quy đổi:

$$x'_2 = \gamma \cdot x_2 = 53033,3 \cdot 4,228 \cdot 10^{-4} = 2,242 \Omega$$

Tính theo đơn vị tương đối:

$$x_2^* = x'_2 \frac{I_1}{U_1} = 2,242 \cdot \frac{16,7}{380} = 0,0955$$

21. Điện kháng hồ cảm

$$x_{12} = \frac{U_1 - I_\mu x_1}{I_\mu} = \frac{380 - 3,63 \cdot 1,343}{3,63} = 103,34 \Omega$$

Tính theo đơn vị tương đối:

$$x_{12}^* = x_{12} \frac{I_1}{U_1} = 103,34 \cdot \frac{16,7}{380} = 4,40$$

22. Tính lại k_E

$$k_E = \frac{U_1 - I_\mu x_1}{U_1} = \frac{380 - 3,63 \cdot 1,343}{380} = 0,987$$

$$\Delta k_E = 100 \frac{k_E - k_{E0}}{k_E} = 100 \frac{0,987 - 0,982}{0,987} = 0,5\%$$

Sai khác dưới 5% nên không cần tính lại.

2.6. Tính toán tổn hao thép và tổn hao cơ

1. Trọng lượng răng stato

$$\begin{aligned} G_{z1} &= \gamma_{Fe} \cdot Z_1 \cdot b_{z1} \left(h_{r1} - \frac{d_2}{3} \right) l_1 \cdot k_c \cdot 10^{-3} \\ &= 7,8 \cdot 36 \cdot 0,677 \cdot \left(2,45 - \frac{0,98}{3} \right) \cdot 1,88 \cdot 0,96 \cdot 10^{-3} = 7,29 kg \end{aligned}$$

2. Trọng lượng gông stato

$$G_{g1} = \gamma_{Fe} \cdot l_1 \cdot L_{g1} \cdot h_{g1} \cdot 2 \cdot p \cdot k_c \cdot 10^{-3} = 23,11 kg$$

3. Tổn hao sắt trong lõi sắt stato

a. Tổn hao sắt trong răng

$$\begin{aligned} P_{Fez1} &= k_{gcz} \cdot p_{\frac{1}{50}} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_{z1}^2 \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3} \\ &= 1,8 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,2} 1,1^2 \cdot 7,29 \cdot 10^{-3} = 0,039 kW \end{aligned}$$

Với máy không đồng bộ lấy $k_{gcz}=1,8$, $p_{Fe}=2,5W/kg$ tra bảng V.14 [1]

b. Tổn hao sắt trong gông

$$\begin{aligned} P_{Feg1} &= k_{gcg} \cdot p_{Fe} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_{g1}^2 \cdot G_{g1} \cdot 10^{-3} \\ &= 1,6 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,2} 1,76^2 \cdot 23,11 \cdot 10^{-3} = 0,286 kW \end{aligned}$$

Với động cơ không đồng bộ lấy $k_{gcg}=1,6$

c. Tổng tổn hao trong cả lõi sắt

$$P_{Fe1} = P_{Fez1} + P_{Feg1} = 0,039 + 0,286 = 0,32 kW$$

4. Tổn hao bề mặt trên răng rôto

Tổn hao trung bình trên một đơn vị bề mặt rôto:

$$\begin{aligned} b_{bm1} &= 2p\tau \cdot \frac{t_2 - b_{42}}{t_2} \cdot l_2 \cdot p_{bm} \cdot 10^{-7} \\ &= 2 \cdot 23,88 \cdot \frac{1,69 - 0,1}{1,69} \cdot 18,8 \cdot 381,3 \cdot 10^{-7} = 0,032 kW \end{aligned}$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} p_{bm} &= 0,5 \cdot k_0 \left(\frac{Z_2 n}{10000}\right)^{1,5} (10 \cdot B_0 t_2)^2 \\ &= 0,5 \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{28 \cdot 3000}{10000}\right)^{1,5} (10 \cdot 0,254 \cdot 1,69)^2 = 381,3 \end{aligned}$$

Ở đây k_0 là hệ số kinh nghiệm, theo [1] $k_0=1,7-2$, chọn $k_0=1,7$

B_0 - biên độ dao động của mật độ từ thông tại khe hở không khí

$$B_0 = \beta_0 k_{\delta} B_{\delta} = 0,42 \cdot 1,16 \cdot 0,522 = 0,254 T$$

Với $\beta_0=0,42$ tra theo hình 6-1 [1]

5. Tổn hao đập mạch trên răng rôto

$$p_{dm} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n \cdot 10 \cdot B_d}{10000} \right)^{1,5} G_{z2} 10^{-3}$$

$$= 0,11 \left(\frac{36 \cdot 3000 \cdot 10 \cdot 0,048}{10000} \right)^2 \cdot 8,04 \cdot 10^{-3} = 0,023 kW$$

Trong đó :

$$B_d = \frac{v_1 \delta}{2t_2} B_{z2} = \frac{3,27 \cdot 0,05}{2 \cdot 1,69} 1,1 = 0,048 T$$

$$G_{z2} = \gamma_{Fe} \cdot Z_2 \cdot h_{r2} \cdot b_{z2} \cdot l_2 \cdot k_c \cdot 10^{-3}$$

$$= 7,8 \cdot 28,2 \cdot 45 \cdot 0,83 \cdot 318 \cdot 8,096 \cdot 10^{-3} = 8,04 kg$$

6. Tổng tổn hao thép

$$P_{Fe} = P_{Fe1} + P_{bm1} + P_{dm} = 0,325 + 0,032 + 0,023 = 0,38 kW$$

7. Tổn hao cơ

$$P_{co} = 0,6 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \left(\frac{D_n}{10} \right)^4 \cdot 10^{-3} = 0,6 \left(\frac{3000}{1000} \right)^2 \left(\frac{24,5}{10} \right)^4 \cdot 10^{-3} = 0,194 kW$$

8. Tổn hao không tải:

$$P_0 = P_{Fe} + P_{co} = 0,38 + 0,194 = 0,57 kW$$

9. Đặc tính làm việc

$$r_1=0,797\Omega; x_1=1,343\Omega; x_{12}=103,34\Omega$$

$$r'_2 = 0,468\Omega; x'_2 = 2,242\Omega$$

$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{1,343}{103,34} = 1,013$$

$$C_1^2 = 1,026; I_{dbx} = I_\mu = 3,63 A$$

$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{1,343}{103,34} = 1,013$$

$$I_{dbx} = \frac{p_{Fe \cdot 10^3 + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}}{3U_1} = \frac{0,38 \cdot 10^3 + 3 \cdot 3,63^2 \cdot 0,797}{3 \cdot 380} = 0,36 A$$

$$E_1 = U_1 - I_\mu \cdot x_1 = 380 - 3,63 \cdot 1,343 = 357,2 V$$

$$k_I = \frac{6 \cdot w_1 k_d}{Z_2} = \frac{6 \cdot 120 \cdot 0,927}{28} = 23,84$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_I} = \frac{355}{23,84} = 14,89 \text{ A}$$

$$s_{dm} = \frac{I'_2 r'_2}{E_1} = \frac{14,89 \cdot 0,468}{375,2} = 0,0185$$

$$s_m = \frac{r'_2}{\frac{x_1}{C_1} + x'_2} = \frac{0,468}{\frac{1,343}{1,013} + 2,242} = 0,131$$

