**Nhận dạng tham số điện cảm stator động cơ đồng bộ từ trở  
bằng “phương pháp điện áp bước nhảy”**

Identification of the stator inductance of the synchronous reluctance motor by “voltage STEPPING method”

Hoàng Dũng, Nguyễn Đức Quận

Trường Cao đẳng Công nghệ - Đại học Đà Nẵng

Email: hdung@dct.udn.vn, ndquan@dct.udn.vn

**Tóm tắt -** Để thiết kế và tối ưu hóa hệ thống điều khiển cho một hệ truyền động điện, đòi hỏi mô hình và các tham số của máy điện phải được biết chính xác. Bài báo trình bày một phương pháp nhận dạng mới tham số điện cảm stator của động cơ đồng bộ từ trở bằng thực nghiệm, có tên gọi là phương pháp “điện áp bước nhảy”. Phần đầu của bài báo sẽ trình bày vắn tắt mô hình của động cơ đồng bộ từ trở trong không gian trạng thái. Sau đó chúng tôi thực hiện việc nhận dạng các tham số điện cảm bằng thực nghiệm đối với động cơ đồng bộ từ trở thực tế có công suất 15 kW, tốc độ 8.000 vòng/phút. Sử dụng các tham số điện cảm đã nhận dạng được để mô phỏng động cơ và so sánh với kết quả đo từ thí nghiệm. Sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng (dòng điện stator và các thành phần dòng id, iq) với kết quả đo thực tế thể hiện phương pháp nhận dạng mới là đáng tin cậy.

**Từ khóa -** Động cơ đồng bộ từ trở ; nhận dạng ; mô hình hóa ; mô phỏng ; điện cảm.

**Abstract -** To design and optimize the controller of an electric drive system, the model and parameters of an electrical machine must be well known. In this paper, a new experimental method for identifying a stator inductance of a synchronous reluctance motor, called “Voltage Stepping Method” is presented. The first part of the paper presents a brief model of a reluctance synchronous motor in state space. After that, we conduct an experiment to identify the inductance parameters of a 15 kW, 8.000 rpm synchronous reluctance motor. The identified parameters are used to simulate the motor performance. The simulation results are compared with the measurements from experimentation. The similarity between the simulation results (stator current and its components id,iq) and experimental measurement indicates the reliability of the new identification method.

**Key words -** Synchronous reluctance motor; identification; modeling; simulation; inductance.

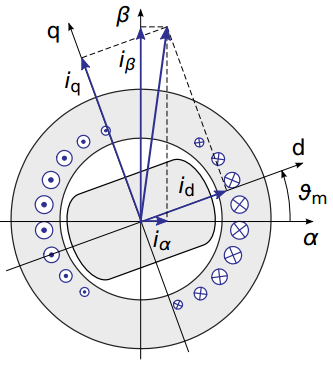
# Đặt vấn đề

Động cơ đồng bộ từ trở (Synchronous reluctance motor) bắt đầu được nghiên cứu vào đầu những năm 1920 [1][2] với việc đưa ra khái niệm mômen từ trở. Các nghiên cứu đầu tiên về loại động cơ này được thực hiện bởi J. K. Kostko vào năm 1923 [3].

Động Cơ Đồng Bộ Từ Trở (ĐCĐBTT) có nhiều ưu điểm do cấu trúc đơn giản và vững chắc. Stator của nó giống hệt stator của động cơ không đồng bộ hay động cơ đồng bộ truyền thống, rotor dạng cực lồi và đặc, không có cuộn dây hay nam châm vĩnh cửu, phù hợp cho những ứng dụng tốc độ cao và môi trường nhiệt độ cao. Do cấu trúc đơn giản nên dễ dàng chế tạo, giá thành rẻ hơn so với các loại động cơ khác cùng công suất. Nguyên lý hoạt động của nó dựa trên sự bất đối xứng từ [4][5]. Hiện nay ĐCĐBTT hoạt động trong một dải công suất rộng, từ 750 W đến 120 kW và tốc độ từ 3.000 vòng/phút đến 54.000 vòng/phút [6].

