

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG HIỆN TƯỢNG SỤT ĐIỆN ÁP BA PHA THOÁNG QUA TRÊN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

STUDYING ON THE EFFECT OF THE MOMENTARY THREE-PHASE VOLTAGE SAG ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN INDUCTION MOTOR

Lê Anh Tuấn^{1,*},
Hoàng Quang Huy¹, Vũ Anh Tuấn¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.246>

TÓM TẮT

Trong ngành công nghiệp hiện nay, động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc có ngày càng đóng vai trò quan trọng do có nhiều ưu điểm, tin cậy và bảo dưỡng đơn giản trong vận hành. Vì vậy, nó được sử dụng trong nhiều ngành, lĩnh vực nhất là các ứng dụng cần mômen quay trong thực tiễn. Trong khi làm việc, điện áp nguồn cấp tác động rất lớn đến các thông số và đặc tính vận hành của động cơ. Do đó, bài báo này thực hiện nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng sụt điện áp ngắn hạn thoáng qua ba pha trên lưới điện phân phối lên động cơ. Hai đặc tính làm việc quan trọng nhất của động cơ thông qua đó để đánh giá là: tốc độ và dòng điện. Để nghiên cứu hiện tượng sụt điện áp thoáng qua, bài báo sử dụng mô hình toán và ứng dụng Matlab/Simulink để mô phỏng. Dựa trên các kết quả là hai đặc tính tốc độ và dòng điện, bài báo sẽ đánh giá ảnh hưởng của hiện tượng sụt điện áp ngắn hạn thoáng qua đến động cơ, từ đó có những khuyến cáo để đảm bảo máy điện hoạt động ổn định và tin cậy.

Từ khóa: Động cơ không đồng bộ; mô hình toán động cơ không đồng bộ; sụt điện áp thoáng qua; Matlab/Simulink.

ABSTRACT

Nowadays, in industrial sector, squirrel cage induction motors play an increasingly important role due to their numerous advantages, reliability, and simple maintenance during operation. Therefore, they are widely used in various industries, particularly in applications requiring rotating torque in practice. While operating, the supply voltage has a significant impact on the motor's parameters and performance characteristics. Hence, this paper conducts a study on the influence of momentary voltage sag on the three-phase power distribution network on the motor. The two most critical working characteristics of the motor, which are evaluated, are speed and current. To investigate the momentary voltage sag phenomenon, the paper utilizes mathematical models and applies Matlab/Simulink for simulation. Based on the results of the speed and current characteristics, the paper evaluates the impact of momentary voltage sag on the motor and provides recommendations to ensure stable and reliable operation of the electric machinery.

Keywords: Induction motors; modelling of induction motors; momentary voltage sag; Matlab/Simulink.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: leanhtuan0985@gmail.com

Ngày nhận bài: 17/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 19/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
P_{dm}	kW	Công suất định mức

 U_{dm}

V

Điện áp định mức (Δ/Y) I_{dm}

A

Dòng điện định mức (Δ/Y)

f

Hz

Tần số nguồn

R_s, R_r	Ω	Điện trở cuộn dây stator, rôto
L_s, L_r	mH	Điện cảm cuộn dây stator, rôto
L_m	mH	Điện cảm từ hóa
J	kg.m ²	Mômen quán tính
T_L	N.m	Mômen tải định mức

CHỮ VIẾT TẮT

SCIM	Động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc
KĐB	Không đồng bộ
LĐPP	Lưới điện phân phối
MTVS	Hiện tượng sụt điện áp thoáng qua trên ba pha