s	Đon vị	0,005	0,01	0,0185	0,02	0,025	0,131
$r_{ns} = C_1^2 \left(\frac{r_1}{C_1} + \frac{r'_2}{s} \right)$	Ω	96,857	48,832	26,767	24,820	20,017	4,473
$x_{ns} = C_1^2 \left(\frac{r_1}{C_1} + x'_2 \right)$	Ω	3,661	3,661	3,661	3,661	3,661	3,661
$Z_{ns} = \sqrt{r_{ns}^2 + x_{ns}^2}$	Ω	96,926	48,969	27,016	25,088	20,349	5,781
$I'_2 = C_1 \frac{U}{Z_{ns}}$	A	3,971	7,861	14,249	15,343	18,917	66,592
$\cos \varphi'_2 = \frac{r_{ns}}{Z_{ns}}$		0,999	0,997	0,991	0,989	0,984	0,774
$\sin \varphi'_2 = \frac{x_{ns}}{Z_{ns}}$		0,038	0,075	0,136	0,146	0,180	0,633
$I_{1r} = I_{dbr} + C \frac{I'_2}{C_1} \cos \varphi'_2$	A	4,278	8,098	14,296	15,344	18,729	51,232
$I_{1x} = I_{dbx} + C \frac{I'_2}{C_1} \sin \varphi'_2$	A	3,778	4,210	5,536	5,840	6,990	45,265
$I_1 = \sqrt{I_{1r}^2 + I_{1x}^2}$	A	5,707	9,127	15,331	16,8	19,991	68,364
$\cos \varphi = \frac{I_{1r}}{I_1}$		0,70	0,85	0,87	0,90	0,88	0,649
$P_1 = 3 \cdot U_1 I_{1r} 10^{-3}$	kW	4,877	9,232	16,297	17,493	21,351	58,404
$P_{cu1} = 3 \cdot I_1^2 r_1 10^{-3}$	kW	0,078	0,199	0,562	0,645	0,956	11,175
$P_{cu2} = 3 \cdot I_2'^2 r'_2 10^{-3}$	kW	0,022	0,087	0,285	0,331	0,502	6,226
$P_f = 0,005 P_1$	kW	0,024	0,046	0,081	0,087	0,107	0,292
P_0	kW	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574	0,574
Σp	kW	0,698	0,906	1,502	1,637	2,139	18,267
$P_2 = P_1 - \Sigma p$	kW	4,178	8,326	14,795	15,856	19,213	40,138
$\eta = \frac{P_1}{P_2} \cdot 1000$	%	80,68	84,19	86,67	88,68	85,88	63,72

10. Bội số mômen cực đại

$$m_{max} = \frac{M_{max}}{M_{dm}} = \left(\frac{l'_{2m}}{l'_{2dm}} \right)^2 \frac{s_{dm}}{s_m} = \left(\frac{66.592}{14.249} \right)^2 \frac{0,0185}{0,131} = 3,08$$

2.7. Tính toán đặc tính khởi động

1. Tham số của động cơ khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài với $s=1$

$$\xi = 0,067 \cdot a \sqrt{s} = 0,067 \cdot 24 = 1,61$$

với $a = h_{r2} - h_{42} = 24,5 - 0,05 = 24 \text{ mm}$

Theo hình 10-13[1], khi $\xi=1,61$, tra ra $\psi=0,87$

$$\varphi = \xi - 1 = 0,61; k_R = 1 + \varphi = 1 + 0,67 = 1,67$$

$$r_{td\xi} = k_R \cdot r_{td} = 1,67 \cdot 0,549 \cdot 10^{-4} = 0,917 \Omega$$

Điện trở roto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài với $s=1$:

$$r_{2\xi} = r_{td\xi} + \frac{2r_v}{\Delta^2} = 0,917 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 8,36 \cdot 10^{-7}}{0,2239^2} = 1,251 \cdot 10^{-4}$$

Điện trở roto quy đổi:

$$r'_{2\xi} = \gamma \cdot r_{2\xi} = 5303,3 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4} = 0,6634 \Omega$$

Hệ số từ dẫn rãnh rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài $s=1$:

$$\lambda_{r2\xi} = \lambda_{r2} \Psi + \frac{h_{42}}{b_{42}} = 2,385 \cdot 0,87 + \frac{0,5}{1} = 2,575$$

Tổng hệ số từ dẫn rãnh rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài với $s=1$:

$$\sum \lambda_{2\xi} = \lambda_{r2\xi} + \lambda_{t2} + \lambda_{d2} = 2,575 + 2,399 + 0,91 = 5,884$$

Điện kháng rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài với $s=1$:

$$x'_{2\xi} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2} = 2,242 \cdot \frac{5,884}{5,694} = 2,317$$

Tổng trở ngắn mạch khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài với $s=1$:

$$r_{n\xi} = r_1 + r'_{2\xi} = 0,797 + 0,6634 = 1,460 \Omega$$

$$x_{n\xi} = x_1 + x'_{2\xi} = 1,343 + 2,317 = 3,66 \Omega$$

$$z_{n\xi} = \sqrt{r_{n\xi}^2 + x_{n\xi}^2} = \sqrt{1,4604^2 + 3,66^2} = 3,94 \Omega$$

Dòng điện ngắn mạch khi chỉ xét để hiệu ứng mặt ngoài:

$$I_{n\xi} = \frac{U_1}{Z_{n\xi}} = \frac{380}{3,94} = 96,45A$$

2. Tham số của động cơ khi xét cả hiệu ứng mặt ngoài và sự bão hoà của mạch từ tản khi $s=1$:

Sơ bộ chọn hệ số bão hoà $k_{bh}=1,3$

$$I_{nbh\xi} = k_{bh} \cdot I_{n\xi} = 1,3 \cdot 96,45 = 125,4A$$

Sức từ động trung bình của một rãnh stato

$$\begin{aligned} F_{zbh} &= 0,7 \frac{I_{nbh\xi} \cdot u_{r1}}{a_1} \left(k_\beta + k_y k_d \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 0,7 \frac{125,4 \cdot 40}{2} \left(0,87 + 0,9659 \cdot 0,927 \frac{36}{28} \right) \\ &= 3548,4A \end{aligned}$$

Theo đường cong trong hình 10-14 [1] $k_\beta=0,87$

$$C_{bh} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,05}{1,33 + 1,69}} = 0,96$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{zbh} \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot C_{bh} \cdot \delta} = \frac{3548,4 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 0,96 \cdot 0,05} = 4,62T$$

Theo hình 10-15 [1] tra được $\chi_\delta=0,5$

$$C_1 = (t_1 - b_{41})(1 - \chi_\delta) = (1,33 - 0,3)(1 - 0,5) = 0,515$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{1bh} &= \frac{h_{41} + 0,58 \cdot h_3}{b_{41}} \frac{C_1}{C_1 + 1,5b_{41}} \\ &= \frac{0,05 + 0,58 \cdot 0,2}{0,3} \frac{0,515}{0,515 + 1,5 \cdot 0,3} = 0,295 \end{aligned}$$

Hệ số từ dẫn tản rãnh stato khi xét đến bão hoà mạch từ tản:

$$\lambda_{r1bh} = \lambda_{r1} - \lambda_{1bh} = 1,232 - 0,295 = 0,937$$

Hệ số từ tản tập stato khi xét đến bão hoà mạch từ tản:

$$\lambda_{1bh} = \lambda_{t1} \cdot \chi_\delta = 0,978 \cdot 0,5 = 0,489$$

Tổng hệ số từ tản stato khi xét đến bão hoà mạch từ tản:

$$\sum \lambda_{1bh} = \lambda_{r1bh} + \lambda_{t1bh} + \lambda_{d1} = 0,937 + 0,489 + 1,559 = 2,985$$