ĐCĐBTT được đặc trưng bởi hệ số lồi của rotor Ld/Lq, trong đó Ld và Lq lần lượt là điện cảm của stator theo các trục d và q trong hệ tọa độ chuyển đổi Park (hình 1).

Trong hầu hết các trường hợp điều khiển động cơ nói chung và ĐCĐBTT nói riêng, vấn đề nhận dạng để biết chính xác các tham số của động cơ là rất quan trọng. Nếu sự ước lượng các tham số của động cơ không chính xác sẽ dẫn đến sai số của bộ điều khiển, đặc biệt đối với điều khiển không cảm biến tốc độ. Đối với những tham số điện của ĐCĐBTT như điện trở stator, điện cảm stator theo trục d và trục q hay các tham số cơ như mômen quán tính, hệ số ma sát, có nhiều phương pháp nhận dạng đã được áp dụng [7][8] [9][10][11] và có những điểm khác nhau như phương tiện đo (nguồn cấp, thiết bị đo,…), độ chính xác của phép đo, mức độ phức tạp khi tính toán,... Trong bài báo này, các tác giả đề xuất một phương pháp thực nghiệm cho phép nhận dạng điện cảm stator của ĐCĐBTT theo cách ngoại tuyến (off-line), được gọi là phương pháp “điện áp bước nhảy”. Việc kiểm nghiệm độ tin cậy của phương pháp được đánh giá dựa trên sự so sánh kết quả mô phỏng một ĐCĐBTT thực tế có công suất 15 kWW và tốc độ 8.000 vòng/phút, trong đó sử dụng giá trị nhận dạng được của điện cảm stator, với các kết quả đo đạc thực tế được thực hiện trên động cơ này.



θ

**Hình 1:** Hệ tọa độ cố định αβ và hệ tọa độ quay dq

# Mô hình động cơ đồng bộ từ trở

## Phương trình điện áp trong hệ tọa độ abc

Với các giả thiết thông thường, mô hình ĐCĐBTT trong hệ tọa độ cố định stator được mô tả như sau [12]:

 (1)

trong đó:



 (2)

với [L] là ma trận điện cảm, có giá trị phụ thuộc vào vị trí góc θ được biểu diễn trên hình 1.

 (3)

Các hệ số điện cảm Lx và hỗ cảm Mxy trong ma trận [L] được biểu diễn như sau:



với 

## Phương trình điện áp trong hệ tọa độ quay d-q

Nếu chuyển tất cả các đại lượng ở (1) sang hệ tọa độ quay d-q thông qua phép biến đổi Park (hình 1), chúng ta sẽ được phương trình điện áp như sau [13]:

 ()

với 

Phương trình mômen và phương trình động học của động cơ được viết như sau:

 ()

 ()

# Mô tả bàn thí nghiệm

Để kiểm nghiệm độ tin cậy của phương pháp thực nghiệm về nhận dạng điện cảm stator của ĐCĐBTT được đề xuất, các tác giả tiến hành so sánh kết quả mô phỏng một ĐCĐBTT thực tế, trong đó sử dụng giá trị nhận dạng được của điện cảm stator, với các kết quả đo đạc thực tế được thực hiện trên động cơ này.

Các thí nghiệm đo đạc thực tế được thực hiện trên một bàn thí nghiệm (hình 2) tại Phòng thí nghiệm Điều khiển Máy điện của Trung tâm Nghiên cứu IREENA, Đại học Nantes, Cộng hòa Pháp. Đây là một bàn thí nghiệm chuyên về Điều khiền Máy điện tốc độ cao.

Bàn thí nghiệm bao gồm một ĐCĐBTT 3 pha có rotor đặc, cực lồi, công suất 15kW, tốc độ quay 8.000 vòng/phút. Động cơ này được kết nối trực tiếp với một động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu có chức năng như một phụ tải. Những tham số chính của ĐCĐBTT được trình bày ở Bảng 1.