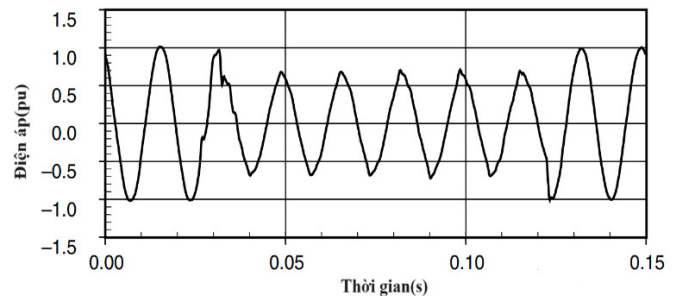
1. GIỚI THIỆU

Động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc(SCIM - Squirrel Cage Induction Motor) được sử dụng ở tất cả các ngành và đặc biệt trong ngành công nghiệp hiện nay. Do đó, việc nghiên cứu các yếu tố tác động lên SCIM để đảm bảo duy trì các thông số và đặc tính làm việc của động cơ trong mức độ cho phép là rất quan trọng trong sản xuất. Bằng cách kiểm soát thích hợp các đại lượng của máy điện như: dòng điện, điện áp, tốc độ,... thì hầu hết các lỗi xảy ra tác động đến động cơ, làm gián đoạn quá trình sản xuất, hư hỏng các thiết bị, máy móc sẽ bị loại trừ. Bên cạnh việc kiểm soát và loại trừ sự cố có khả năng xảy ra như trên thì việc mô phỏng dự báo trước các tác hại tiêu cực của yếu tố bất lợi cũng rất cần thiết. Vì vậy, đối với SCIM, ứng dụng mô hình toán để mô phỏng từ đó phân tích, cải thiện đặc tính làm việc của động cơ đóng một vai trò quan trọng trong nghiên cứu [1-5].

Các hiện tượng bất thường liên quan đến điện áp lưới điện phân phối (LĐPP) có thể kể đến như: mất pha, tăng áp, sụt áp, ngắn mạch, tần số,... Trong các bất thường này, sụt giảm điện áp ngắn hạn xuất hiện thường xuyên. Sự sụt giảm điện áp này ảnh hưởng thường mang tính chất tiêu cực đối với các thiết bị điện như động cơ, các thiết bị điện tử, thiết bị chiếu sáng [6]. Sụt điện áp ngắn hạn theo [7, 8] được xác định là khi trên LĐPP mức điện áp hiệu dụng sụt giảm còn 10% cho đến 90% điện áp danh định, thời gian xuất hiện của hiện tượng này kéo dài từ 0,5 chu kỳ cho đến một phút. Sụt điện áp ngắn hạn có thể là do đóng tải nặng, thực hiện khởi động động cơ có công suất lớn, đóng/cắt tụ điện, sự cố chạm đất,...[9-12]. Các sự cố này có thể dẫn đến hiện tượng sụt điện áp ngắn hạn cho LĐPP cho đến khi thiết bị điều chỉnh điện áp can thiệp để khôi phục điện áp trở lại trong phạm vi cho phép. Bên

cạnh đó, nguyên nhân quá tải trên đường dây cũng có thể dẫn đến sụt điện áp ngắn hạn cho hệ thống [7]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, điện áp nguồn cấp ảnh hưởng đến thông số và đặc tính làm việc của động cơ khi vận hành. Tuy nhiên, ở Việt Nam, hiện chưa có nhiều những đánh giá ảnh hưởng của sụt áp ngắn hạn đến SCIM.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của sụt điện áp ngắn hạn trên LĐPP đến phụ tải SCIM, bài báo sử dụng mô hình toán của SCIM và phần mềm Matlab/Simulink để mô phỏng. Để không làm mất đi tính tổng quát trong các hiện tượng sụt áp ngắn hạn, bài báo lựa chọn loại sụt áp ngắn hạn thoáng qua trên ba pha (Momentary three-phase voltage sag-MTVS) để mô phỏng. MTVS được xác định là sụt áp ngắn hạn với thời gian kéo dài từ 30 chu kỳ đến 3s [7, 8].