Điện kháng stato khi xét đến bão hoà mạch từ tản:

$$x_{1bh} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1bh}}{\sum \lambda_1} = 1,343 \frac{2,985}{3,769} = 1,0636\Omega$$

$$C_1 = (t_2 - b_{42})(1 - \chi_\delta) = (1,69 - 0,1)(1 - 0,5) = 0,795$$

$$\Delta\lambda_{2bh} = \frac{h_{42}C_2}{b_{42}(C_2 + b_{42})} = \frac{0,05 \cdot 0,795}{0,1(0,795 + 0,1)} = 0,444$$

Hệ số từ tản rãnh rôto khi xét đến bão hoà mạch từ tản và hiệu ứng mặt ngoài:

$$\lambda_{r2\xi bh} = \lambda_{r2\xi} - \Delta\lambda_{2bh} = 2,575 - 0,444 = 2,13$$

Hệ số từ tản tạp rôto khi xét đến bão hoà mạch từ tản:

$$\lambda_{t2bh} = \lambda_{t2} \cdot \chi_\delta = 2,399 \cdot 0,5 = 1,2$$

Tổng hệ số từ tản rôto khi xét bão hòa mạch từ tản và hiệu ứng mặt ngoài:

$$\sum \lambda_{2\xi bh} = \lambda_{r2\xi bh} + \lambda_{t2bh} + \lambda_{d2} = 2,13 + 1,2 + 0,91 = 4,241$$

Điện kháng rôto khi xét đến hiệu ứng mặt ngoài và bão hòa mạch từ tản:

$$x'_{r2\xi bh} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi bh}}{\sum \lambda_2} = 2,242 \cdot \frac{4,241}{5,694} = 1,67$$

3. Các tham số ngắn mạch khi xét hiệu ứng mặt ngoài và sự bão hòa của mạch từ tản:

$$r_{n\xi bh} = r_1 + r'_{2\xi} = 0,797 + 0,6634 = 1,404\Omega$$

$$x_{n\xi bh} = x_1 + x'_{2\xi bh} = 1,0636 + 1,67 = 2,7336\Omega$$

$$z_{n\xi bh} = \sqrt{r_{n\xi bh}^2 + x_{n\xi bh}^2} = \sqrt{1,404^2 + 2,7336^2} = 3,073\Omega$$

4. Dòng điện khởi động

$$I_k = \frac{U_1}{z_{n\xi bh}} = \frac{380}{3,073} = 123,6A$$

Trị số này sai khác <15% so với giả thiết nên không cần phải tính toán lại

5. Bội số dòng khởi động

$$i_k = \frac{I_k}{I_{1dm}} = \frac{123,6}{16,7} = 7,63A$$

Điện kháng hồ cảm khi xét đến bão hòa:

$$x_{12n} = x_{12} k_{\mu} = 103,3.2,25 = 232,4$$

$$C_{2\xi bh} = 1 + \frac{x'_{2\xi bh}}{x_{12n}} = 1 + \frac{1,67}{232,4} = 1,007$$

$$I'_{2k} = \frac{I_k}{C_{2\xi bh}} = \frac{123,61}{1,007} = 122,74$$

6. Bội số momen khởi động

$$m_k = \left(\frac{I'_{2k}}{I'_{2dm}} \right)^2 \frac{r'_{2\xi}}{r'_2} \cdot s_{dm} = \left(\frac{122,74}{14,249} \right)^2 \frac{0,6634}{0,468} \cdot 0,0185 = 1,95$$

2.8. Tính toán nhiệt

Động cơ có quạt thổi ngoài vỏ máy qua các cánh tản nhiệt, đồng thời có gió tuần hoàn bên trong nhờ các cánh khuấy đặt trên vành ngăn mạch của rôto, Sơ đồ tính toán nhiệt được tính theo sơ đồ thay thế hình 8-7 [1],

1. Các nguồn nhiệt trong sơ đồ thay thế bao gồm

Tổn hao đồng trên stato:

$$Q_{Cu1} = P_{Cu1} + 0,5p_f = 562 + 0,5.81 = 602,5W$$

Tổn hao sắt trên stato:

$$Q_{Fe} = P_{Fe} = 380W$$

Tổn hao trên rôto:

$$\begin{aligned} Q_R &= P_{Cu2} + 0,5p_f + P_{co} + P_{bm} + P_{dm} \\ &= 2,85 + 0,5.81 + 194 + 32 + 23 = 574,5W \end{aligned}$$

2. Nhiệt trở trên mặt lõi sắt stato:

$$\begin{aligned} R_{Fe} &= R_{Feg} + R_{\delta g} = \frac{1}{S_{Dn}} \left(\frac{1}{a_g} + \frac{1}{\alpha_{\delta g}} \right) = \frac{1}{1447} \left(\frac{1}{0,169} + \frac{1}{0,09} \right) \\ &= 1,177 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ C/W \end{aligned}$$

Trong đó

$$S_{Dn} = \pi \cdot D_n l = \pi \cdot 24,5 \cdot 18,8 = 1447 \text{ cm}^2$$

Tra bảng 8,2 [1] được $\lambda_{Fe} = 40 \text{ W/cm}^\circ C$; $\delta_{\delta g} = (0,08-0,1) \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ C$

$$\delta_g = \frac{\lambda_{Fe}}{h_{g1}} = \frac{40 \cdot 10^{-2}}{2,36} = 0,169 \frac{W}{cm^2 \cdot ^\circ C}$$

Chọn $\delta_{\delta g} = 0,09 \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ C$

3. Nhiệt trở phần đầu nối dây quấn stato:

$$R_d = \frac{\delta_c}{\lambda_c S_d} + \frac{1}{\alpha_d \cdot S_d} = \left(\frac{0,04}{0,16 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{0,9248} \right) \frac{1}{7836,3} = 3,78 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ C/W$$

Trong đó $\delta_c = 0,04 \text{ cm}$ (hai lớp giấy cấp F=0,2 mm)

Tra bảng 8,2 [1] được $\lambda_c = 0,16 \cdot 10^{-2} \text{ W/}^\circ C$ đối với cách điện cấp F

$$\alpha_d = (1 + 0,54 v_R^2) 10^{-3} = (1 + 0,54 \cdot 41,36^2) 10^{-3} = 0,9248 \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ C$$

$$v_d = \frac{\pi \cdot D_q \cdot n}{6000} = \frac{\pi \cdot 26,5 \cdot 3000}{6000} = 41,63 \text{ m/s}$$

$$S_d = 2 \cdot Z_1 \cdot C_b \cdot l_d = 2 \cdot 36 \cdot 4,03 \cdot 27,1 = 7863,3 \text{ cm}^2$$

$D_q = 26,5 \text{ cm}$ – đường kính quạt gió

$$C_b \approx \sqrt{1,2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot d_{cd}^2 \cdot n_1 \cdot u_{r1}}$$

$$= \sqrt{1,2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot [(0,85 + 0,08)^2 + (0,9 + 0,08)^2 \cdot 2] \cdot 40} = 40,3 \text{ mm}$$

Chu vi tương đương một cạnh của một bồi dây

4. Nhiệt trở đặc trưng cho độ chênh nhiệt giữa không khí nóng bên trong và vỏ máy:

$$R'_\alpha = \frac{1}{\alpha S'_\alpha} = \frac{1}{4,356 \cdot 10^{-3} \cdot 2359,1} = 9,731 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ C/W$$

Trong đó: $\alpha = \alpha_0 (1 + k_0 v_R) = 1,42 (1 + 0,04 \cdot 41,36) \cdot 10^{-3} = 4,356 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ C$