Động cơ

đồng bộ NCVC

Động cơ

đồng bộ từ trở

**Hình 2:** Bàn thí nghiệm ĐCĐBTT

**Bảng 1:** Thông số của ĐCĐBTT dùng trong thí nghiệm

|  |  |
| --- | --- |
| ***Thông số*** | ***Giá trị*** |
| Tốc độ định mức | 8.000 vòng/phút |
| Công suất định mức | 15 kW |
| Số đôi cực | 1 |
| Dòng điện định mức | 40 A |
| Điện áp pha định mức | 230 V |

# Nhận dạng tham số ĐCĐBTT

## Xác định giá trị điện trở stator

Điện trở stator được xác định theo phương pháp truyền thống bằng thí nghiệm với điện áp một chiều theo phương pháp Volt-Amper. Phương pháp đo này rất đơn giản bằng cách cấp cho động cơ một điện áp một chiều với biên độ bé để có được dòng điện tương ứng với dòng định mức của động cơ. Sơ đồ nối dây được trình bày trên hình 3. Giá trị điện trở stator của động cơ ở trạng thái xác lập được xác định theo quan hệ sau:

 ()



**Hình 3:** Sơ đồ thí nghiệm xác định điện trở stator động cơ

Với ĐCĐBTT được sử dụng trong thực nghiệm mô tả ở mục 3 ngay bên trên, giá trị điện trở stator xác định được ở nhiệt độ 20°C là Rs = 120 m

## Nhận dạng giá trị điện cảm stator

Việc nhận dạng các giá trị điện cảm không hề đơn giản. Đó là lý do tại sao hiện nay có nhiều phương pháp xác định giá trị điện cảm đã được đề xuất. Tuy nhiên mức độ chính xác của từng phương pháp là hoàn toàn khác nhau. Trong tài liệu [10], Hwang và cộng sự đã đề xuất một phương pháp nhận dạng trực tuyến các tham số điện của ĐCĐBTT, tuy nhiên phương pháp này yêu cầu một hệ thống phức tạp và không kinh tế. Trong tài liệu [11], Senjyu và cộng sự thực hiện đo các tham số điện của ĐCĐBTT dựa trên mô hình của động cơ, phương pháp này đơn giản vì thực hiện khi động cơ ở trạng thái dừng, tuy nhiên độ chính xác của phương pháp đo này không đáng tin cậy. Trong bài báo này, các tác giả đề xuất một phương pháp thực nghiệm cho phép xác định giá trị điện cảm Ld theo trục d và Lq theo trục q của dây quấn stator ĐCĐBTT, được gọi là phương pháp “điện áp bước nhảy”. Phương pháp nhận dạng này được thực hiện khi động cơ đứng yên, do đó việc thực hiện nhận dạng rất đơn giản và cũng vì vậy nó thuộc loại phương pháp nhận dạng ngoại tuyến (off-line).



**Hình 4:** Sơ đồ thí nghiệm nhận dạng điện cảm

Để nhận dạng các giá trị điện cảm Ld và Lq của dây quấn stator, chúng ta cấp cho dây quấn này một điện áp một chiều có biên độ bé và tiến hành ghi lại đáp ứng dòng điện stator i(t). Các giá trị Ld và Lq được xác định dựa vào đáp ứng này.

Để xác định Ld và Lq, thí nghiệm được tiến hành khi rotor ở hai vị trí tương ứng với trục d và trục q trong hệ tọa độ dq (hình 4).

Để xác định giá trị điện cảm theo trục d (Ld), trước hết xoay trục của rotor theo trục của dây quấn pha a của stator (tương ứng với góc rotor θ = 0). Để làm việc này, cấp cho stator một điện áp một chiều đủ lớn và theo sơ đồ thí nghiệm, ib = ic = -ia/2 khiến cho rotor quay đến vị trí như mong muốn. Để xác định giá trị điện cảm trục q (Lq), ta xoay rotor đi một góc 90° so với trường hợp trước hoặc có thể thay đổi cách cấp nguồn một chiều vào dây quấn stator sao cho ia = 0 và ib = -ic, lúc này rotor sẽ quay đến vị trí cân bằng mới vuông góc với trục của dây quấn pha a ở stator (tương ứng với góc rotor θ = 90o). Trong 2 trường hợp trên, sau mỗi lần xoay trục của rotor đến vị trí mong muốn, chúng ta cần cố định rotor đứng yên trước khi thực hiện việc nhận dạng điện cảm.

