

Khởi động mềm động cơ KĐB-3P công suất lớn: Cơ sở lý thuyết và ứng dụng

Soft Starting of High Power Three Phase Induction Motor: Theory and Applications

Lê Duy Vỹ¹, Hồ Đình Hùng¹, Phạm Bảo Chung¹ và Nguyễn Mạnh Linh^{1,*}

¹Đại Học Bách Khoa Hà Nội

*Tác giả liên hệ: linh.nguyenmanh@hust.edu.vn

Abstract

In most heavy-industry, three-phase asynchronous motors have become an inevitable piece of equipment that transforms electrical into mechanical power due to their simple and reliable structure. One major problem with the high-power motor is starting, since direct-on-line starting of high-power motors usually cause voltage sag and over-current which may affect other equipments in the same network. Besides, most heavy machines are sensitive to high acceleration and jerking of mechanical parts. So, having a thorough understanding of soft starting solutions for high-power three-phase asynchronous motors is extremely important to electrical engineers. In this research, the most being-used soft-starting solutions of three-phase induction motors are reviewed with in-depth analysis. Based-on numerical simulations carried-out with the two most popular loads: pump/fan and dry-friction, the reader can see the effectiveness of each soft-starting method intuitively

Keywords: Soft starter, Variable frequency drive, Cascaded H-bridge inverter, Three-phase asynchronous motor

Ký hiệu

| Ký hiệu | Đơn vị | Ý nghĩa |
|------------|----------|--------------------------------|
| r_s, r_r | Ω | Điện trở của stato và rô-to |
| x_s, x_r | Ω | Điện kháng rò của stato, rô-to |
| x_m | Ω | Điện kháng từ hóa |
| J | kgm^2 | Momen quán tính |

Danh mục từ viết tắt

| | |
|----------|--------------------------------------|
| PI | Bộ điều khiển kiểu tỉ lệ - tích phân |
| ĐCKĐB-3P | Động cơ không đồng bộ 3 pha |
| KĐM-3P | Khởi động mềm 3 pha |
| VFD | Biến tần |
| CHB-MLI | Biến tần đa mức cầu H xếp chồng |
| THD | Độ méo sóng hài |
| DTC | Điều khiển trực tiếp mô men |
| PLL | Vòng khóa pha |

Tóm tắt

Trong hầu hết các ngành công nghiệp nặng, động cơ không đồng bộ ba pha đã trở thành một thiết bị không thể thiếu để biến điện năng thành cơ năng và ngược lại, do cấu trúc đơn giản và độ tin cậy cao

của chúng. Một trong những vấn đề của động cơ công suất lớn là khởi động, vì hầu hết các máy hạng nặng đều nhạy cảm với tốc độ biến thiên quá nhanh của vận tốc và gia tốc. Bên cạnh đó, việc khởi động trực tiếp động cơ công suất lớn thường gây ra hiện tượng sụt áp, quá dòng và do đó ảnh hưởng tiêu cực không chỉ đến bản thân động cơ mà còn đến các thiết bị khác trong cùng mạng lưới. Vì vậy, việc hiểu biết cặn kẽ về các giải pháp khởi động mềm cho ĐCKĐB-3P công suất lớn là vô cùng quan trọng đối với mỗi kỹ sư điện. Trong nghiên cứu này, các giải pháp khởi động mềm được sử dụng nhiều nhất cho động cơ KĐB-3P trong thực tế được đề cập kèm theo các phân tích chuyên sâu. Thông qua các mô phỏng được thực hiện với hai loại tải phổ biến nhất là bơm/quạt và ma sát khô, bạn đọc có thể thấy được hiệu quả của từng giải pháp khởi động mềm và cách áp dụng vào thực tế.

1. Giới thiệu chung

Động cơ không đồng bộ ba pha là một loại động cơ điện hoạt động dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ, được sử dụng cực kỳ rộng rãi trong công nghiệp lẫn dân dụng, ở hầu hết các dải công suất. Nhờ nguyên lý hoạt động đơn giản, kết cấu bền vững và dễ bảo dưỡng, ĐCKĐB-3P đặc biệt được ưa dùng đối với các hệ truyền động công suất lớn như quạt ly tâm lò hơi dùng để cấp gió hoặc rút khói lò, hệ thống bơm cấp/thoát nước, quạt thông gió ở các hầm mỏ, hệ băng tải vận chuyển nguyên vật liệu thô... Một trong những vấn đề chính đối với những hệ

truyền động này là vấn đề khởi động. Xét ở khía cạnh cơ học, việc khởi động trực tiếp ĐCKĐB-3P công suất lớn khiến mô men điện từ tăng nhanh và dao động mạnh dẫn đến độ giật lớn, có thể gây ảnh hưởng xấu đến các kết cấu cơ khí của hệ thống. Đối với lưới điện và bản thân động cơ, việc khởi động trực tiếp khiến dòng điện có thể tăng tới 6 lần dòng định mức của động cơ, dẫn đến hiện tượng sụt áp lưới điện. Khi điện áp bị suy giảm, các thiết bị bảo vệ điện áp thấp có thể tác động cắt các phụ tải nhạy cảm. Ngoài ra, do mô men điện từ bị suy giảm theo tỉ lệ bình phương với điện áp stator, quá trình tăng tốc của động cơ diễn ra chậm hơn, khiến thời gian duy trì dòng điện lớn hơn dòng định mức bị kéo dài và dễ dẫn đến quá nhiệt, gây tổn hại đến lớp cách điện của dây cuộn động cơ.

Để khắc phục hiện tượng trên, một số giải pháp đơn giản sử dụng các thiết bị thụ động như: đổi nối sao/tam giác, thêm điện kháng phía stator, thêm điện trở phụ phía rotor đối với máy điện rotor dây cuộn [1, 2]. Với giải pháp đổi nối sao/tam giác, nhược điểm lớn nhất là mô men khởi động bị suy giảm tới 3 lần, đồng thời do điện áp tăng đột ngột tại thời điểm chuyển đổi sao/tam giác khiến hệ thống có độ giật lớn. Do đó, phương án này chỉ phù hợp chủ yếu nhóm tải nhẹ như bơm/quạt công suất nhỏ.

Với phương án sử dụng cuộn kháng stator, mức độ suy giảm điện áp và mô men điện từ tùy thuộc vào giá trị điện cảm. Tuy nhiên, hiện tượng dòng điện và mô men bị dao động khi nối lưới vẫn không thể tránh khỏi. Riêng với giải pháp sử dụng điện trở phụ rotor dành cho máy điện rotor dây cuộn, mô men khởi động không những không suy giảm mà còn được cải thiện, do đó đặc biệt được ưa dùng cho nhóm tải nặng như máy nén, máy nghiền, cơ cấu nâng hạ. Tuy nhiên do tổn thất lớn, số lần khởi động/dừng trong một khoảng thời gian nhất định sẽ bị hạn chế.

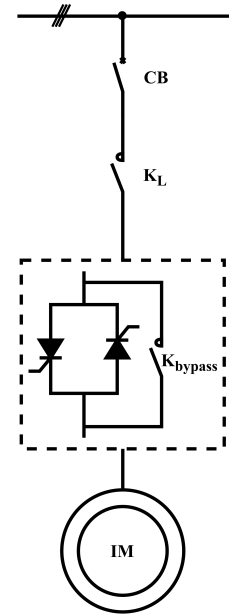
Với sự phát triển mạnh mẽ của linh kiện bán dẫn và điện tử công suất, các vấn đề về khởi động ĐCKĐB-3P công suất lớn vừa nêu ở trên đã được khắc phục một cách tương đối triệt để bằng thiết bị khởi động mềm và biến tần. Bài báo này sẽ tập trung phân tích, đánh giá ưu nhược điểm của các phương án khởi động dựa trên bộ biến đổi bán dẫn, và đặc biệt đi sâu vào phân tích các thuật toán được sử dụng bên trong các thiết bị này. Qua đó giúp người đọc có được cái nhìn toàn diện và sâu sắc, tạo cơ sở để lựa chọn giải pháp và thiết bị một cách đúng đắn cho các ứng dụng thực tế.