Hình 1. Sụt áp ngắn hạn trên LĐPP do sự cố chạm đất một pha gây ra [5]

Để nghiên cứu ảnh hưởng sụt áp ngắn hạn MTVS lên động cơ không đồng bộ (KĐB), trong mục 2 bài báo sẽ tổng hợp mô hình toán của ĐC KĐB. Ở mục 3, Matlab/Simulink được ứng dụng mô phỏng hiện tượng MTVS và áp dụng cho một SCIM thử nghiệm. Động cơ thử nghiệm có công suất 37kW, 4 cực, điện áp định mức(Δ/Y) 380/660VAC. Sau khi mô phỏng ở mục 3, các kết quả được đánh giá để làm rõ ảnh hưởng của hiện tượng MTVS lên phụ tải SCIM. Bên cạnh đó, một số biện pháp được đề xuất nhằm giảm thiểu các bất lợi do hiện tượng MTVS đối với SCIM.

2. MÔ HÌNH TOÁN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ BA PHA

Để nghiên cứu SCIM bài báo tổng hợp mô hình toán của động cơ. Theo nhiều nghiên cứu hiện nay MHT của SCIM thường được biểu diễn theo hệ trục tọa độ dq0. Mô hình toán của SCIM được trình bày dưới dạng hệ phương trình cân bằng của các đại lượng: Từ thông, điện áp và phương trình cơ. Mô hình toán SCIM bao gồm hệ các phương trình được trình bày theo hệ tọa độ dq0 [1-3].

2.1. Phương trình điện áp trên hệ tọa độ dq0

Phương trình cân bằng điện áp theo hệ trục tọa độ dq0 xác định như sau:

$$\begin{cases} R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \lambda_{qs} = v_{ds} \\ R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds} = v_{qs} \\ R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} = 0 \\ R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} = 0 \end{cases} \quad (0)$$

Trong đó:

- + $v_{ds}, v_{qs}, v_{dr}, v_{qr}$: điện áp stator, rôto theo trục d và trục q;
- + $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$: dòng điện stator, rôto theo trục d và trục q;
- + $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}, \lambda_{dr}, \lambda_{qr}$: từ thông stator, rôto theo trục d và trục q;
- + R_s, R_r : điện trở stator và điện trở rôto;
- + ω_e, ω_r : tốc độ góc của hệ quy chiếu và tốc độ quay của rôto.

2.2. Phương trình từ thông trên trục dq

Phương trình từ thông theo hệ trục tọa độ dq được xác định như sau:

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:

- + L_s : điện cảm stator;
- + L_r : điện cảm rôto;
- + L_m : điện cảm từ hóa.

2.3. Phương trình mômen điện từ

Phương trình mômen điện từ được xác định như sau:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

2.4. Phương trình tốc độ của động cơ

Phương trình tốc độ của động cơ:

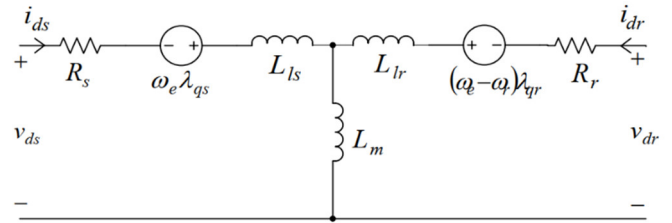
$$\omega_r = \int \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \quad (4)$$

Trong đó:

- + T_e : mômen điện từ;
- + T_L : mômen tải;
- + P : số cực của động cơ;
- + J : mô men quán tính.

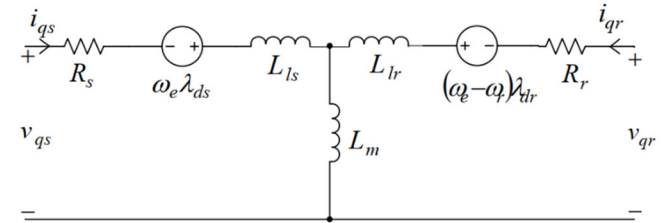
Từ các phương trình của mô hình toán SCIM được mô tả ở công thức (1), (2), (3), (4), SCIM được biểu diễn dưới dạng sơ đồ mạch điện thay thế như ở hình 2 và 3 [1-3].