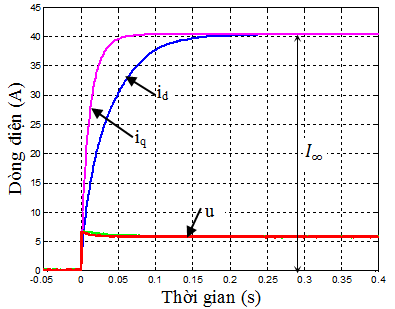
Tại vị trí cố định tương ứng của rotor, vào thời điểm  
t = 0, đóng khóa K, đưa nguồn một chiều vào mạch trong thời gian 0,4s. Đáp ứng dòng điện stator i(t) tại hai vị trí của rotor theo trục d và trục q như trên hình 5.

Các điện cảm Ld và Lq của dây quấn stator được tính như sau:

 ()

 ()

Trong đó Rs là điện trở stator được xác định như tại mục 4.1, chỉ số ∞ tương ứng với chế độ xác lập.



**Hình 5:** Đáp ứng dòng điện và điện áp của thí nghiệm

Các tích phân trong công thức (8) và (9) sẽ được tính dựa vào các đồ thị trên hình 5, từ đó chúng ta suy ra Ld và Lq. Nhằm tránh sai số khi tính các tích phân, việc ghi lại các giá trị được thực hiện với chu kỳ lấy mẫu là 10-4 s. Như vậy với thời gian thí nghiệm (thời gian cấp điện áp một chiều cho mạch) là 0.4 s, các tác giả đã ghi nhận được 4.000 mẫu đo.

Kết quả nhận dạng giá trị điện cảm Ld và Lq của ĐCĐBTT được sử dụng trong thí nghiệm tương ứng với những giá trị khác nhau của dòng điện xác lập I∞ ở stator được trình bày trong Bảng 2, đồ thị giá trị điện cảm theo dòng điện được trình bày trên hình 6.

**Bảng 2:** Giá trị các điện cảm Ld và Lq nhận dạng được

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| I∞ (A) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Ld (mH) | 4,51 | 4,50 | 4,49 | 4,45 | 4,41 | 4,39 | 4,38 |
| Lq (mH) | 1,44 | 1,43 | 1,39 | 1,39 | 1,40 | 1,38 | 1,37 |

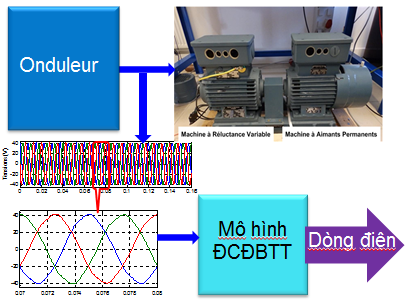


**Hình 6:** Giá trị điện cảm Ld và Lq theo dòng điện stator

Chúng ta nhận thấy rằng, giá trị điện cảm nhận dạng được không có sự thay đổi lớn khi dòng điện tăng, từ 25A trở đi giá trị Ld có giảm nhưng không đáng kể.

# Mô phỏng ĐCĐBTT

Phần mô phỏng ĐCĐBTT được thực hiện với những giá trị tham số đo được của Rs và các giá trị điện cảm Ld và Lq bằng phương pháp nhận dạng đã trình bày ở phần trên. Với giá trị điện trở pha Rs = 120 m giá trị điện cảm được chọnLd = 4,45 m và Lq = 1,39 m (tương ứng với dòng điện xác lập I∞ = 25 A,)Sơ đồ mô phỏng bằng Simulink được trình bày trên hình 8.



**Hình 7:** Sơ đồ cấp nguồn cho động cơ và mô hình mô phòng



Khối “Phuong trinh dien”:



**Hình 8:** Sơ đồ Simulink mô phỏng ĐCĐBTT được cấp nguồn từ tín hiệu điện áp của biến tần 3 pha

Điện áp cấp cho ĐCĐBTT được lấy từ biến tần (hình 8), giá trị điện áp được lưu lại cùng với giá trị dòng điện khi thực hiện thí nghiệm, chúng ta dùng giá trị điện áp này thực hiện mô phỏng động cơ để đánh giá các tham số nhận dạng được. Hình 9 trình bày dạng sóng điện áp ba pha trên đầu cực ĐCĐBTT được cấp từ biến tần nghịch lưu áp khi tốc độ động cơ là 8.000 vòng/phút (biến tần này là một phần trong hệ thống thí nghiệm mà nhóm tác giả thiết kế, do đó dạng sóng điện áp ra trên đầu cực động cơ chưa hoàn toàn sin). Biên độ cực đại của điện áp ở chế độ xác lập là 40V.



Điện áp (V)

đo

Thời gian (s)

đo

đo



đo

đo

đo

Điện áp (V)

Thời gian (s)

**Hình 9:** Dạng sóng điện áp trên đầu cực động cơ

# Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm trên ĐCĐBTT được so sánh để đánh giá độ tin cậy và độ chính xác của phương pháp nhận dạng điện cảm được đề xuất.

Trên hình 10, chúng ta nhận thấy rằng dòng điện đo từ thí nghiệm và dòng điện mô phỏng có biên độ và pha gần như trùng khớp nhau. Điều này chứng tỏ mô hình ĐCĐBTT và các tham số nhận dạng ở phần trên là tương đối chính xác. Hình 11 biểu diễn sự so sánh giá trị dòng id, iq trong trường hợp đo và mô phỏng. Chúng ta nhận thấy rằng, dòng điện mô phỏng id và iq có quá trình quá độ trong thời gian 0.01s, còn giá trị dòng điện đo không có quá trình quá độ là do tín hiệu điện áp đo được và được đưa vào mô phỏng là giá trị xác lập ở tốc độ 8000 vòng/phút (hình 9), hơn nữa trong quá trình quá độ có thể xảy ra hiện tượng bão hòa mạch từ nên sẽ không thể so sánh ở chế độ quá độ.



Thời gian (s)

Dòng điện mô phỏng và đo (A)

đo



Dòng điện mô phỏng và đo (A)

Thời gian (s)

đo

**Hình 10:** Giá trị dòng điện pha mô phỏng và đo từ thí nghiệm khi tốc độ ĐCĐBTT là 8.000 vòng/phút

đo



Dòng điện id (A)

Dòng điện iq (A)

Thời gian (s)

Thời gian (s)

đo

đo

**Hình 11:** Giá trị dòng id,iq mô phỏng và giá trị đo

# Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp thực nghiệm để nhận dạng giá trị tham số điện cảm của ĐCĐBTT. Dòng điện pha stator và các thành phần id và iq thu được từ mô phỏng trong đó sử dụng giá trị tham số được nhận dạng và từ giá trị đo đạc thực tế trên cùng một ĐCĐBTT trong cùng điều kiện tiến hành (điện áp cấp cho stator, giá trị các tham số Rs, Ld và Lq của dây quấn stator,...), có biên độ và pha gần như trùng khớp nhau ở chế độ xác lập. Điều này chứng tỏ giá trị xác định được của điện trở stator Rs và giá trị nhận dạng được của điện cảm stator Ld và Lq với phương pháp được đề xuất trong bài báo này là tương đối chính xác, cho thấy phương pháp nhận dạng được đề xuất là đáng tin cậy.

Tài liệu tham khảo

A. Vagati, “*The synchronous reluctance solution: a new alternative in A. C. drives*,” IEEE, IECON’94 (Bolagna), 1994.

T. A. Lipo, T. J. E. Miller, A. Vagati, I. Boldea, L. Malesani, and T. Fukao, “*Synchronous reluctance drivers*,” *Tutor. Present. IEEE-IAS Annu. Meet.*, 1994.