2. Khởi động mềm

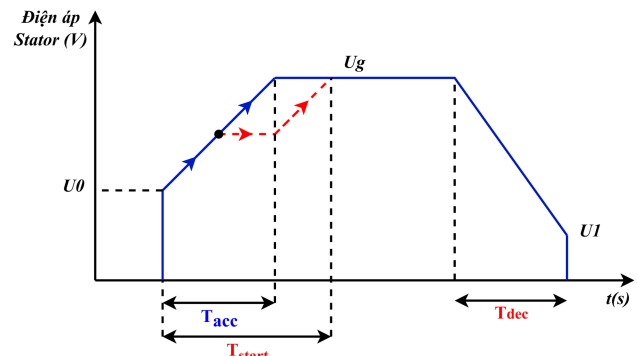
Khởi động mềm (KĐM) là thiết bị dựa trên bộ điều áp xoay chiều sử dụng Thyristor, được sử dụng rộng rãi để khởi động các ĐCKĐB-3P [3, 4]. Cấu trúc cơ bản của một bộ KĐM-3P được mô tả bởi hình 1, bao gồm 3 cặp van Thyristor mắc song song ngược cùng một bộ tiếp điểm có nhiệm vụ chuyển động cơ sang nối lưới khi kết thúc quá trình khởi động. Để sử dụng KĐM-3P một cách hợp lý, cần hiểu rõ không chỉ kiến trúc phần cứng, mà còn cả cấu trúc điều khiển bên trong. Do đó, các phương án điều khiển KĐM-3P sẽ lần lượt được làm rõ ngay sau đây.

2.1. KĐM-3P theo nguyên lý điều chỉnh điện áp

Điều chỉnh điện áp phía stator là nguyên lý được cài đặt trong mọi bộ khởi động mềm trên thị trường. Đường đặc tính làm việc của KĐM theo nguyên lý này được mô tả ngắn gọn bởi đặc tính khởi động/dừng ở hình 2 và họ đặc tính cơ như hình



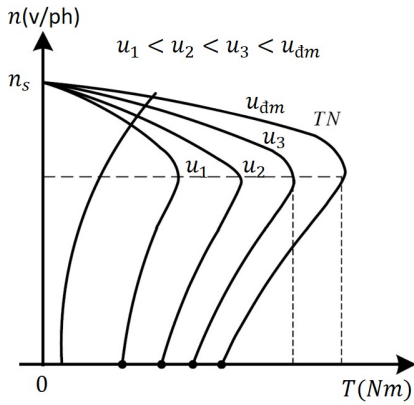
Hình 1. Cấu trúc cơ bản của một bộ KĐM-3P.



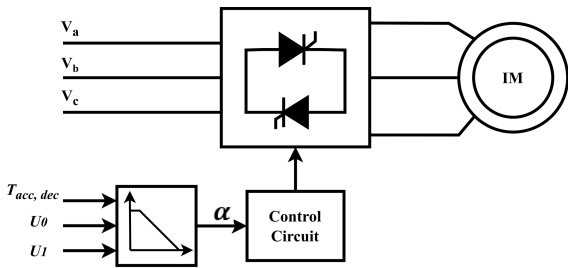
Hình 2. Cài đặt đặc tính khởi động cho KĐM-3P.

3. Người sử dụng, ngoài việc nhập các tham số cơ bản từ lưới điện và nhân động cơ, cần nhập thêm các thông tin bao gồm: điện áp ở thời điểm ban đầu U_0 , thời gian tăng tốc T_{acc} , thời gian giảm tốc T_{dec} , điện áp U_1 tại đó xung điều khiển sẽ bị ngắt trong quá trình dừng mềm, và giới hạn dòng điện lúc khởi động I_{limit} . Khi có lệnh chạy, góc mở của các Thyristor sẽ được điều chỉnh sao cho điện áp tăng dần từ giá trị ban đầu U_0 đến điện áp của lưới điện trong khoảng thời gian T_{acc} . Nếu quá trình khởi động diễn ra suôn sẻ, tức là thời gian T_{acc} được lựa chọn phù hợp với quán tính cơ của hệ thống, và động cơ không bị quá tải do các sự cố bất thường, thì dòng điện stator I_s luôn thỏa mãn $I_s \leq I_{limit}$. Và khi đó công tắc tơ K_{bypass} sẽ nối lưới tại thời điểm $t = T_{acc}$. Trong trường hợp dòng điện vượt quá giá trị cần hạn chế trong quá trình tăng tốc, điện áp sẽ không tăng theo đường đặc tính cài đặt mà sẽ được duy trì không đổi tại thời điểm xảy ra quá dòng, cho đến khi dòng điện suy giảm dưới ngưỡng giới hạn thì điện áp mới tiếp tục tăng. Như vậy, thời gian khởi động T_{start} lúc này sẽ bị kéo dài hơn so với thời T_{acc} đã cài đặt.

Cấu trúc điều khiển cho KĐM-3P theo nguyên lý điện áp được minh họa ở hình 4. Trong đó hệ điều khiển bao gồm một khối tạo đặc tính khởi động/dừng mềm với các thông số cài đặt là: U_0 , T_{acc} , T_{dec} , và U_1 như đã đề cập ở trên. Trong quá trình khởi động, góc mở Thyristor sẽ giảm dần từ giá trị ban đầu α_0 tương



Hình 3. Họ đặc tính cơ KĐM-3P khi điều chỉnh điện áp stator.



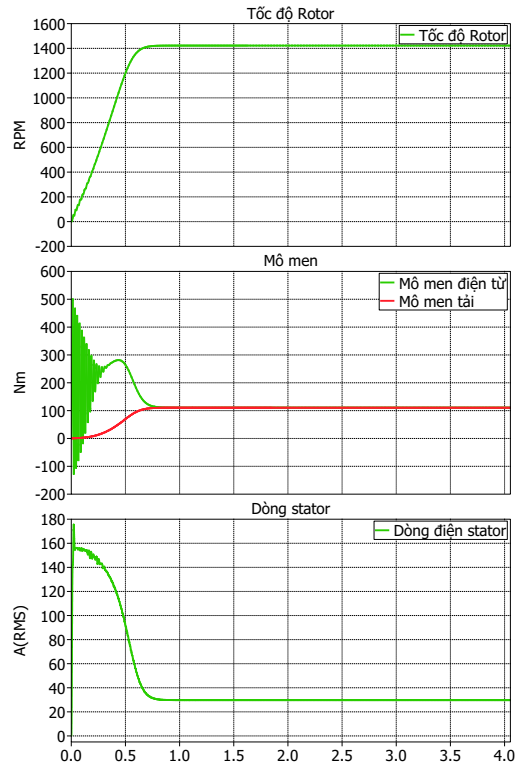
Hình 4. Cấu trúc điều khiển điện áp stator.

Bảng 1. Tham số của động cơ hạ thế.

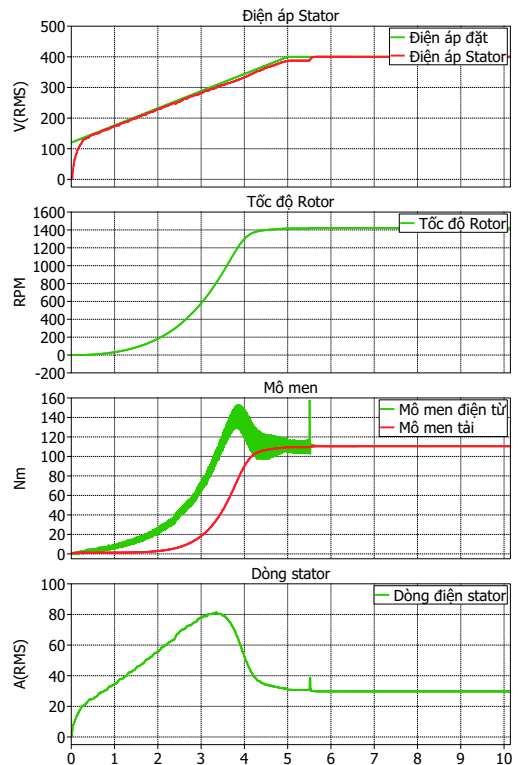
| | |
|-----------------------|---------|
| Công suất định mức | 18.5kW |
| Điện áp định mức | 400V |
| Tần số | 50Hz |
| Dòng điện định mức | 34.5A |
| Tốc độ định mức | 1477rpm |
| Mô-men định mức | 119Nm |
| Bội số dòng khởi động | 7.2 |

ứng với điện áp U_0 , tới giá trị nhỏ nhất α_{min} tương ứng mức điện áp lưới, thường $\alpha_{min} > \varphi$ với $\cos \varphi$ là hệ số công suất của động cơ [5]. Kết quả của quá trình khởi động theo phương án này có thể được quan sát qua hình 6, trong đó các thông số của động cơ dùng trong mô phỏng được cung cấp bởi bảng 1. Có thể thấy so với khởi động trực tiếp như hình 5, phương án dùng KĐM-3P với thời gian tăng tốc T_{acc} phù hợp giúp hạn chế được dòng khởi động từ 160A xuống 80A, đồng thời dao động của mô men điện từ cũng giảm rõ rệt.