Theo [1] $k_0 = (0,05 - 0,07)$, chọn $k_0 = 0,05$

Tra bảng 8,3 [1] được $\alpha_0 = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ C$

cm^2

$$S'_\alpha \approx \pi \cdot D_n (l_{thân} - l + l_n) + \frac{2\pi D_n^2}{4}$$

$$= \pi \cdot 24,5 (34,6 - 18,8 + 2,6) + \frac{2\pi 24,5^2}{4} = 2359,1 \text{ cm}^2$$

5. Nhiệt trở bề mặt ngoài vỏ máy

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_v S_v + \alpha'_n S'_n + \alpha''_n S''_n}$$

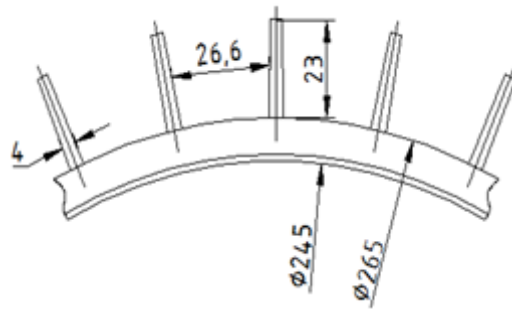
$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_v S_v + \alpha'_n S'_n + \alpha'_n S''_n} = \frac{1}{\alpha_v S_v + \alpha'_n S'_n + \alpha'_n S''_n}$$

$$= \frac{1}{11,22 \cdot 10^{-3} \cdot 2633 + 12,72 \cdot 10^{-3} \cdot 551,5 + 1,42 \cdot 10^{-3} \cdot 551,5}$$

$$= 2,68 \cdot 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Trong đó $\alpha'_v = 3,6 d^{-0,2} \cdot v_v^{0,8} \cdot 10^{-4} = 3,6 \cdot 0,0532^{-0,2} \cdot 20,68^{0,8} \cdot 10^{-4} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$

d- là đường kính rãnh thông gió tương đương của rãnh thông gió dọc thân máy, $d \approx 2 \cdot c = 2 \cdot 2,66 = 5,32 \text{ cm} = 0,0532 \text{ m}$, v_v - tốc độ gió thổi mặt ngoài vỏ máy đã tính đến sự suy giảm 50% chiều dài gân tản nhiệt, đường kính ngoài cánh quạt lấy bằng D_n :



Hình A.6. Rãnh làm mát động cơ

$$v_v = 0,5 v_R = 0,5 \cdot 41,36 = 20,68 \text{ m/s}$$

$$\alpha_v = k_g \alpha'_v = 1,537 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3} = 11,22 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Ở đây:

$$k_g = \frac{c}{b+c} + \frac{a_g}{\alpha'_v} \frac{b}{b+c} = \frac{2,66}{0,4+2,66} + \frac{3,73 \cdot 10^{-2}}{7,3 \cdot 10^{-3}} \frac{0,4}{0,4+2,66} = 1,537$$

$$\alpha_g = \beta \cdot \lambda_{th}(\beta_h) = 0,955 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \tanh(0,955 \cdot 2,3) = 3,73 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Với

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha'_v}{\lambda \cdot b}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,4}} = 0,955$$

Đối với gang không bả $\lambda=4.10^{-3} \text{ W/}^{\circ}\text{C}$

Hệ số tản nhiệt trên nắp sau (tốc độ gió không bị suy giảm):

$$\begin{aligned}\alpha'_n &= 3,6d^{-0,2} \cdot v_R^{0,8} \cdot 10^{-4} = 3,6 \cdot 0,0532^{-0,2} \cdot 41,36^{0,8} \cdot 10^{-4} \\ &= 12,72 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Hệ số tản nhiệt trên nắp trước không có gió thổi:

$$\alpha'_n = 1,4210^{-3} \text{ W/cm}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Bề rộng gân $b=0,4\text{cm}$, khoảng cách gân $c=2,66\text{cm}$, chiều cao gân $h=2,3\text{cm}$

Diện tích tản nhiệt của vỏ máy kể cả gân

$$S_v \approx 0,5(\pi \cdot D_v + h n_c)l = 0,5(\pi \cdot 26,5 + 2,3 \cdot 30)34,6 = 2633 \text{ cm}^2$$

Với $D_v=26,5\text{cm}$ – đường kính vỏ máy, $n_c=30$ số cánh tản nhiệt

Diện tích tản nhiệt trên nắp:

$$S'_n = S''_n \approx \frac{\pi D_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 26,5^2}{4} = 5551,5 \text{ cm}^2$$

6. Nhiệt trở trên lớp cách điện rãnh

$$R_c = \frac{\delta_c}{\lambda_c \cdot S_c} = \frac{0,04}{0,16 \cdot 10^{-2} \cdot 2727,5} = 9,166 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Với: $S_c = Z_1 C_b l_1 = 36,4 \cdot 0,3 \cdot 18,8 = 2727,5 \text{ cm}^2$

7. Độ chênh nhiệt giữa vỏ máy với môi trường

$$\begin{aligned}\theta_0 &= (Q_{Cu1} + Q_{Fe} + Q_R)R_\alpha \\ &= (602,5 + 380 + 574,5)2,69 \cdot 10^{-2} = 41,7 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

8. Độ tăng nhiệt của dây quấn stato

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \frac{Q_{Cu1}(R_{Fe} + R_c) + Q_{Fe}R_{Fe} + Q_R R'_\alpha \frac{R_{Fe} + R_c}{R_d + R'_\alpha}}{1 + R'_\alpha \frac{R_{Fe} + R_c}{R_d + R'_\alpha}} + \theta_0 \\ &= \frac{602,5(1,177 \cdot 10^{-2} + 9,166 \cdot 10^{-3}) + 380 \cdot 1,177 \cdot 10^{-2}}{1 + \frac{1,177 \cdot 10^{-2} + 9,166 \cdot 10^{-3}}{3,78 \cdot 10^{-3} + 9,731 \cdot 10^{-3}}} \\ &\quad + 574,5 \cdot 9,731 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,177 \cdot 10^{-2} + 9,166 \cdot 10^{-3}}{3,78 \cdot 10^{-3} + 9,731 \cdot 10^{-3}} + 41,7 \\ &= 23,74 + 4,7 = 65,44 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

2.9. Tính toán kết cấu cơ khí cho động cơ

Động cơ được thiết kế tuân thủ theo yêu cầu của tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 10888-0:2015 (IEC 60079-0:2011) và TCVN 1088-1:2015 (IEC 60079-1:2014); TCVN 7079 - 7: 2002. Động cơ phòng nổ dùng cho Quạt gió dùng trong lò, có kết cấu thân động cơ hình trụ. Vỏ được chế tạo dưới dạng bảo vệ không xuyên nổ dạng “d”, mục đích chế tạo để sử dụng trong môi trường có khí cháy và bụi nổ thuộc mỏ than hầm lò, thuộc nhóm I. Nắp trước và nắp sau của động cơ được chế tạo bằng thép tấm liền, trên nắp có bố trí gối đỡ ổ bi để đỡ hai đầu trục của động cơ. Động cơ có hai đầu trục gắn liền với Rôto, đây là vị trí lắp hai cánh quạt của quạt gió.