Sơ đồ mạch điện thay thế dọc trục (trục d):



Hình 2. Sơ đồ mạch điện thay thế của SCIM theo trục d

Sơ đồ mạch điện thay thế ngang trục (trục q):



Hình 3. Sơ đồ mạch điện thay thế của SCIM theo trục q

3. MÔ PHỎNG ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆN TƯỢNG SỤT ĐIỆN ÁP THOÁNG QUA BA PHA TÁC ĐỘNG LÊN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

Bài báo ứng dụng mô hình toán để mô phỏng SCIM và hiện tượng MTVS, từ kết quả mô phỏng sẽ đánh giá ảnh hưởng của MTVS tác động lên SCIM. Bên cạnh đó bài báo sử dụng Matlab/Simulink để mô phỏng SCIM từ mô hình toán và áp dụng cho một SCIM ba pha 37kW, 4 cực. Thông số của SCIM thử nghiệm ba pha như tại bảng 1.

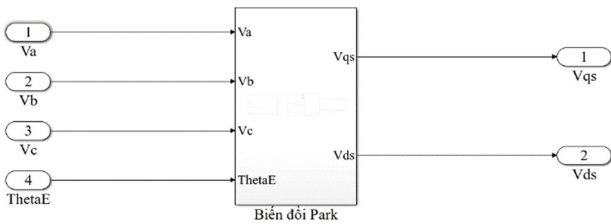
Bảng 1. Thông số của SCIM thử nghiệm

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Công suất định mức	P_{dm}	3.700	W
Dòng điện định mức (Δ/Y)	I_{dm}	68,6/39,6	A
Điện áp định mức (Δ/Y)	U_{dm}	380/660	V
Tần số	f	50	Hz
Điện trở stator	R_s	0,087	Ω
Điện cảm stator	L_s	35,5	mH
Điện trở rôto	R_r	0,228	Ω
Điện cảm rôto	L_r	35,5	mH
Điện cảm từ hóa	L_m	34,7	mH
Mômen quán tính	J	1,662	kg.m ²
Mômen tải định mức	T_L	100	N.m
Số cực	P	4	

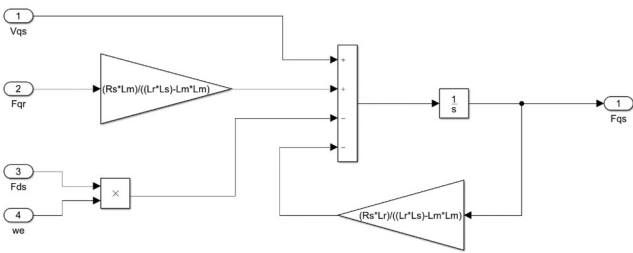
3.1. Mô phỏng hiện tượng sụt điện áp ba pha thoáng qua trên lưới điện phân phối và động cơ không đồng bộ

Các khối khi mô phỏng SCIM từ mô hình toán và khối sơ đồ mô phỏng hiện tượng MTVS với phần mềm

Matlab/Simulink. Khối mô phỏng chuyển đổi điện áp từ hệ abc sang hệ tọa độ dq0 và khối tính toán từ thông theo hệ tọa độ dq được giới thiệu như hình 4, 5.

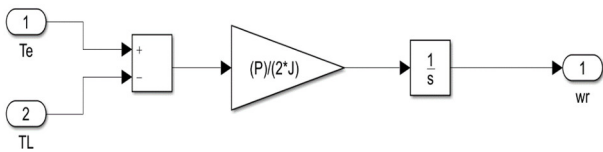


Hình 4. Khối mô phỏng biến đổi điện áp ba pha sang hệ trục tọa độ dq



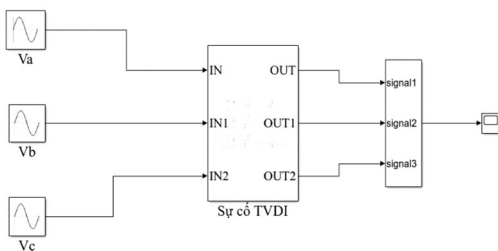
Hình 5. Khối tính toán từ thông theo hệ tọa độ dq

Phương trình tính toán tốc độ của SCIM được xác định như khối tại hình 6.