Có hai điều cần lưu ý khi sử dụng khởi động mềm. Thứ nhất là thời gian tăng tốc T_{acc} , đây là thông số do người sử dụng cài đặt. Việc cài đặt thời gian tăng tốc quá nhỏ sẽ dẫn tới tốc độ tăng trưởng điện áp quá nhanh so với tốc độ tăng trưởng tốc độ rotor - tức là sức phản điện động tương đương của động cơ, và dẫn tới giá trị đỉnh của dòng điện lúc khởi động sẽ lớn. Hình 7 minh họa quá trình khởi động với $T_{acc} = 1s$. Để thấy lúc này giá trị đỉnh của dòng điện lên tới 140A, lớn hơn hẳn so với trường hợp $T_{acc} = 5s$. Việc chọn T_{acc} phù hợp trong thực tế thường phụ thuộc vào cấp công suất, loại tải và kinh nghiệm của người vận hành. Tuy nhiên, nếu có thể tính toán được mô men quán tính tổng J của hệ thống, T_{acc} có thể được lựa chọn



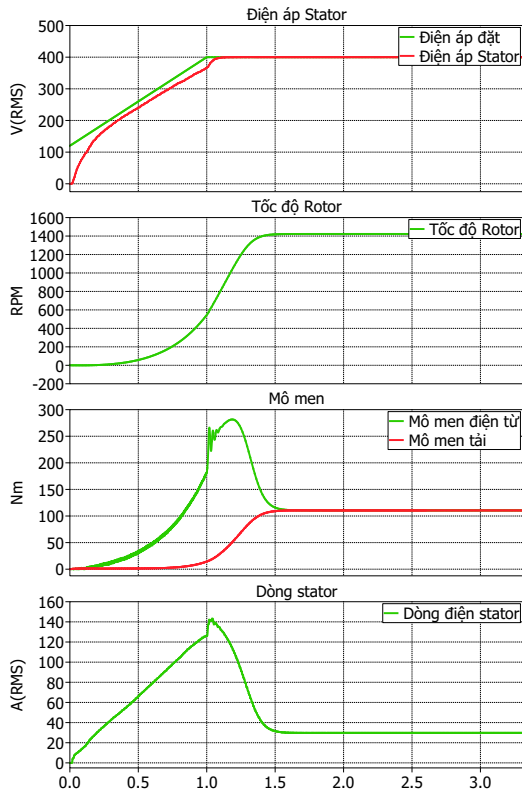
Hình 5. Khởi động trực tiếp động cơ KĐB-3P với tải bơm/quạt.



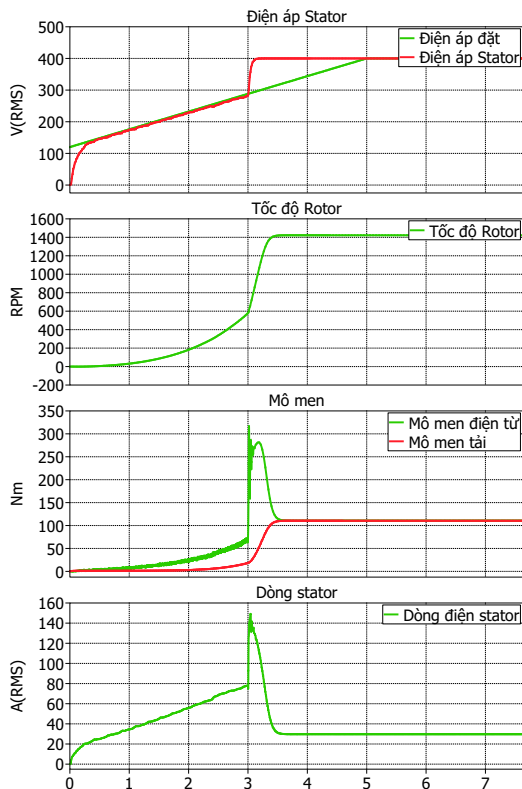
Hình 6. Quá trình khởi động theo phương án điều khiển điện áp với tải bơm/quạt.

sơ bộ như sau. Xét phương trình cơ học của hệ truyền động:

$$T_e - T_L = \frac{J}{9.55} \frac{dN}{dt} \tag{1}$$



Hình 7. Quá trình khởi động với thời gian tăng tốc T_{acc} nhỏ



Hình 8. Ảnh hưởng của việc nối lưới khi chưa có tín hiệu cho phép từ KĐM

Trong đó T_e là mô men điện từ của động cơ, T_L là mô men tải. Xét riêng đối với quá trình khởi động, (1) được viết lại như sau:

$$T_e - T_L = \frac{J}{9.55} \frac{N_{rated}}{t_{start}} \quad (2)$$

$$\rightarrow t_{start} = \frac{J}{9.55} \frac{N_{rated}}{T_e - T_L} \quad (3)$$

Với N_{rated} là tốc độ định mức của động cơ, và t_{start} là thời gian khởi động. Từ (3) ta có thể thấy t_{start} phụ thuộc vào hai biến là mô men điện từ của động cơ và đặc tính tải dẫn đến rất khó để giải được phương trình này. Tuy nhiên để thấy trong thực tế, động cơ sẽ khởi động nhanh nhất khi không tải, và chậm nhất khi đầy tải. Dẫn đến:

$$\frac{J}{9.55} \frac{N_{rated}}{T_e - T_{L,0}} \leq \frac{J}{9.55} \frac{N_{rated}}{T_e - T_L} \leq \frac{J}{9.55} \frac{N_{rated}}{T_e - T_{rated}} \quad (4)$$

Gọi T_{LR} là mô men khởi động của động cơ, từ (4) dễ thấy thời gian tăng tốc T_{acc} nên được chọn lớn hơn thời gian khởi động nhanh nhất lúc đầy tải, do trong quá trình khởi động theo phương án tăng dần điện áp, mô men luôn bị suy giảm so với mô men khởi động tối đa của động cơ, dẫn đến ta có mối quan hệ sau:

$$T_{acc} > \frac{J}{9.55} \frac{N_{rated}}{(T_{LR} - T_{rated})} \quad (5)$$

Điểm chú ý thứ hai là thời điểm nối lưới động cơ. Đây không phải tham số mà người sử dụng có thể can thiệp, tuy nhiên trong một số tình huống đặc biệt, ví dụ như dùng một bộ KĐM-3P để khởi động tuần tự các động cơ, người sử dụng chỉ được phép nối động cơ vào lưới khi nhận được tín hiệu cho phép từ KĐM-3P. Nếu tự ý nối động cơ vào lưới khi chưa có tín hiệu từ KĐM, nguy cơ xảy ra quá dòng và dao động mô men điện từ rất cao. Lý do là lúc này thực chất động cơ chưa đạt đến tốc độ tối đa, việc nối lưới sớm dẫn đến chênh lệch giữa điện áp lưới và sức phản điện động của động cơ tăng đột ngột, kéo theo đó là dòng điện tăng mạnh. Hiện tượng này có thể được quan sát qua kết quả mô phỏng ở hình 8.

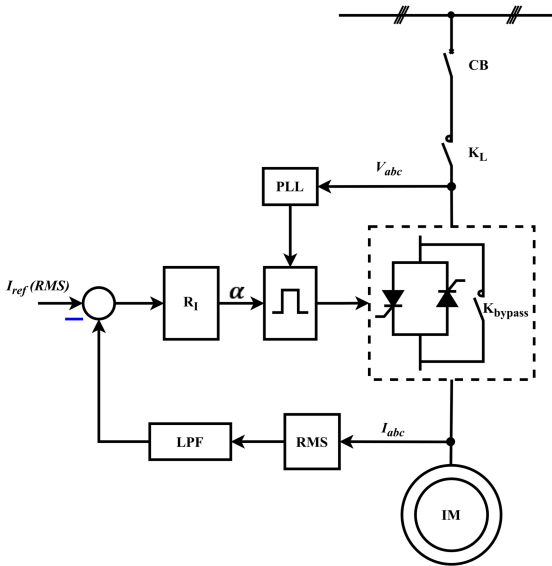
Việc lựa chọn điện áp ban đầu U_0 để cài đặt cho KĐM-3P được thực hiện dựa trên cơ sở sau. Dựa vào mã hiệu động cơ, chúng ta có thể tìm thấy các thông số như mô men định mức T_{rated} , mô men khởi động T_{LR} . Do là thiết bị chỉ điều chỉnh một thông số duy nhất là điện áp stator, ta có mối quan hệ:

$$\frac{T_L}{T_{LR}} = \left(\frac{U_{start}}{U_{rated}}\right)^2 \quad (6)$$

Trong đó T_L chính là mô men tải quy đổi về trục động cơ lúc khởi động. Từ (6), có thể tính sơ bộ điện áp ban đầu U_0 như sau:

$$U_0 > U_{start} = U_{rated} \sqrt{\frac{T_L}{T_{LR}}} \quad (7)$$

Mặc dù (7) có thể được sử dụng để tính toán điện áp khởi động, nhưng đây chỉ là tính toán gần đúng ở chế độ xác lập. Trong thực tế, mô men điện từ và dòng điện có động học gần như nhau và luôn chậm hơn so với điện áp stator. Điều này có thể dễ dàng được quan sát ở hình 6. Hay nói một cách đơn giản, phương án điều chỉnh điện áp stator phát huy mô men chậm, chủ yếu phù hợp với tải bơm/quạt, loại tải này có đặc thù là mô men khởi động ban đầu nhỏ. Với tải có dạng ma sát khô như cơ