Hộp đầu dây có các đầu cực được liên kết với thân động cơ bằng ống nối rạng ren, để nối giữa hộp đầu cáp với ống nối và ống nối với mặt bích, mặt bích được cố định với thân động cơ bằng 04 bu long lục năng tạo thành mối ghép phòng nổ, giữa ống nối với mặt bích giữ ống nối và hộp nối cáp được đầu nối với nhau dưới dạng mối ghép dạng ren, đảm bảo bước ren ăn khớp $>5\text{mm}$ và chiều dài ren ăn khớp đảm bảo $>8\text{ mm}$, ống luồn cáp có tác dụng đưa dây dẫn từ các pha của động cơ đi qua ống luồn cáp đến hộp đầu cáp. Động cơ có 3 bộ phận chính gồm:

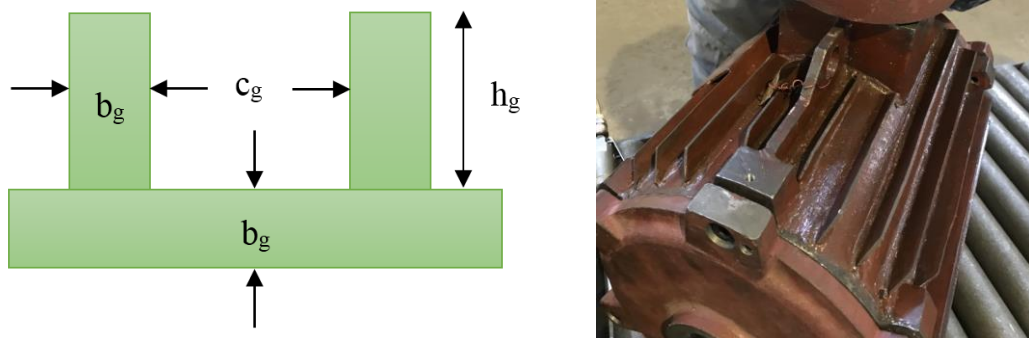
- Thân động cơ chứa các bộ phận stato, dây quấn, roto có kết cấu đặc biệt;
- Hộp đầu dây có cổ cáp, chứa các cọc đầu dây để cấp điện cho động cơ;
- Ống nối giữa thân động cơ và hộp đầu cáp dùng để luồn dây dẫn pha từ các cuộn dây lên hộp đầu dây.

Vỏ động cơ và hộp đầu cáp được chế tạo bằng gang GX18-36, ống nối được chế tạo bằng thép ống CT38, cánh quạt được chế tạo bằng hợp kim nhôm. Độ nhám gia công các bề mặt mối ghép phòng nổ sau khi phay nhẵn bóng có độ nhám $\leq 63\text{ }\mu\text{m}$. Tất cả các kích thước trong các bản vẽ tính bằng mm. Toàn bộ kết cấu của vỏ bên ngoài của động cơ được sơn chống rỉ chịu axit và lớp sơn màu xanh nhạt. Trên đế của thân động cơ có cơ cấu bắt dây tiếp địa sử dụng bu lon M10x15. Thể tích phần trống bên trong của động cơ, có thể tích tự do $>100\text{ cm}^3$.

2.9.1. Thiết kế thân

Vỏ stato phải phối hợp với yêu cầu về truyền nhiệt và thông gió, đồng thời phải có đủ độ cứng và độ bền, không những sau khi lắp lõi sắt mà cả khi gia công vỏ. Động cơ phòng nổ yêu cầu kín, chống bụi và ẩm ướt nên ta chọn vỏ stato là vỏ gang đúc, không có gân bên trong. Stato được xếp các lá thép rồi ép chặt sau đó mới ép vào vỏ stato. Dùng một chốt chống xoay chốt stato với vỏ, để giữ cho stato không bị quay bởi mômen điện từ.

Đối với động cơ, vỏ stato ngoài đảm bảo chế tạo sao cho máy gọn nhẹ, đảm bảo độ tin cậy của máy lúc làm việc, đảm bảo bảo dưỡng máy thuận tiện, đảm bảo chế tạo đơn giản, giá thành hạ, thì còn phải đảm bảo thông gió và tản nhiệt tốt. Đối với động cơ điện kiểu kín, nhiệt lượng trong máy được tản ra môi trường xung quanh qua bề mặt ngoài của vỏ máy và nắp gối trục. Để tăng cường hiệu quả tản nhiệt, trên vỏ máy có chế tạo thêm nhiều gân dọc trục. Như vậy nhiệt lượng sẽ tỏa ra ở phần vỏ giữa các gân và ở bề mặt của gân tản nhiệt.



Hình A.7. Kích thước gân tản nhiệt ngoài vỏ máy

Trong đó: b_g - Độ dày gân tản nhiệt; c_g - Khoảng cách giữa 2 gân tản nhiệt; h_g

: Chiều cao gân tản nhiệt

Theo chọn được kích thước gân như sau [1]:

c_g (mm); h_g (mm); b_g (mm).

Đường kính ngoài của vỏ máy D_{ng} :

$$D_{ng} = D_n + 2 \cdot b_g (\text{mm})$$

Số gân tính toán trên vỏ máy n_g :

$$n_g = \frac{\pi \cdot D_{ng}}{b_g + c_g} (\text{gân})$$

Chiều dài vỏ máy [1] ta có $L_{ma} = L_{dc} + l_{dn}$ (mm).

- Thân động cơ phòng nổ phải đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật về an toàn nổ như: độ dày thân, độ bền cơ, tản nhiệt, khe hở mối lắp ghép.

- Trên vỏ hoặc chân đế của động cơ điện phòng nổ phải có cơ cấu để bắt chặt dây nối đất.

- Hình dạng kết cấu và kiểu thân động cơ điện phòng nổ được thiết kế tùy theo lĩnh vực sử dụng.

- Vật liệu chế tạo thân: Đối với động cơ điện phòng nổ làm việc trong hầm ngầm, thân được làm bằng thép (đúc hoặc hàn) hoặc gang có độ bền cơ cao như: giới hạn bền kéo $\sigma_k > 4000 \text{ kg/mm}^2$, giới hạn chảy $\sigma_c > 2000 \text{ kg/mm}^2$, độ dai va đập $a_k = 350 \text{ kgm/mm}^2$.

Đối với động cơ điện phòng nổ có công dụng khác, thân có thể làm bằng thép hoặc gang có cơ tính không nhỏ hơn cơ tính của gang GX15-32.

- Thân động cơ điện phòng nổ phải có độ dày và độ bền cơ cao so với động cơ điện thông thường thì mới đảm bảo không bị lan truyền nổ ra ngoài môi trường, khi có hiện tượng nổ khí xảy ra bên trong vỏ động cơ. Trong động cơ điện phòng nổ không đồng bộ, khe hở không khí giữa stato và roto nhỏ do vậy sự biến dạng của thân có thể gây ra sát cốt tạo tia lửa gây cháy nổ.

Phần lắp ghép giữa thân và nắp động cơ điện có chiều dày, độ chính xác và độ bóng tuân thủ theo TCVN 7079-0-2002 nhằm đảm bảo độ kín khít để tia lửa không thoát ra ngoài gây cháy nổ.

Chiều đai của thân có thể được tính theo công thức;

$$b = \frac{p \cdot R}{\sigma}$$

Trong đó: - p là áp suất thử thủy trong thân động cơ kg/cm^2

+ Đối với động cơ điện phòng nổ làm việc trong hầm p tra theo bảng A.2

+ Đối với các động cơ điện phòng nổ còn lại p tra theo bảng A.3

- R là bán kính trong thân,;- σ là ứng suất cho phép của vật liệu.

- b là chiều dày thân động cơ.