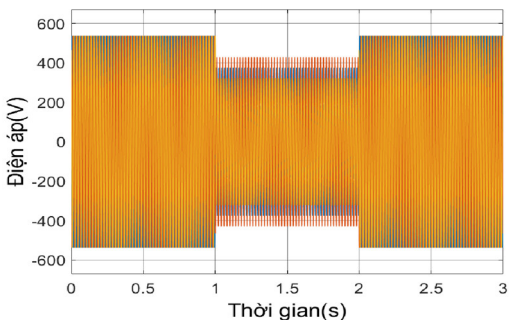


Hình 6. Khối tính toán tốc độ của động cơ

Hình 7 là khối mô phỏng hiện tượng MTVS trên LĐPP và dạng sóng điện áp ba pha của hiện tượng MTVS.



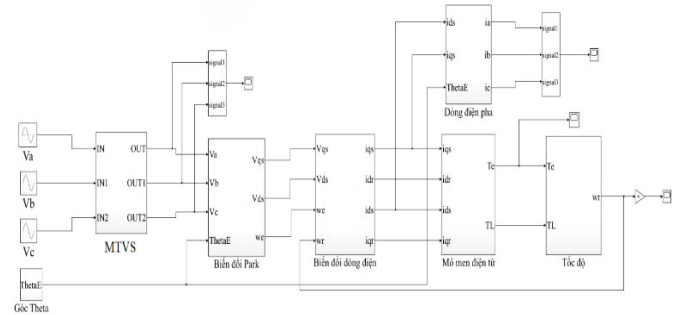
a) Khối mô phỏng hiện tượng MTVS



b) Dạng sóng điện áp mô phỏng hiện tượng MTVS

Hình 7. Khối mô phỏng hiện tượng MTVS

Mô hình tổng thể của mô phỏng ảnh hưởng của hiện tượng MTVS lên SCIM như hình 8.



Hình 8. Mô hình mô phỏng tổng thể của SCIM khi xảy ra hiện tượng MTVS

3.2. Mô phỏng ảnh hưởng của hiện tượng sụt điện áp ba pha thoáng qua đối với động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc

Trong mục 3.1, bài báo đã giới thiệu mô phỏng mô hình toán của SCIM bằng các khối trong phần mềm Matlab/Simulink được mô tả như hình 4, 5, 6 và mô phỏng hiện tượng MTVS được thể hiện qua hình 7. Để mô phỏng ảnh hưởng của hiện tượng MTVS lên đối tượng SCIM, bài báo xây dựng một số kịch bản mô phỏng hiện tượng này.

Bài báo tập trung đánh giá và phân tích hai đặc tính chính của động cơ đó là: tốc độ và dòng điện pha khi xảy ra hiện tượng MTVS. Thời gian mô phỏng xuất hiện hiện tượng trên diễn ra trong 1s như vậy dải thời gian này là thuộc MTVS. Bài báo đề xuất mô phỏng với 3 kịch bản của hiện tượng MTVS như sau:

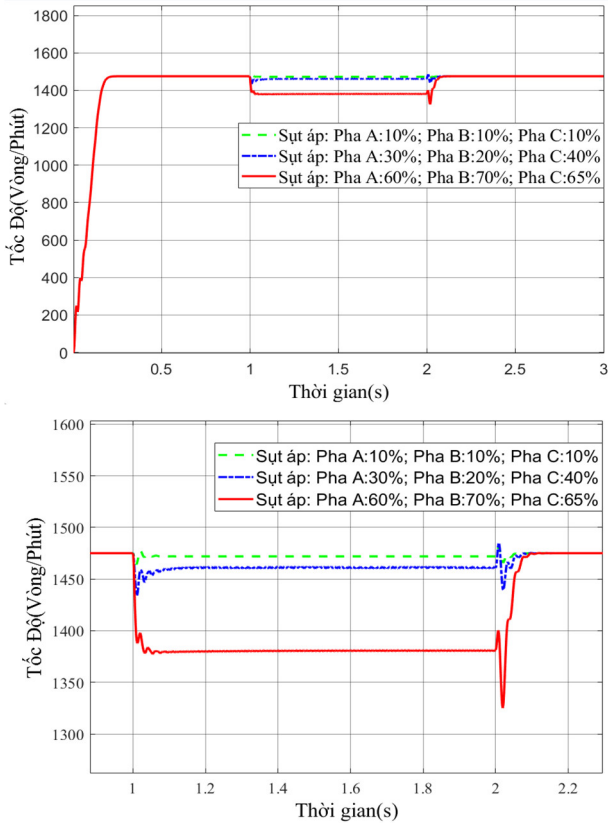
- Kịch bản 1: Pha A: 10%; Pha B: 10%; Pha C: 10%
- Kịch bản 2: Pha A: 30%; Pha B: 20%; Pha C: 40%
- Kịch bản 3: Pha A: 60%; Pha B: 70%; Pha C: 65%

Ba kịch bản trên nhằm mục đích như sau:

- + Kịch bản 1: Điện áp trên các pha bị sụt điện áp như nhau
- + Kịch bản 2: Điện áp các pha bị sụt điện áp khác nhau nhưng mức độ sụt áp < 50% giá trị điện áp danh định của hệ thống
- + Kịch bản 3: Điện áp các pha bị sụt điện áp khác nhau nhưng mức độ sụt giảm điện áp > 50% giá trị điện áp danh định của hệ thống.

Rõ ràng là với ba kịch bản trên thì về cơ bản đã tổng quát đánh giá chung cho hiện tượng MTVS xảy ra trên hệ thống LĐPP.

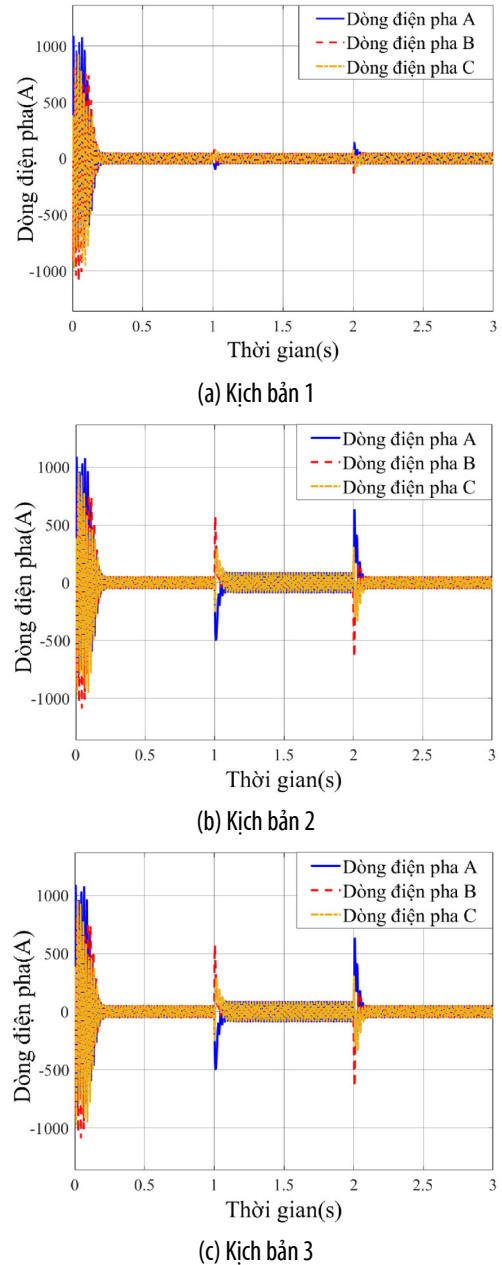
Sau khi mô phỏng ảnh hưởng hiện tượng MTVS lên SCIM thử nghiệm, kết quả mô phỏng được thể hiện như hình 9, 10. Hình 9 là đặc tính tốc độ SCIM khi có hiện tượng MTVS.