Hình 9. Cấu trúc điều khiển dòng điện của KĐM-3P.

cấu di chuyển, luôn yêu cầu áp đặt ngay lập tức mô men khởi động lớn để thắng ma sát tĩnh, phương án này tỏ ra không phù hợp. KĐM-3P với thuật toán điều khiển dòng điện, hoặc điều khiển trực tiếp mô men (DTC) có thể khắc phục được nhược điểm này.

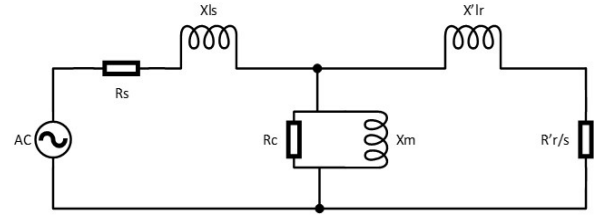
2.2. KĐM-3P theo nguyên lý điều khiển dòng điện

Cấu trúc điều khiển dòng điện cho KĐM-3P được mô tả ở hình 9. Do sử dụng van bán điều khiển Thyristor, việc thực hiện các thuật toán điều khiển dòng điện trên hệ tọa độ quay tương tự như biến tần là không thể. Do đó, cấu trúc thường được sử dụng là điều khiển dòng hiệu dụng I_{rms} phía stator [6, 7]. Dòng điện đo về trước tiên đi qua bộ lọc để loại bỏ các thành phần sóng hài bậc cao, sau đó chuyển sang giá trị hiệu dụng. Bộ điều khiển đơn giản kiểu PI được sử dụng để đảm bảo trong quá trình khởi động, dòng điện stator bám giá trị do người sử dụng cài đặt. Với cấu trúc này, người sử dụng có thể tùy ý cài đặt dòng điện theo đặc tính tăng dần, hoặc giữ không đổi trong quá trình khởi động. Các kết quả mô phỏng với hai nhóm phụ tải bơm/quạt - thường được gọi là nhóm phụ tải nhẹ, và nhóm tải ma sát khô - hay còn gọi là tải nặng, ở các hình 11 và 12 cho thấy phương án này phát huy mô men điện từ nhanh hơn nhờ áp đặt nhanh dòng điện stator. Do đó có thể sử dụng tốt cho hầu hết các loại tải trong thực tế. Một điểm cần lưu ý ở đây là bộ điều khiển dòng điện chỉ có khả năng bám lượng đặt trong khoảng thời gian tăng tốc, khi tốc độ động cơ còn tương đối thấp. Có thể giải thích hiện tượng này đơn giản dựa trên sơ đồ tương đương một pha của động cơ KĐB-3P như mô tả ở hình 10. Để thấy dòng điện stator I_s được mô tả bởi phương trình

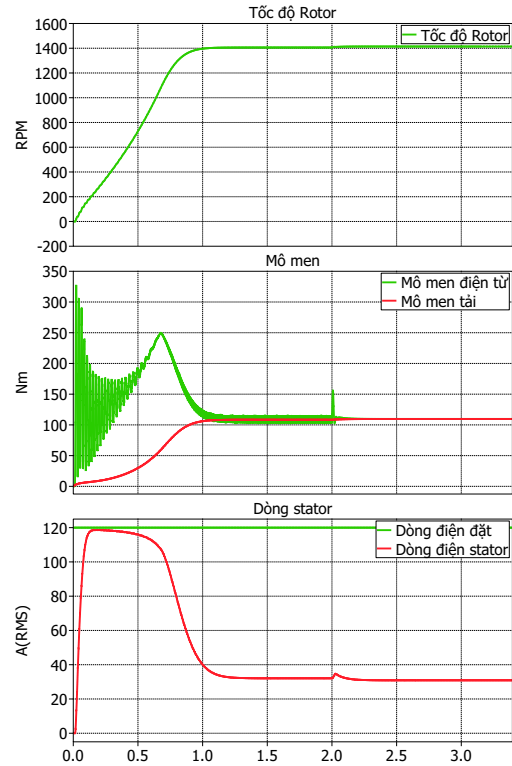
$$I_s = \frac{V_s}{R_c^2 + X_m^2} + \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R'_r}{s})^2 + (X_{ls} + X'_{lr})^2}} \tag{8}$$

trong đó R_s, X_{ls} , là các thông số mạch stator; R'_r, X'_{lr} là thông số mạch rotor quy đổi về stator; và R_c, X_m là thông số mạch từ hóa.

Phương trình (8) cho thấy khi động cơ chạy chậm, tương ứng với hệ số trượt s lớn, tổng trở tương đương của động cơ còn nhỏ, và do đó hệ thống còn độ dự trữ điện áp để có thể khống



Hình 10. Sơ đồ tương đương một pha của động cơ KĐB-3P.



Hình 11. Quá trình khởi động theo phương án điều khiển dòng điện với tải bơm/quạt.

chế dòng điện. Còn khi động cơ tiệm cận tốc độ định mức tương ứng hệ số trượt s rất nhỏ, tổng trở tương đương một pha lúc này lớn nhất. Điều này dẫn đến không còn độ dự trữ điện áp để khống chế dòng điện theo giá trị mong muốn, thường là gấp 2.5 đến 4 lần giá trị dòng định mức trong thực tế.

2.3. Điều khiển trực tiếp mô-men

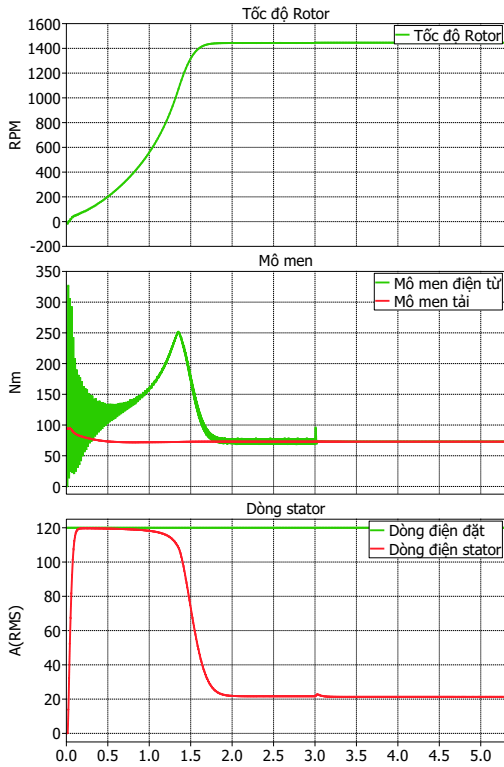
Với những phụ tải có yêu cầu đặc thù, ví dụ như cần khống chế gia tốc, độ giật trong quá trình khởi động, việc kiểm soát trực tiếp mô men (DTC) của động cơ trong suốt quá trình này là cần thiết. Trong tình huống này, khởi động mềm với tính năng DTC tỏ ra hữu dụng. Hình 13 minh họa một cấu trúc DTC điển hình dành cho KĐM-3P.

Như ta đã biết, mô men điện từ, từ thông và dòng điện động cơ có mối quan hệ:

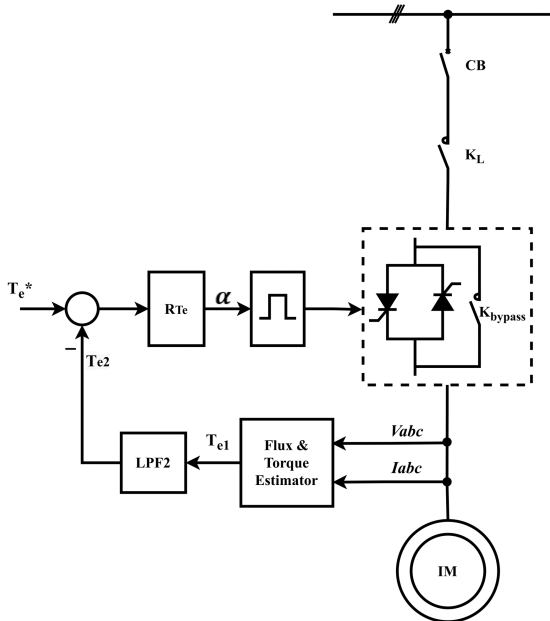
$$\lambda_{\alpha\beta} = \int (V_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) dt \tag{9}$$

$$T_e = \frac{3 P_p}{2} \lambda_{\alpha\beta} \times i_{\alpha\beta} = \frac{3 P_p}{2} (\lambda_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} - \lambda_{\beta\alpha} i_{\beta\alpha}) \tag{10}$$

Trong đó $\lambda_{\alpha\beta}, i_{\alpha\beta}$ là các thành phần từ thông và dòng điện



Hình 12. Quá trình khởi động theo phương án điều khiển dòng điện với tải ma sát khô.



Hình 13. Cấu trúc điều khiển trực tiếp mô men dành cho KĐM-3P.

stator trên hệ tọa độ vuông góc $\alpha\beta$. Đối với biến tần, do dòng điện stator động cơ có dạng hình sin với độ méo sóng hài nhỏ, ước lượng từ thông và từ đó tính toán mô men điện từ theo (9) và (10) không quá khó khăn. Tuy nhiên, các đại lượng trên KĐM-3P không có dạng hình sin do phương pháp điều khiển cắt pha dựa trên van Thyristor. Điều này dẫn đến một loạt các vấn đề cần giải quyết như: giảm thiểu các thành phần sóng hài bậc cao, loại bỏ ảnh hưởng của hiện tượng trôi tích phân do

sự xuất hiện của thành phần một chiều không thể tránh khỏi trong (9). Điều này dẫn đến cấu trúc điều khiển của KĐM-3P theo nguyên lý DTC phức tạp hơn. Một phương án để thực hiện thuật toán DTC trên KĐM-3P được minh họa ở hình 14 [8], trong đó một số kỹ thuật được áp dụng.

Ở phía đầu vào, các bộ lọc thông cao (HPF) được sử dụng để loại bỏ ảnh hưởng của thành phần một chiều (dc-offset) trong tín hiệu đo về. Tiếp đến, thay vì trực tiếp tính từ thông bằng một khâu tích phân như (9), một bộ lọc thông thấp (LPF) kết hợp với một bộ bù (CF) được sử dụng. Kỹ thuật này giúp giảm thiểu ảnh hưởng của các thành phần sóng hài bậc cao trong tín hiệu đo. Xét một khâu tích phân cơ bản trên miền ảnh Laplace:

$$W_{Int} = \frac{1}{s} \tag{11}$$

Để thấy đặc tính biên độ và góc pha của (11) là:

$$\phi_{Int} = -\frac{\pi}{2} \tag{12}$$

$$M_{Int} = \frac{1}{\omega}$$

Các thông số tương ứng của một bộ lọc thông thấp bậc nhất là:

$$W_{LPF} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

$$\phi_{LPF} = \arctan 2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \tag{13}$$

$$M_{LPF} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}}$$

Trong đó ω và ω_c lần lượt là tần số tín hiệu vào, và tần số cắt của bộ LPF. Rõ ràng hành vi của bộ LPF khác hoàn toàn với một bộ tích phân. Do đó, một bộ bù W_{CF} cần được thiết kế sao cho:

$$W_{Int} = W_{LPF}W_{CF} \tag{14}$$

Từ (14) dễ dàng rút ra được:

$$W_{CF} = \frac{W_{Int}}{W_{LPF}} = \frac{M_{Int} \angle \phi_{Int}}{M_{LPF} \angle \phi_{LPF}} \tag{15}$$

Sau đó, thay (12) và (13) vào (15) ta có:

$$W_{CF}(j\omega) = M_{CF} [\cos(\phi_{CF}) + j \sin(\phi_{CF})] \tag{16}$$

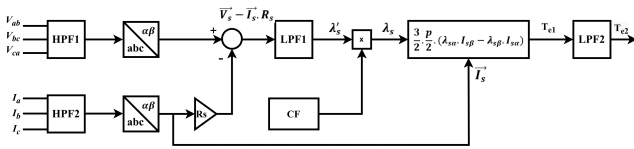
Với:

$$\phi_{CF} = -\frac{\pi}{2} + \arctan 2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \tag{17}$$

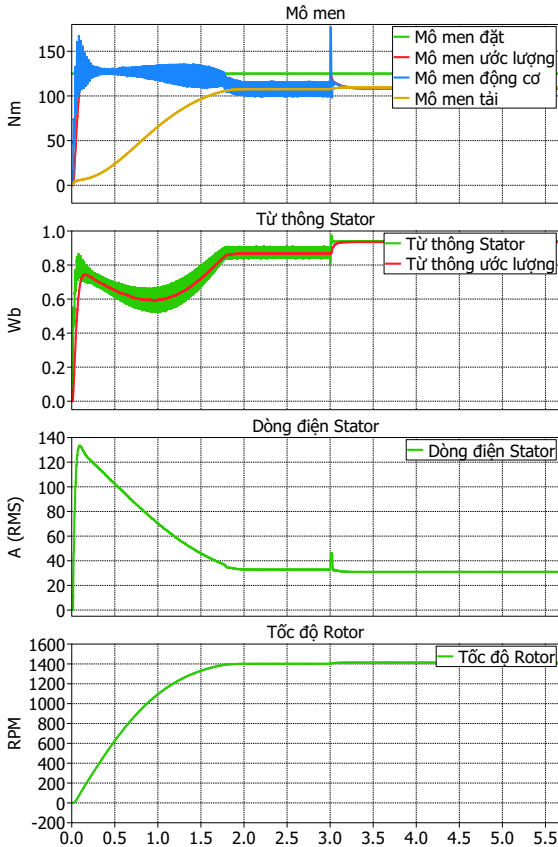
$$M_{CF} = \frac{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}}{\omega \omega_c}$$

Với từ thông ước lượng được từ (13) và (17), ta có thể tính mô men điện từ theo (10). Để tiếp tục giảm bớt độ đập mạch của mô men điện từ trong phép ước lượng, một bộ lọc thông thấp LPF2 tiếp tục được sử dụng ở tầng cuối cùng.

Hình 15 và 16 cung cấp kết quả mô phỏng quá trình khởi động tải bơm/quạt và ma sát khô theo phương án DTC. Để thấy giải pháp này giúp phát huy nhanh chóng mô men điện từ theo lượng đặt. Qua đó, người sử dụng có thể tùy biến đường đặc tính khởi động theo yêu cầu phụ tải, đặc biệt là nhóm tải nặng, hoặc cần quá trình khởi động êm với độ giật hạn chế. Một điểm cần lưu ý đối với phương án DTC, đó là do mục tiêu điều khiển là bám lượng đặt mô men điện từ, nên dòng điện không được khống chế. Do đó cần cân nhắc tình trạng của lưới điện khi sử dụng phương án này.



Hình 14. Cấu trúc khối ước lượng mô-men.

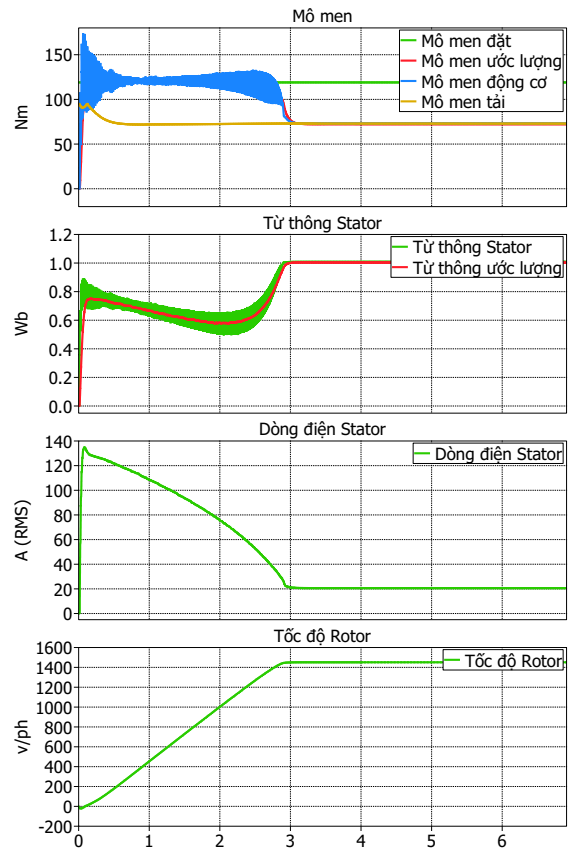


Hình 15. Quá trình khởi động theo phương pháp DTC với tải bơm/quạt.

3. Khởi động mềm bằng biến tần

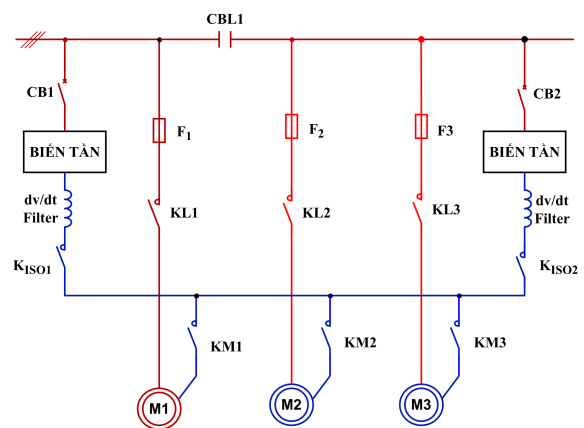
3.1. Cấu trúc hệ thống

Có thể thấy KĐB-3P với các tính năng kể trên có thể giải quyết hầu hết các bài toán về khởi động trong thực tế. Tuy nhiên trong một số ứng dụng đặc thù, ví dụ như hệ thống bơm trung thế gồm nhiều máy bơm, ngoài yêu cầu về khởi động thì hệ thống còn có yêu cầu về điều chỉnh lưu lượng. Hay nói một cách đơn giản, là hệ thống có khả năng chỉnh thô thông qua việc nối các động cơ vào lưới, và chỉnh tinh lưu lượng thông qua bộ biến đổi. Và trong tình huống này, các bộ KĐB-3P đã trình bày ở trên không thể đáp ứng được yêu cầu công nghệ do không có tính năng điều chỉnh tốc độ động cơ bơm. Để giải quyết bài toán kỹ thuật này, hai phương án thường dùng trong thực tế được mô tả bởi sơ đồ một sợi ở hình 17 và 18 [9]. Trong đó, có thể bố trí hai biến tần hoạt động luân phiên như mô tả ở hình 17, hoặc một biến tần hoạt động chính và một khởi động mềm hoạt động khi biến tần gặp sự cố như ở hình 18. Lý do cho việc phải bố trí một bộ KĐM-3P ở đây là khi biến tần gặp sự



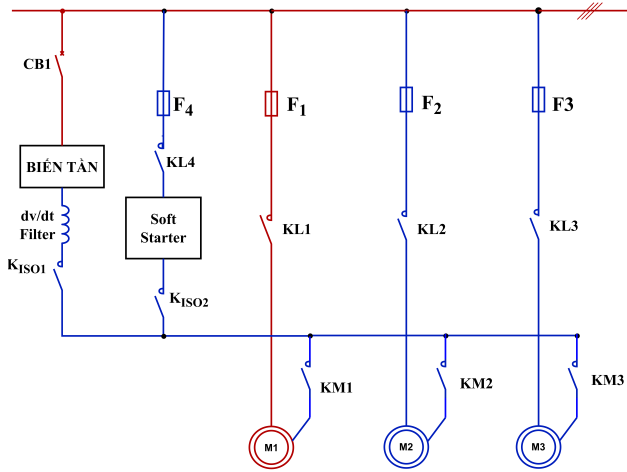
Hình 16. Quá trình khởi động theo phương pháp DTC với tải ma sát khô

cố, việc dừng đột ngột các máy bơm có cột áp cao, kích thước đường ống lớn gây ra hiện tượng "búa nước" rất nguy hiểm cho hệ thống đường ống. Lúc này bộ KĐM-3P dự phòng sẽ giúp dừng mềm các máy bơm.

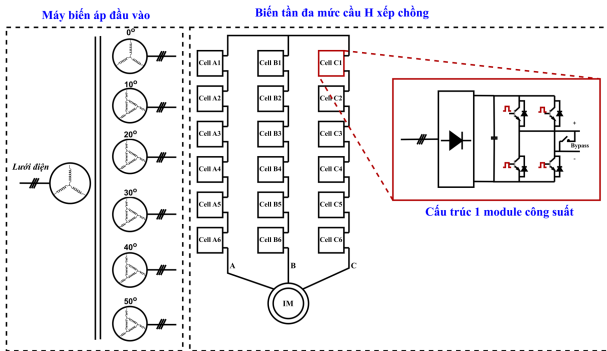


Hình 17. Sơ đồ một sợi trạm bơm trung thế với 2 biến tần hoạt động luân phiên.

Một vấn đề kỹ thuật quan trọng cần để ý đối với hai giải pháp trên, đó là các biến tần ngoài chức năng điều chỉnh, còn cần có khả năng khởi động và nối động cơ và lưới điện. Thông thường, các biến tần có đầu ra là một bộ nghịch lưu độc lập điện áp 3 pha, có nghĩa là các thông số đầu ra của biến tần như tần số, góc pha, và đặc biệt là giá trị tức thời của điện áp hoàn

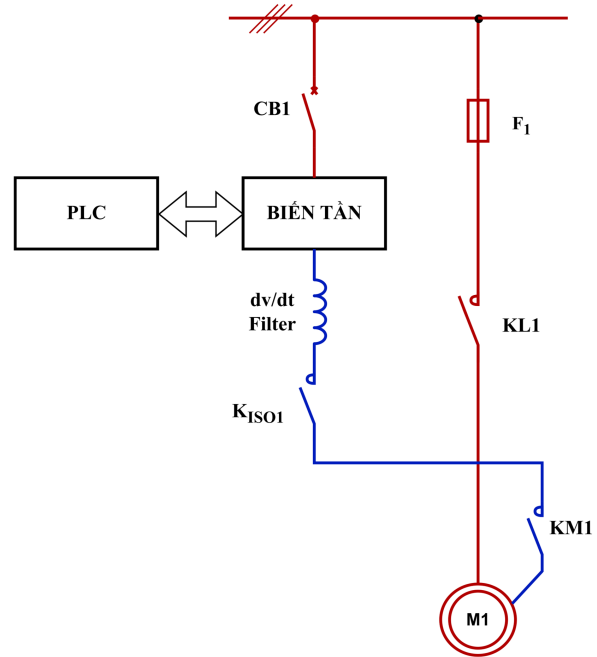


Hình 18. Sơ đồ một sợi trạm bơm trung thế với một biến tần và một KDM-3P dự phòng.



Hình 19. Cấu trúc nghịch lưu cầu H xếp chồng 13 mức.

toàn khác với lưới điện. Nếu thực hiện việc nối lưới động cơ theo nguyên lý "không đồng bộ", nghĩa là cắt biến tần rồi mới đóng động cơ vào lưới, nguy cơ xảy ra sự cố quá dòng và dao động mô men ở thời điểm nối lưới rất cao, gây ảnh hưởng xấu đến cả động cơ và hệ thống cơ khí. Lý do là ngay trước khi nối lưới, phía stator của động cơ không được cấp điện trong một khoảng thời gian ngắn, trong khi rotor vẫn quay theo quán tính. Do vẫn còn từ dư ở phía rotor, stator của động cơ lúc này vẫn xuất hiện một sức điện động cảm ứng mà mọi thông số như tần số, biên độ, góc pha đều không đồng bộ với lưới. Điều này dẫn đến ở thời điểm nối lưới ngay sau đó, dòng điện stator cùng với mô men điện từ tăng vọt và dao động khiến hệ thống cơ khí có độ giật lớn. Do đó, chỉ biến tần có tính năng "hòa đồng bộ lưới" mới có thể được sử dụng cho hai giải pháp trên, đồng thời giữa lưới và biến tần cần có một cuộn kháng để hạn chế dòng điện vòng giữa hai nguồn. Trong thực tế, biến tần trung thế cầu H xếp chồng (ML-CHB) [10] với cấu trúc như mô tả ở hình 19 kèm theo tính năng hòa đồng bộ lưới là giải pháp được sử dụng nhiều nhất [11]. Ngoài độ tin cậy cao nhờ khả năng vận hành ngay cả khi một vài module công suất gặp sự cố [12–14], dòng biến tần này còn có độ méo sóng hài của dòng điện phía lưới rất nhỏ nhờ cấu tạo đặc biệt của biến áp đầu vào, với các cuộn thứ cấp lệch pha góc $\gamma = \frac{360^0}{x}$ với x là số xung của sơ đồ chỉnh lưu, giúp hình thành nên sơ đồ chỉnh lưu nhiều xung [11]. Đặc biệt với tính năng hòa đồng bộ lưới, ML-CHB cho phép khởi động và nối động cơ vào lưới một cách êm ái mà không gây ra dao động về dòng điện và mô men.



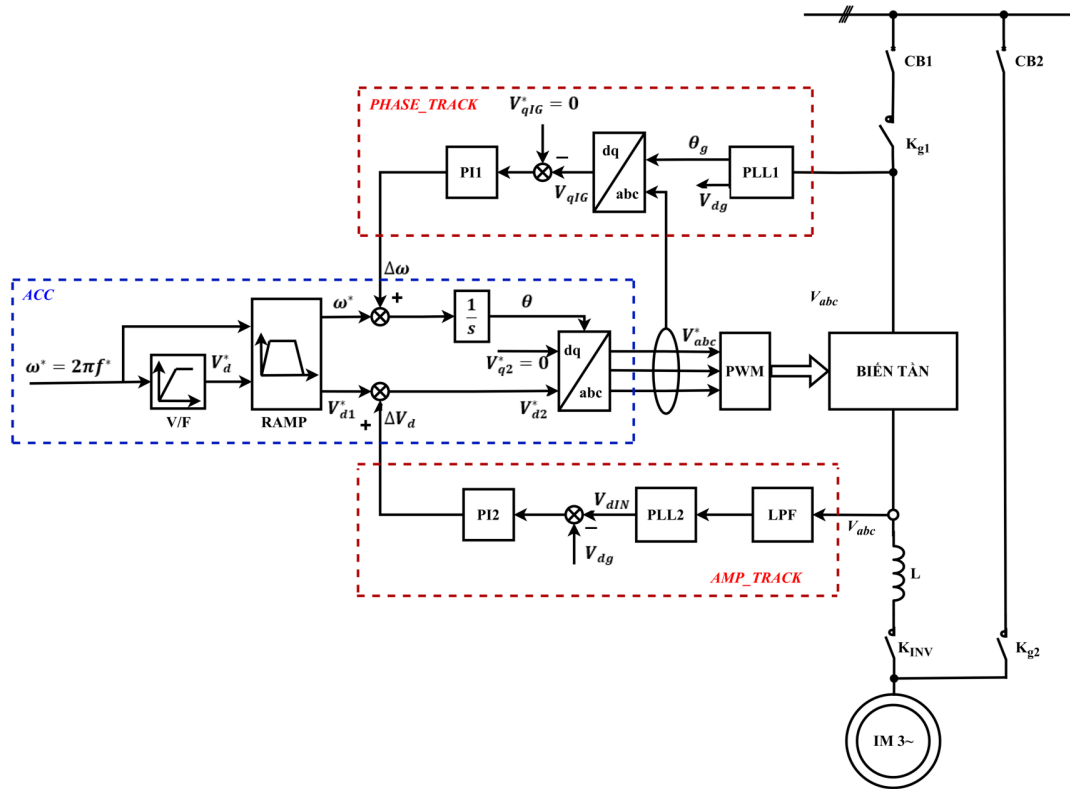
Hình 20. Sơ đồ một sợi hệ khởi động mềm bằng biến tần hòa đồng bộ lưới.

3.2. Quy trình khởi động bằng biến tần theo nguyên lý hòa đồng bộ

Như đã phân tích ở trên, nếu không đảm bảo các yêu cầu về hòa đồng bộ, cụ thể là phải đảm bảo các điều kiện về tần số, góc pha và biên độ, việc cho biến tần chạy song song với lưới sẽ dẫn đến sự cố ngắn mạch gây nguy hiểm cho biến tần và lưới điện. Do đó, quy trình khởi động theo nguyên lý đồng bộ lưới phải diễn ra theo một trình tự logic chặt chẽ. Xét sơ đồ một sợi của một hệ khởi động mềm bằng biến tần như hình 20, bao gồm một bộ PLC để xử lý các tín hiệu logic, một bộ biến tần AFD , một contactor nối lưới $KL1$ và một contactor phía đầu ra biến tần K_{M1} . Quy trình khởi động được thực hiện theo các bước sau:

Algorithm 1 Quy trình khởi động theo nguyên lý hòa đồng bộ

- 1 Hệ điều khiển trung tâm gửi tín hiệu hòa đồng bộ lưới tới PLC
- 2 PLC gửi tín hiệu hòa đồng bộ tới biến tần
- 3 Biến tần tự động tăng tốc động cơ đến tần số và điện áp lưới
- 4 Biến tần thực hiện thuật toán đồng bộ điện áp ra với lưới điện
- 5 Biến tần gửi tín hiệu xác nhận đã đồng bộ lưới về PLC
- 6 PLC ra lệnh đóng contactor nối lưới K_{L1}
- 7 Biến tần chờ tín hiệu xác nhận đã đóng K_{L1}
- 8 Biến tần cắt xung điều khiển và ra lệnh mở contactor đầu ra K_{M1}
- 9 PLC tắt tín hiệu hòa đồng bộ tới biến tần, kết thúc quá trình khởi động



Hình 21. Cấu trúc điều khiển khởi động bằng biến tần.

3.3. Cấu trúc điều khiển khởi động theo nguyên lý hòa đồng bộ lưới

Mặc dù được ứng dụng rộng rãi trong ML-CHB, rất ít tài liệu mô tả cấu trúc điều khiển quá trình hòa đồng bộ lưới cài đặt bên trong biến tần. Do đó, nhóm tác giả có đề xuất một cấu hình điều khiển để minh họa quá trình này, với cấu trúc như hình 21. Trong đó, hệ điều khiển được chia thành 3 khối tương ứng với 3 giai đoạn của quá trình khởi động.

Khi nhận được lệnh hòa đồng bộ, hệ điều khiển tự động chuyển sang chế độ điều khiển V/F và tăng tốc động cơ lên tần số và điện áp lưới theo đường đặc tính tăng tốc đã cài đặt. Khi đã đạt tới tần số cơ bản, khối điều khiển PHASE_TRACK được kích hoạt để điện áp đầu ra biến tần đồng pha với lưới điện. Khối này có cấu trúc gồm một vòng khóa pha (PLL) với đầu vào là điện áp 3 pha phía lưới. Thông tin về góc pha của lưới θ_g được sử dụng cho bộ chuyển đổi tọa độ quay $abc \rightarrow dq$ với đầu vào là lượng đặt điện áp 3 pha mong muốn V_{abc}^* . Chừng nào điện áp đặt và điện áp lưới còn chưa đồng pha, thì đầu ra của khâu chuyển đổi tọa độ này còn có $V_{qIG} \neq 0$, tức là bộ điều khiển PI1 còn hiệu chỉnh tần số đặt để thực hiện quá trình đồng pha.

Sau khi khối PHASE_TRACK hoàn thành nhiệm vụ đồng pha, khối AMP_TRACK được kích hoạt để đảm bảo biên độ điện áp ra bám chặt biên độ điện áp lưới. Do điện áp đầu ra biến tần có hiện tượng đập mạch, trước tiên một bộ lọc thông thấp LPF được sử dụng để loại bỏ ảnh hưởng của thành phần tần số cao. Tiếp đến, bộ PLL2 sẽ cung cấp thông tin về biên độ điện áp đầu ra V_{dIN} của biến tần, giá trị này được so sánh với biên độ điện áp lưới V_{dg} lấy từ PLL1 [15]. Và bộ điều khiển PI2 sẽ có nhiệm vụ điều chỉnh lượng bù điện áp ΔV_d sao cho sai lệch $e = V_{dg} - V_{dIN} \rightarrow 0$.

Với cấu trúc này kết hợp với trình tự logic tuần tự như trên, hệ

Bảng 2. Tham số của động cơ trung thế

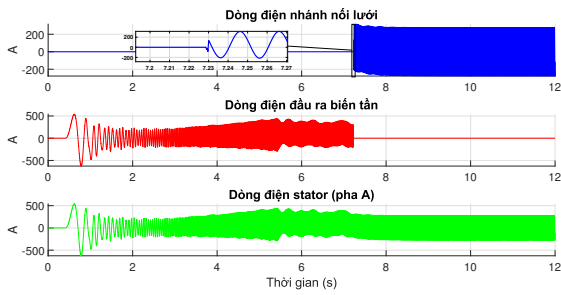
| | |
|--------------------|---------------------|
| Công suất định mức | 2850kW |
| Điện áp định mức | 6000V |
| Tần số | 50Hz |
| Dòng điện định mức | 335.841A |
| Tốc độ định mức | 992.263rpm |
| Mô-men định mức | 27442Nm |
| Hệ số công suất | 0.845 |
| Mô men quán tính | 275kgm ² |

điều khiển đảm bảo điện áp đầu ra biến tần bám chặt theo điện áp lưới cả về tần số, biên độ và góc pha, do đó đảm bảo quá trình hòa đồng bộ diễn ra mà không xảy ra sự cố quá dòng. Thuật toán trên được kiểm chứng thông qua mô phỏng với biến tần ML-CHB loại 6 module trên mỗi pha, và động cơ KĐB-3P trung thế có tham số cho ở bảng 2.

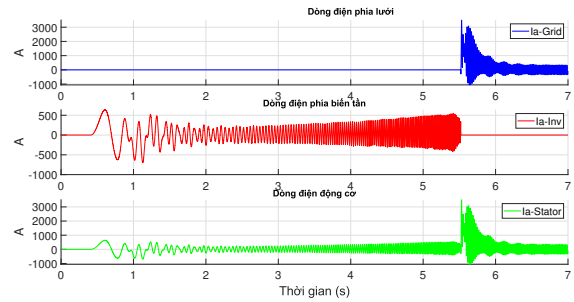
Kết quả quá trình khởi động mềm được minh họa ở các hình 22, 23, 24, 25 cho thấy hệ thống vận hành đúng như mong đợi, trong đó điện áp phát ra bởi biến tần bám chặt lưới ở cả ba thông số: biên độ, tần số và góc pha. Nhờ đó, dòng điện nhánh nối lưới và nhánh biến tần hầu như không có biến động ở thời điểm chuyển mạch. Trong khi đó, việc thực hiện quá trình nối lưới theo nguyên lý "không đồng bộ" khiến dòng điện tăng vọt như hình 26, gây ảnh hưởng xấu đến hệ truyền động.

4. Kết luận

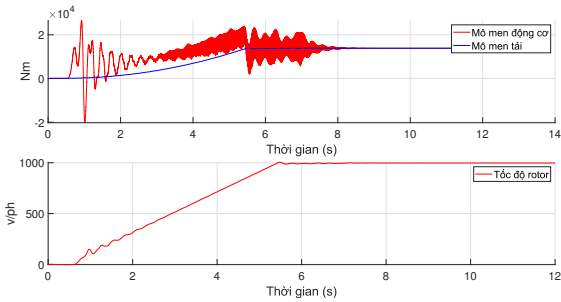
Trong nghiên cứu này, các biện pháp khởi động ĐCKĐB-3P công suất lớn dựa trên các bộ biến đổi như khởi động mềm và biến tần đa mức cầu H xếp chồng đã được trình bày một



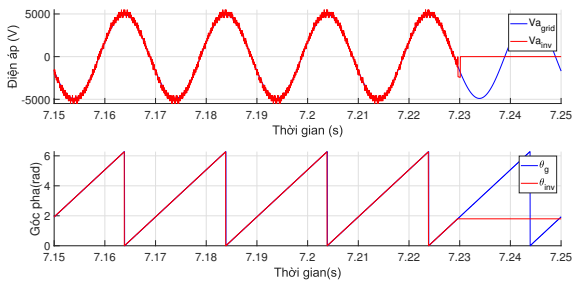
Hình 22. Dòng điện trong quá trình tăng tốc và hòa đồng bộ



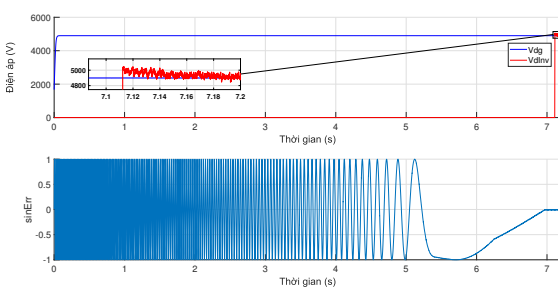
Hình 26. Quá trình nối lưới không đồng bộ



Hình 23. Quá trình tăng tốc của hệ truyền động



Hình 24. Điện áp và góc pha biến tần so với lưới ngay trước khi hòa đồng bộ



Hình 25. Điện áp trục d và sai lệch góc pha trong quá trình đồng bộ lưới

cách có hệ thống. Bằng cách kết hợp phân tích lý thuyết với mô phỏng tái tạo lại các tình huống thường xuất hiện trong thực tế, bài báo giúp người đọc không những nắm được các kiến thức quan trọng về kiến trúc phần cứng, mà còn hiểu rõ cả cấu trúc điều khiển cài đặt bên trong của các bộ biến đổi cũng như khả năng ứng dụng của các cấu trúc điều khiển này đối với từng nhóm phụ tải. Ngoài ra, việc nhìn rõ hành vi của hệ thống một cách trực quan thông qua các số liệu mô phỏng cũng góp phần giúp người đọc chuẩn đoán được một số sự cố thường gặp trong quá trình khởi động các hệ truyền động công suất lớn.

Các kết quả chính của nghiên cứu này có thể là nguồn tài liệu tham khảo hữu ích đối với các kỹ sư thiết kế hệ truyền động.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Đại học Bách khoa Hà nội, thuộc đề tài mã số T2022-PC-005

Tài liệu

- [1] Goh, Hui Hwang & M.S, Looi & Bc, Kok. (2009). Comparison between Direct-On-Line, Star-Delta and Auto-transformer Induction Motor Starting Method in terms of Power Quality. Lecture Notes in Engineering and Computer Science. 2175.
- [2] R. F. McElveen and M. K. Toney, "Starting high-inertia loads," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 1, pp. 137-144, Jan.-Feb. 2001, doi: 10.1109/28.903136.
- [3] ABB, "Soft starter handbook"
- [4] EaTon, "Solid-state soft start motor controller and starter"
- [5] Editor(s): Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 2011, Pages 1375-1389, ISBN 9780123820365, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382036-5.00048-3>.
- [6] G. Zenginobuz, I. Cadirci, M. Ermis and C. Barlak, "Soft starting of large induction motors at constant current with minimized starting torque pulsations," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, pp. 1334-1347, Sept.-Oct. 2001, doi: 10.1109/28.952509.
- [7] X. Li, J. Xu and H. Zhang, "Research on torque ramp current limit starting of induction motor based on dsPIC30F6014," 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2017, pp. 1627-1630, doi: 10.1109/ITNEC.2017.8285069.
- [8] A. Nied, J. de Oliveira, R. de Farias Campos, R. P. Dias and L. C. de Souza Marques, "Soft Starting of Induction Motor With Torque Control," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 3, pp. 1002-1010, May-june 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2045335..
- [9] Spencer, R., and J. Blois. "Pipeline energy management: using VFDs and sync-transfer control systems." Electrical Line Magazine 7 (2001).
- [10] Wu, Bin, and Mehdi Narimani. "High-power converters and AC drives." John Wiley & Sons, 2017.
- [11] Hoffmann Technics AG, "Medium Voltage VFD"
- [12] Van Chung, Mai, Trương Việt Hoàng, Nguyễn Vũ Cao, Vũ Hoàng Phương, and Nguyễn Văn Liên. "Nâng cao độ tin cậy của biến tần đa mức cấu trúc cầu H nối tầng trong hệ truyền động cho động cơ không đồng bộ." Measurement, Control, and Automation 1, no. 1 (2020): 8-8.
- [13] H. Lee, J. -W. Kang, B. -Y. Choi, K. -M. Kang and C. -Y. Won, "Fault-Tolerance Control for Power Equalization of Cascaded NPC/H-bridge Inverter System," 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), 2019, pp. 2479-2485, doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796867.
- [14] N. C. Khaire, M. A. Chaudhari and R. Kumar, "Fault-Tolerant Operation of 3-Phase 7-Level CHBMLI with Modified Neutral Point Shift Method," 2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPC2T53885.2022.9777090.
- [15] S. Golestan, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "Three-Phase PLLs: A Review of Recent Advances," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 3, pp. 1894-1907, March 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2565642.