Bảng A.2. Ký hiệu vỏ

Ký hiệu vỏ	Áp suất tính toán (kg/cm ²) khi thể tích tự do của vỏ (V)				
	Đến 0,1 lít	Trên 0,1÷0,5 lít	0,5 lít<V≤2 lít	2 lít<V≤10 lít	V> 10 lít
1	3,0	6,0	7,0	8,0	9,0
2	-	6,0	7,0	8,0	9,0
3	-	-	-	8,0	9,0
4	-	-	-	-	10,0

Bảng A.3. Ký hiệu loại hỗn hợp nổ

Loại hỗn hợp nổ	Áp suất tính toán (kg/cm ²) khi thể tích tự do của vỏ (V)		
	Đến 0,5 lít	0,5 lít<V≤2 lít	V> 2 lít
1	3,0	6,0	8,0
2	4,0	8,0	10,0
3	4,0	8,0	10,0
4	4,0	8,0	10,0

2.9.2. Thiết kế nắp

Nắp động cơ điện có nhiệm vụ như một gối đỡ trục động cơ do đó nó chịu tác dụng của lực hướng tâm và lực dọc trục, ngoài ra nắp còn chịu áp lực khí nổ bên trong như thân động cơ điện bởi vậy khi thiết kế nắp cần phải đảm bảo:

- Vật liệu chế tạo nắp: Đối với động cơ điện phòng nổ làm việc trong hầm ngầm nắp được làm bằng thép (Đúc hoặc hàn) hoặc gang có độ bền cao, giới hạn bền $\sigma_k > 4000 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_c > 2000 \text{ kg/mm}^2$, $a_k = 350 \text{ kgm/mm}^2$. Đối với động cơ điện phòng nổ có công dụng khác có thể làm bằng thép hoặc gang có cơ tính không nhỏ hơn cơ tính của gang GC 15-32.

- Có chiều dày nắp phải đảm bảo an toàn khi có cháy bên nổ trong động cơ.
- Có độ bền cơ đảm bảo động cơ điện làm việc ổn định, êm.
- Có độ đồng tâm cao giữa gờ bắt nắp vào thân động cơ và lỗ lắp bi.
- Độ sai lệch tương đối là ít nhất, phù hợp với cấp chính xác.
- Loại trừ ảnh hưởng đến ổ đỡ do biến dạng trục khi lắp ráp.

Dung sai lắp ghép giữa nắp và thân động cơ phải chọn sao cho đảm bảo độ đồng tâm cao giữa gờ đỡ bi và đường kính trong của lõi thép stato đặt trong thân và độ kín khít để tia lửa không thoát ra ngoài cũng như xâm nhập vào bên trong.

- Nắp động cơ phải thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 7079-1-2002.
- Tại các vị trí có lỗ bắt bu lông phải đảm bảo cho các bu lông lắp ghép không bị lỏng và chỉ có dụng cụ chuyên dùng mới tháo được bu lông.
- Nắp động cơ lắp vào thân động cơ được bắt chặt bằng các bu lông. Đường kính bu lông được xác định theo công thức:

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0,45 \cdot \sigma_c \cdot Z}}$$

Trong đó: Q - Lực tác dụng lên bu lông: $Q = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot P$; D - Đường kính tại vị trí ghép lắp vào thân; d - Đường kính ngoài ổ bi; P- áp suất tính toán, lấy bằng 1,5 lần áp suất thực gây nổ; σ_c : giới hạn chảy của vật liệu làm bu lông. Z số bu lông.

Đầu bulông không được xẻ rãnh (dùng loại bu lông chìm) theo yêu cầu của TCVN7079-0-2002, nắp mở chậm phải có ký hiệu Ex d

Mối ghép của nắp và thân động cơ ở hai đầu trục:

- + Kiểu mối ghép: Mối ghép có dạng nút ống;
- + Cố định mối ghép: Bảng 6 bu lon đầu chìm M10x35;
- + Bề rộng nhỏ nhất của mối ghép: ≥ 25 mm;
- + Khe hở lớn nhất của mối ghép: $\leq 0,3$ mm;
- + Độ nhám gia công bề mặt $\leq 6,3\mu\text{m}$.

Mối ghép phòng nổ của mặt bích giữ ống nối với thân động cơ: Mối ghép của mặt bích với thân động cơ dưới dạng mối ghép dạng phẳng, và được giữ chặt với thân động cơ bằng 04 bu long lục năng M10x25, phần đáy lỗ bu long được bịt kín, chiều dày phần bịt kín có chiều dày $> 5\text{mm}$ đảm bảo không xuyên qua thành vỏ vào bên trong.

- Bề rộng nhỏ nhất của mối ghép: $\geq 12,5$ mm;
- Khe hở lớn nhất của mối ghép: $\leq 0,3$ mm;

- Độ nhám gia công bề mặt $\leq 6,3\mu\text{m}$.

2.9.3. Thiết kế cụm hộp cực

Cụm hộp cực bao gồm thân hộp cực, nắp hộp cực, ống dẫn dây và các bu lông cọc cực. vật liệu chế tạo thân, nắp hộp cực và ống dẫn dây được đúc bằng gang xám. GX15-32 hoặc đúng bằng gang có độ bền cao đối với động cơ điện làm việc trong hầm ngầm.

- Hộp cực phải đảm bảo độ kín để tia lửa không thoát ra được và không xâm nhập được vào bên trong. Theo cấp bảo vệ IP 55.

- Các cọc cực và đầu cốt phải đạt TCVN 7079-0-2002.

- Các cọc cực dẫn điện phải được cố định vững chắc không bị xô dịch, cách điện giữa các cọc cực với vỏ động cơ bằng ống cách điện được chế tạo từ nhựa ba kê lít chịu hồ quang hoặc ống sứ.

- Ống dẫn dây được thiết kế sao cho không có cạnh sắc để dây cáp không bị xây xước khi dịch chuyển phía ngoài từ bất cứ hướng nào (kể cả hướng nguy hiểm nhất là 90°) và theo quy định của TCVN 7079-0-2002, phải có cơ cấu kẹp dây để dây không bị dịch chuyển trong quá trình động cơ điện phòng nổ làm việc.

- Trong hộp cực phải có cọc để bắt chặt dây nối đất, cọc nối đất phải được bố trí đảm bảo khe hở và khoảng cách rò điện với cọc đầu dây pha theo quy định tại Bảng A.4.

Bảng A.4. Khe hở và chiều dài đường rò

Điện áp làm việc danh định Ue (V)	Chiều dài đường rò nhỏ nhất (mm)			Khe hở nhỏ nhất (mm)
	Nhóm vật liệu			
	I	II	IIIa	
≤ 320	6,3	8,0	10,0	6,0
≤ 400	8	10	12,5	6
≤ 500	10,0	12,5	16,0	8,0
≤ 630	12,0	16,0	20,0	10
≤ 800	16,0	20,0	25,0	12

- Ký hiệu pha, cực tính của các cuộn dây phải tuân thủ khoản 6.8.1 của TCVN 6627-8:2010 (IEC 60034-8:2007).

- Thành bên trong của hộp đấu nối phải được phủ đồng nhất bằng sơn chống hồ quang.

- Các ống lót cách điện (ống lồng cách điện-sứ xuyên), cọc đầu dây dẫn điện qua các thành và vách của vỏ động cơ điện phòng nổ phải tuân thủ theo quy định tại Điều 11 TCVN 10888-0:2015 (IEC 60079-0:2011).

Đối với cổ cáp vào động cơ điện phòng nổ: Các đầu vào dẫn cáp đến hộp đấu nối cáp của động cơ điện phòng nổ phải tuân thủ theo Điều 16 và Phụ lục A TCVN 10888-0:2015 (IEC 60079-0:2011), Điều 13 TCVN 10888-1:2015 (IEC 60079-1:2014)

Môi ghép phòng nổ của nắp hộp đấu cáp

Hộp đấu cáp được chế tạo bằng gang loại GX18-36;

- Kiểu môi ghép: Kiểu môi ghép của nắp hộp đấu cáp có dạng nút ống;
- Cố định môi ghép: Bằng 6 bu lon đầu chìm M8 x 20 có vòng đệm vênh chống tự rơi lỏng;
- Bề rộng nhỏ nhất của môi ghép: $\geq 12,5$ mm;
- Khe hở lớn nhất của môi ghép: $\leq 0,4$ mm.
- Độ nhám gia công bề mặt $\leq 6,3\mu\text{m}$.

Cổ cáp đầu vào động cơ quạt gió

Cổ cáp đầu vào của hộp đấu cáp cho phép sử dụng cáp cao su mềm có đường kính ngoài kích thước (18 ~30)mm;

- Để làm kín cáp với vỏ máy sử dụng vòng đệm cao su chống lão hóa, chịu dầu, chống cháy chuyên sử dụng cho các khởi động từ mỏ do Trung quốc sản xuất;
- Để ép chặt cổ cáp sử dụng các bulon để bắt chặt cổ cáp nén vòng cao su;
- Để ngăn không cho lực kéo từ bên ngoài dẫn đến các cọc đầu dây sử dụng chi tiết kẹp chặt cáp bằng thanh kẹp được bắt chặt vào cổ cáp bằng bu lon;
- Chiều dày của vòng đệm cao su sau khi ép chặt, có chiều dày ≥ 20 mm.

- Hộp đấu cáp được cố định với vỏ quạt gió bằng 4 bu lông lục năng đầu chìm M10x25;

Mối ghép giữa hộp đấu cáp với ống nối

Mối ghép của hộp đấu cáp và mặt bích ống nối;

- Kiểu mối ghép: Mối ghép có dạng ren; M60x1,5
- Chiều sâu ăn khớp của ren $L_{ren} \geq 14\text{mm}$

Mối ghép giữa ống nối với mặt bích

Mối ghép của ống nối với thân động cơ;

- Kiểu mối ghép: Mối ghép có dạng ren; M60x1,5
- Chiều sâu ăn khớp của ren $L_{ren} \geq 14\text{mm}$

Mối ghép phòng nổ của mặt bích giữ ống nối với thân động cơ

Mối ghép của mặt bích với thân động cơ dưới dạng mối ghép dạng phẳng, và được giữ chặt với thân động cơ bằng 04 bu lông lục năng M10x25, phần đáy lỗ bu lông được bịt kín, chiều dày phần bịt kín có chiều dày $> 5\text{mm}$ đảm bảo không xuyên qua thành vỏ vào bên trong.

- Bề rộng nhỏ nhất của mối ghép: $\geq 12,5\text{ mm}$;
- Khe hở lớn nhất của mối ghép: $\leq 0,3\text{ mm}$;
- Độ nhám gia công bề mặt $\leq 6,3\mu\text{m}$.

Mối ghép phòng nổ của sứ xuyên

Sứ xuyên được làm bằng Composite, cọc dẫn dòng được cố định với sứ xuyên, mục đích để đưa dòng từ nguồn vào động cơ qua cọc dẫn dòng. Các cọc dẫn điện (gu giông) M6 làm bằng đồng (LcuZn20) được đúc cố định với sứ xuyên cách điện (composite): 06 bộ;

- Kiểu mối ghép: Mối ghép có dạng hình trụ;
- Bề rộng nhỏ nhất của mối ghép: $\geq 14\text{ mm}$;
- Khe hở lớn nhất của mối ghép: $\leq 0,4\text{ mm}$;
- Độ nhám gia công bề mặt $\leq 6,3\mu\text{m}$
- Khe hở nhỏ nhất từ phần dẫn điện đến vỏ: $\geq 15\text{ mm}$;
- Khoảng cách rò nhỏ nhất từ phần dẫn điện qua sứ xuyên ra vỏ: $\geq 20\text{ mm}$;

- Khe hở nhỏ nhất giữa hai phần mang điện $>16\text{mm}$.



Hình A.8. Cụm hộp cực động cơ phòng nổ

2.9.4. Hệ thống làm mát

- Động cơ được làm mát bằng quạt gió nằm ở ngoài thân và nắp của động cơ. Quạt gió phải có nắp che với kết cấu vững chắc, va chạm nhẹ khó bị biến dạng.

- Cửa gió vào có cấp bảo vệ IP20, cửa gió ra IP10 đáp ứng TCVN 7079-0-2002. - Khe hở giữa cánh quạt gió và nắp che quạt gió ít nhất $> 10\text{mm}$, để đảm bảo trong quá trình vận hành được an toàn, không gây tia lửa do cọ sát giữa quạt gió và nắp che.

Trên vòng ngắn mạch rôto ta sẽ đúc liền cánh quạt lên đó. Theo (Bảng 7.2 - [19]) số cánh quạt là $n_q = 11$.



Hình A.9. Cấu tạo quạt gió động cơ

Các lá thép rôto sau khi được cắt sẽ được ghép lại, ép chặt, sau đó đem đúc nhôm cho lồng sóc và quạt trên vòng ngắn mạch. Vật liệu được dùng để chế tạo cánh quạt làm mát bên ngoài của động cơ điện phòng nổ phải tuân thủ theo quy định tại Điều 7 và điều 8 của TCVN 10888-0:2015 (IEC 60079-0:2011).

- Quạt làm mát động cơ điện phòng nổ phải tuân thủ các điều kiện về kỹ thuật an toàn theo yêu cầu tại khoản 17.1 của TCVN 10888-0:2015 (IEC 60079-0:2011).

- Trong điều kiện làm việc bình thường, khoảng cách giữa cánh quạt và bộ phận đứng yên không được nhỏ hơn 1% đường kính của cánh quạt và nằm trong khoảng từ 1 mm đến 5 mm.

- Nếu cánh quạt được làm bằng nhựa, điện trở cách điện bề mặt không được vượt quá $1 \times 10^9 \Omega$ (1000 M Ω).

Độ tăng nhiệt động cơ so với nhiệt độ môi trường xung quanh xác định theo công thức:

$$\Delta t = \frac{\Delta P}{S \cdot \alpha}$$

Trong đó: ΔP – là tổng tổn hao của động cơ

S – diện tích bề mặt truyền nhiệt (m²)

α - hệ số truyền nhiệt W/(m². °C) phụ thuộc vào vật liệu, đường kính ngoài lõi thép, tốc độ, kiểu bảo vệ IP.

Thể tích không khí làm mát trên giây tính theo công thức:

$$Q_B = \frac{k_m \Delta P}{1100 \cdot \Delta t} \left(\frac{m^3}{\text{giây}} \right)$$

Trong đó: ΔP – tổng tổn hao trong động cơ ở chế độ định mức, Δt – độ tăng nhiệt của không khí. k_m – hệ số phụ thuộc vào chiều dài bề mặt bên ngoài vỏ làm mát.