Hình 9. Đường đặc tính tốc độ của SCIM với kích bản hiện tượng MTVS

Từ đặc tính tốc độ của SCIM như hình 9 có thể nhận thấy: Với mức độ sụt giảm điện áp xảy ra trên các pha $\leq 50\%$ (đang xét đến TH1 và TH2) khi bắt đầu xảy ra hiện tượng MTVS, tốc độ giảm xuống còn khoảng 1.434 vòng/phút (chênh lệch 2,77% so với giá trị định mức). Sau đó, tốc độ động cơ tăng dần và sau 0,15s thì bắt đầu đi vào ổn định, dao động xung quanh một giá trị mới là 1.461 vòng/phút với biên độ $\pm 0,08\%$. Khi hiện tượng MTVS kết thúc, lúc này tốc độ động cơ có sự biến đổi mạnh, tốc độ tăng lên đến 1.485 vòng/phút (chênh lệch 0,68% với giá trị định mức). Khoảng 0,15s sau khi kết thúc sự cố, tốc độ động cơ ổn định về giá trị định mức. Đối với trường hợp mức độ sụt giảm điện áp $> 50\%$ (đang xét đến TH3) khi xảy ra sự cố, tốc độ giảm xuống thấp còn khoảng 1.388 vòng/phút (5,9% so với giá trị định mức), sau đó tốc độ dao động và tiếp tục giảm xuống, khoảng 0,1s sau dao động xung quanh giá trị tốc độ mới 1380 vòng/phút với biên độ $\pm 0,07\%$. Khi kết thúc hiện tượng MTVS, tốc độ của động cơ biến đổi rất mạnh, tốc độ tăng lên 1.400 vòng/phút và sau đó giảm đột ngột xuống còn 1.325 vòng/phút. Sau đó, tốc độ tăng dần lên (do tốc độ giảm xuống rất thấp nên thời gian để ổn định kéo dài hơn) và đi vào làm việc ổn định với tốc độ định mức sau 0,2s.

Đặc tính dòng điện pha mô phỏng của SCIM khi xảy ra hiện tượng MTVS được thể hiện qua hình 10.