J. K. Kostko, “*Polyphase Reaction Synchronous Motors*,” J. Am. Inst. Electr. Eng., vol. 42, pp. 1162–1168, 1923.

M. Correvon, “*Conversion electromagnetique*,” in *Cours Systèmes électromécaniques*, Haute Ecole d’Ingénierie et de Gestion Du canton de Vaud, 2008, pp. 1–26.

F. Meibody-Tabar, “*Etude d’une machine synchrone à réluctance variable pour des applications à grande vitesse*,” Thèse de Doctorat, Institute National Polytechnique de Lorraine, 1986.

J.-D. Park, C. Kalev, and H. F. Hofmann, “*Control of High-Speed Solid-Rotor Synchronous Reluctance Motor/Generator for Flywheel-Based Uninterruptible Power Supplies*,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 8, pp. 3038–3046, Aug. 2008.

M. Musak and M. Stulrajter, “*Novel Methods For Parameters Investigation Of PM Synchronous Motors*,” ACTA Tech. Corviniensis - Bull. Eng., pp. 51–56, 2013.

V. Z. Groza, “*Experimental determination of synchronous machine reactances from DC decay at standstill*,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 52, no. 1, pp. 158–164, 2003.

W. L. Soong, “*Inductance Measurements for Synchronous Machines*,” Power Eng. Brief. Note Ser., pp. 7–8, 2008.

S.-H. Hwang, J.-M. Kim, H. Van Khang, and J.-W. Ahn, “*Parameter Identification of a Synchronous Reluctance Motor by using a Synchronous PI Current Regulator at a Standstill*,” J. Power Electron., vol. 10, no. 5, pp. 491–497, Sep. 2010.

T. Senjyu, K. Uezato, and A. Omoda, “*Parameter Measurement for Synchronous Relwtance Motors Considering Stator Iron Loss*,” IEEE, Univ. Ryukyus, pp. 397–402, 1998.

T. Matsuo and T. A. Lipo, “*Rotor position detection scheme for synchronous reluctance motor based on current measurements*,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 4, pp. 860–868, 1995.

R. E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic, T. J. E. Miller, and R. H. Middleton, “*Control of Synchronous Reluctance Machines*,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 6, pp. 1110–1122, 1993.

**Thông tin về tác giả**

|  |  |
| --- | --- |
|  | Nguyễn Đức Quận:  - Tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Tự động hóa tại Đại học Đà nẵng năm 2010, Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện năm 2015 tại Đại học Nantes, Cộng hòa Pháp  - Công việc hiện tại: Phó Trưởng Khoa điện, Trưởng bộ môn Tự động hóa trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà nẵng  - Lĩnh vực quan tâm: Điều khiển máy điện, máy điện tốc độ cao, động cơ từ trở, điều khiển không cảm biến  - Điện thoại: 0983428767 |
|  | Hoàng Dũng:  - Tốt nghiệp Kỹ sư Điện, chuyên ngành Thiết bị điện tại Trường Đại học Bách Khoa Đà Nẵng năm 1985. Tốt nghiệp Kỹ sư điện, chuyên ngành Hệ thống điện tại Trường Kỹ sư điện Quốc gia (ENSIEG) thuộc Viện Bách khoa Quốc gia Grenoble (INPG) của Cộng hòa Pháp vào năm 1996. Tốt nghiệp Thạc sĩ và Tiến sĩ ngành Điện Kỹ thuật lần lượt vào các năm 1998 và 2002 tại Đại học Trung tâm Lyon (ECL), Cộng hòa Pháp.  - Công việc hiện tại: Phó Hiệu trưởng trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, là giảng viên tại Khoa Điện của Trường Đại học Bách khoa và Trường Cao đẳng Công nghệ thuộc Đại học Đà Nẵng từ năm 1985 đến nay  - Lĩnh vực quan tâm: Thiết bị điện, trường điện từ và tối ưu hóa trong kỹ thuật điện  - Điện thoại: |

Nhóm tác giả đã kiểm tra trên nhiều máy tính khác nhau, không thấy có vấn đề lỗi font chữ như PP đề nghị sửa chữa