$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100}} D$$

Hệ số m được xác định theo chiều cao tâm trục, với động cơ có tốc độ $n=3.000$ vòng/phút, xác định như sau:

$m=2,6$ với chiều cao tâm trục $H \leq 132 \text{ mm}$

$m=3,3$ với chiều cao tâm trục $H \geq 160 \text{ mm}$

Lượng không khí quạt gió cần tạo ra tính theo:

$$Q'_B = 0,6 D^3 \frac{n}{100} \left(\frac{m^3}{\text{giây}} \right)$$

2.9.5. Kết cấu trục quay

Ngoài việc phải chịu toàn bộ trọng lượng của rôto ra, trục quay còn chịu mômen xoắn và mômen uốn trong quá trình truyền động tải. Trục còn chịu lực hướng trục, thường là lực kéo. Trục quay cần phải đảm bảo các yêu cầu cơ bản sau:

Phải có đủ độ bền ở tất cả các tiết diện của trục khi máy làm việc, kể cả lúc có sự cố ngắn mạch.

Phải có đủ độ cứng để tránh sinh ra độ võng quá lớn làm chạm rôto với stato. Tốc độ giới hạn của trục phải khác nhiều với tốc độ lúc máy làm việc bình thường. Đường kính trục đã tính toán ở trên là: D_t (mm).

Mômen điện từ trên trục quay M_{dt} :

$$M_{dt} = \frac{P_{dm}}{\omega} \text{ (Nm)}$$

Với ω là vận tốc góc của rôto:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Với $n = 3.000$ vòng/phút là tốc độ quay của động cơ.

Tra) với mômen điện từ M_{dt} (Nm) ta được chiều dài đầu trục là: l_t (mm).

Mối ghép phòng nổ của nắp trước và sau của động cơ với trục động cơ

- Kiểu mối ghép: Mối ghép có dạng trục xoay;
- Cố định mối ghép: Mối ghép được gia công trực tiếp trên nắp trước và sau của nắp động cơ;
- Bề rộng nhỏ nhất của mối ghép: ≥ 25 mm;
- Khe hở lớn nhất của mối ghép: $\leq 0,3$ mm
- Độ nhám gia công bề mặt $\leq 6,3\mu\text{m}$.



Hình A.10. Trục rôto

Kết quả tính toán sơ bộ thông số động cơ Ex-IM – 15 kW cơ sở được thông kê trong bảng A.5

Bảng A.5. Kết quả tính toán thông số động cơ Ex-LSPMSM 15 kW

TT	1. Kích thước và thông số cơ bản động cơ Ex-IM		Đơn vị
1	Công suất	15	kW
2	Điện áp dây	380/660V	V
3	Đầu sao/tam giác	Dau T	
4	Hiệu suất sơ bộ	88,7	%
5	Hệ số công suất	0,89	
6	Số cực 2p	2	cực
7	Số rãnh stato	36	rãnh
8	Số rãnh rôto	28	rãnh
9	Đường kính ngoài lõi tôn	24,5	cm
10	Đường kính trong lõi tôn	15,2	cm
11	Khe hở không khí	0,05	cm
12	Đường kính trong lá tôn rôto	5,2	cm
13	Chiều dài lõi tôn	18,8	cm
14	Vật liệu lòng sóc rôto	N	
15	Kích thước vành chập (a x b)	2,3 x 2,8	cm
16	Đường kính tâm vành chập	12	cm
	Dây quấn stato và rôto		
17	Số vòng/bin dây quấn stato	: 20 vòng	Vòng

18	Đường kính dây	$\varnothing 0,85 + \varnothing 0,9 \times 2$	nn
19	Số sợi chập	3	Sợi
20	Số mạch nhánh song song	2	
21	Bước dây quấn	15	rãnh
22	Các kiểu dây quấn 1 – Dây quấn xếp 2 lớp, 2 – Dây quấn đồng tâm 1 lớp (2 mặt phẳng), 3 – Dây quấn đồng tâm 1 lớp (3 mặt phẳng), 4 – Dây quấn móc xích 1 lớp,		
23	Chọn kiểu dây quấn	1	
24	Cho các kích thước bin dây		
25	L_b	23	cm
26	τ_y	22	cm
27	f_d	5,38	cm
	KẾT QUẢ TÍNH TOÁN		
28	Công suất	15	kW
29	Điện áp	380/660	V
30	Hiệu suất	88,8	%
31	Hệ số công suất	0,9	
32	Tổn hao dòng stato	562	W
33	Tổn hao dòng rôto	285	W
34	Tổn hao phụ	81	W
35	Tổn hao có	194	W
36	Tổn hao thép	380	W
37	Dòng điện Stato	15,331 A	A
38	Mật độ dòng Stato	4,17	A/mm ²
39	Mật độ dòng trong thanh dẫn stato	2,59 A/mm ²	A/mm ²
40	Mật độ dòng trong vành chập	2,46 A/mm ²	A/mm ²

41	Điện trở pha (115°C)	0,797	Ω
42	Mật độ từ thông răng stato	1,1	T
43	Mật độ từ thông gông stato	1,76	T
44	Mật độ từ thông răng rôto	1,1	T
45	Mật độ từ thông gông rôto	0,85	T
46	Mật độ từ thông khe hở không khí	0,522	T
47	Tai dương A	231	A/cm
48	Bộ số dòng điện khởi động	7,63	
49	Bộ số mômen max	3,08	
50	Bộ số mômen khởi động	1,95	
51	Hệ số bảo hòa	1,3	
52	Dòng điện từ hóa không tải	3,63	A

PHỤ LỤC B

TÍNH TOÁN SƠ BỘ KÍCH THƯỚC NAM CHÂM

Đối với cấu trúc rôto trên hiện tại kích thước của nam châm vĩnh cửu hiện đã xác định:

- + Chiều dài: $l_m = l_2 = 170$ (mm)
- + Chiều rộng: $w_m = 35$ (mm)
- + Chiều cao: h_m chưa xác định

Thể tích khối nam châm sẽ là:

$$V_m = c_v \frac{P_{out}}{f \cdot B_r \cdot H_c}$$

Trong đó:

- + B_r : Mật độ từ dư, N38 nên $B_r = 1,33$
- + H_c (A/m) lực kháng từ, vì N38 nên $H_c = 920$ (kA/m)
- + c_v được xác định

$$c_v = \frac{2 \cdot k_{ocf} \cdot k_{fd} \cdot (1 + \vartheta)}{\pi^2 \cdot \xi}$$

. k_{ocf} là hệ số quá tải của động cơ, chọn $k_{ocf} = 1,6$

. ξ là hệ số tận dụng hóa, lựa chọn $\xi = 0,55$

. $\vartheta = E_f/V_1$ là hệ số sức điện động có giá trị $0,6 \div 0,95$, lựa chọn $\vartheta = 0,9$

Tỉ lệ cực-đế/bước cực α_i $\alpha_i = 0.6$

Với $\alpha_i = 0,6$, tuyến tính hóa tương ứng với $k_{fd} = 0,913$, Vậy:

$$c_v = \frac{2 \cdot k_{ocf} \cdot k_{fd} \cdot (1 + \vartheta)}{\pi^2 \cdot \xi} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 0,913 \cdot (1 + 0,9)}{\pi^2 \cdot 0,55} = 1,022$$

Vậy, thể tích khối nam châm sử dụng là:

$$V_m = c_v \frac{P_{out}}{f \cdot B_r \cdot H_c} = 1,022 \frac{1.5000}{50 \cdot 1,33 \cdot 920000} \cdot 10^9 \text{ mm}^3 = 250572 \text{ mm}^3$$

Mặt khác có: $V_m = 6 \cdot h_m \cdot w_m \cdot l_m$

$$\rightarrow h_m = \frac{V_m}{6 \cdot w_m \cdot l_m} = \frac{250572}{6 \cdot 35 \cdot 170} = 7,02 \text{ (mm)}$$

Lựa chọn: $h_m = 7$ (mm); $w_m = 34$ mm

Kích thước NCVC: 170 x 34 x 7 mm