Hình 10. Đặc tính dòng điện của SCIM với các kịch bản hiện tượng MTVS khác nhau

Qua hình 10 nhận thấy, khi xuất hiện hiện tượng MTVS ở LĐPP cấp cho động cơ thì đặc tính dòng điện stato bị sự ảnh hưởng đáng kể. Ở thời điểm quá độ (lúc xuất hiện hiện tượng và kết thúc hiện tượng MTVS) thì mức độ sụt áp càng lớn thì dòng điện đỉnh trong quá độ càng lớn, lớn nhất ở kịch bản số 3. Bên cạnh đó tại kịch bản số 3, dòng điện đạt giá trị lớn nhất (dòng điện pha A - Kịch bản 3 - hình 10c) là 355A gấp 5,2 lần dòng định mức của động cơ ($I_{dmđc} = 68,6A$) và xấp xỉ 60% dòng điện khởi động của nó. Như vậy rõ ràng là khi xảy ra hiện tượng MTVS trong LĐPP, ở pha có mức sụt áp lớn thì dòng điện quá độ trên pha đó sẽ lớn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu hiện tượng thường xuất hiện trong LĐPP đó là sụt giảm điện áp ngắn hạn. Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng MTVS lên phụ tải SCIM, trong đó MTVS là một điển hình của sụt giảm điện áp ngắn hạn. Trong nội dung bài báo sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để mô phỏng hai đặc tính chính của SCIM là: tốc độ và dòng điện. Để nghiên cứu hiện tượng MTVS, bài báo đề xuất một số kịch bản với các mức độ sụt áp trên các pha khác nhau. Sau khi mô phỏng, các kết quả cho thấy khi xảy ra hiện tượng MTVS với mức độ sụt giảm điện áp phần trăm > 50% thì tốc độ và dòng điện SCIM có xu hướng biến đổi rất lớn trong thời gian quá độ (tốc độ thì có xu hướng giảm xuống, dòng điện có xu hướng tăng). Tốc độ biến đổi lớn trong quá trình quá độ sẽ dẫn đến tăng độ rung, độ ồn cho động cơ. Nếu thời gian quá độ dài có thể dẫn đến phá hỏng kết cấu cơ khí, gây khó chịu cho người vận hành bởi tiếng ồn. Với đặc tính dòng điện, mức độ sụt giảm điện áp trên pha lớn, dòng quá độ tăng. Trong trường hợp pha A ở kịch bản số 3 dòng quá độ đỉnh có thể đạt đến 60% dòng khởi động lớn nhất, như vậy nếu thời gian quá độ hiện tượng MTVS kéo dài sẽ gây quá nhiệt cho cuộn dây stato. Vì vậy, người sử dụng SCIM cần có những giải pháp để thời gian xảy ra hiện tượng MTVS là ngắn nhất. Bên cạnh đó, động cơ cần có thiết bị giám sát và bảo vệ cắt ra khỏi LĐPP đối với mức độ suy giảm điện áp quá lớn vượt mức độ cho phép của động cơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Leedy A.W., "Simulink/Matlab dynamic induction motor model for use as a teaching and research tool," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 3, 4, 102-107, 2013.
- [2]. Bhagyashree M. S., R. Adappa, "Modelling and simulation of an induction machine," *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, Nitte Conference on Advances in Electrical Engineering (NCAEE)*, 4, 2, 2016.
- [3]. Bellure A., Aspalli M. S., "Dynamic d-q model of induction motor using simulink," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 24(5), 252-257, 2015,
- [4]. Okoro O.I., "Matlab simulation of induction machine with saturable leakage and magnetizing inductances," *The Pacific Journal of Science and Technology*, 5(1), 5-15, 2003.
- [5]. L. A. Tuan, H. Q. Huy, "Study the working characteristics of three-phase asynchronous motors when a temporary voltage drop occurs on one phase," in *National Conference on Smart Technologies and Applications for Industry 4.0*,

Smart City, and Sustainability (STAIS-2023), Vinh University of Technology Education, 293-300, 2023

- [6]. Khanh B.Q., Thang N.C., "Prediction of voltage sags in distribution systems with regard to tripping time of protective devices," *Journal of Science and Technology - Technical Universities*, 71, 30-34, 2009.
- [7]. Dugan R. C., McGranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W., *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill, Manhattan, New York City, 2012.
- [8]. IEEE Standard 100-1992. *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*.
- [9]. Gómez J.C., Morcos. M.M., "Voltage sag and recovery time in repetitive events," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(4), 1037-1043, 2002.
- [10]. Carvalho F. J. M., Leborgne R. C., da Silveira P. M., Bollen M. H., "Voltage sag index calculation: Comparison between time-domain simulation and short-circuit calculation," *Electric Power Systems Research*, 78(4), 676-682, 2008.
- [11]. Hendry H., Eteruddin H., Atmam A., "Analysis of Voltage Sag Due to Short Circuit on the Sub System in Central Sumatera," *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering (IJEPESE)*, 1(2), 1-6, 2018.
- [12]. Han Y., Feng Y., Yang P., Xu L., Xu Y., Blaabjerg F., "Cause, classification of voltage sag, and voltage sag emulators and applications: A comprehensive overview," *IEEE Access*, 8, 1922-1934, 2019.

AUTHORS INFORMATION

Le Anh Tuan, Hoang Quang Huy, Vu Anh Tuan

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam