

Vật lý học động cơ bước

Phần 2: Động cơ bước dịch bởi Đoàn Hiệp

- Giới thiệu
- Tĩnh học
- Điều khiển nửa bước và vi bước
- Lực ma sát và vùng chết
- Động lực học
- Cộng hưởng
- Sống chung với cộng hưởng
- Vận tốc moment xoắn cản
- Vấn đề về điện từ

Giới thiệu

Khi nói về các đại lượng vật lý, việc chú ý đến đơn vị đo được dùng là **rất quan trọng!** Trong phần trình bày này về động cơ bước cũng vậy, chúng ta sẽ nhắc lại các đơn vị vật lý tiêu chuẩn:

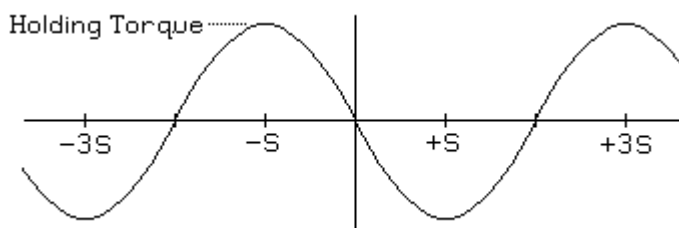
	English	CGS	MKS
KHỐI LƯỢNG	slug	gram	kilogram
LỰC	pound	dyne	newton
KHOẢNG CÁCH	foot	centimeter	meter
THỜI GIAN	second	second	second
GÓC	radian	radian	radian

Theo bảng trên, lực một pound sẽ gia tốc cho một khối lượng một slug là một foot trên một giây bình phương. Mối quan hệ này giữa đơn vị của lực, khối lượng và thời gian và khoảng cách trong các hệ đơn vị đo khác cũng giống như vậy. Người ta thường lẫn lộn góc thì đo bằng độ và khối lượng lại đo bằng pound rồi lực lại tính bằng kilograms sẽ làm thay đổi kết quả đúng của các công thức dưới đây! **Cẩn thận khi biến đổi những đơn vị không chính quy thành các đơn vị tiêu chuẩn được liệt kê trên đây trước khi áp dụng các công thức tính toán!**

Tĩnh học

Cho một động cơ quay S radian mỗi bước, biểu đồ moment xoắn theo vị trí góc của rotor so với vị trí cân bằng ban đầu sẽ có dạng gần đúng hình sin. Hình dạng thực tế của biểu đồ phụ thuộc vào hình dạng các cực của rotor và stator, nhưng trong bảng thông số (**datasheet**) của động cơ lại không có biểu đồ này, và cũng không trình bày hình dạng các cực! Đối với động cơ nam châm vĩnh cửu và động cơ hỗn hợp, biểu đồ moment theo vị trí góc rotor thường giống như hình sin, nhưng cũng không hẳn vậy. Đối với động cơ biến từ trở, đường này giống hình sin một chút, hình thang một chút nhưng cũng không hẳn là hình răng cưa.

Đối với động cơ 3 mẫu biến từ trở hoặc nam châm vĩnh cửu có góc bước S , chu kỳ của moment so với vị trí sẽ là $3S$; hay một động cơ 5 pha, chu kỳ sẽ là $5S$. Đối với động cơ 2 mẫu nam châm vĩnh cửu hay hỗn hợp, loại phổ biến nhất, chu kỳ sẽ là $4S$, như được mô tả trong **Hình 2.1**



Hình 2.1

Nhắc lại, đối với một động cơ nam châm vĩnh cửu 2 mẫu lý tưởng, đường cong này có thể mô tả toán học như sau:

$$T = -h \sin\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) / S\right) \Theta$$

trong đó

T -- moment xoắn (**torque**)

h -- moment xoắn giữ (**holding torque**)

S -- góc bước, tính bằng radian (**step angle**)

Θ = góc trục (**shaft angle**)

Nhưng nhớ rằng, thường thì đường biểu đồ thực không bao giờ có dạng hình sin lý tưởng như trên.

Moment xoắn giữ (**holding torque**) trên một mẫu (**winding**) của động cơ bước là giá trị đỉnh của moment xoắn trên biểu đồ khi dòng qua một mẫu đạt giá trị lớn nhất. Nếu cố tăng giá trị moment xoắn lên cao hơn giá trị đỉnh trong khi vẫn giữ nguyên điện áp kích ở một mẫu, rotor sẽ quay tự do.

Đôi khi việc phân biệt giữa góc trục điện và góc trục cơ là việc làm cần thiết. Về mặt cơ, một vòng quay của rotor sẽ là 2π rad. Về phương diện điện, một vòng được định nghĩa là một chu kỳ của đường cong moment xoắn đối với góc trục. Trong tài liệu này, θ sẽ dùng để chỉ góc trục cơ, và $((\pi/2)/S)\theta$ để chỉ góc trục điện của một động cơ 4 bước/vòng.

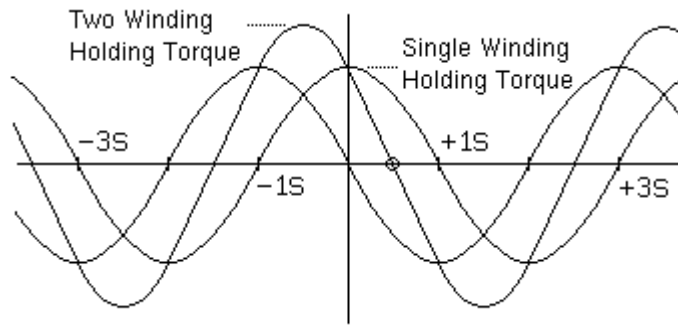
Cho rằng đường cong moment xoắn so với vị trí góc gần đúng hình sin. Chừng nào mà moment xoắn còn bằng moment xoắn giữ, rotor sẽ vẫn nằm trong $\frac{1}{4}$ chu kỳ so với vị trí cân bằng. Đối với một động cơ nam châm vĩnh cửu hay hỗn hợp hai mẫu, điều này có nghĩa là rotor sẽ giữ nguyên vị trí so với vị trí cân bằng trong phạm vi một bước.

Nếu không có nguồn cấp vào các mẫu động cơ, moment xoắn sẽ không bao giờ giảm xuống 0! Trong các động cơ bước biến từ trở, từ trường dư trong mạch từ của động cơ có thể tạo ra một moment xoắn dư nhỏ, và trong các động cơ nam châm vĩnh cửu và hỗn hợp, lực hút giữa các cực và từ trường vĩnh cửu của rotor có thể tạo ra một moment xoắn đáng kể mà không cần nguồn áp.

Moment xoắn dư trong một động cơ nam châm vĩnh cửu hay hỗn hợp thường được gọi là moment xoắn trên răng của động cơ, bởi vì một người khò khạo sẽ nghĩ rằng có một kết cấu cơ khí dạng mẫu răng nằm ở bên trong động cơ giữ rotor lại. Thông thường, moment xoắn trên răng biểu diễn theo góc rotor không có dạng hình sin, ở một vị trí cân bằng tại mỗi bước và một biên độ lớn hơn khoảng 10% moment xoắn giữ của động cơ, nhưng nhìn chung các động cơ từ các nhà sản xuất cho ra giá trị cao đến 23% đối với động cơ nhỏ và dưới 26% đối với động cơ cỡ trung bình.

Điều khiển nửa bước và vi bước

Miễn là không có phần nào của mạch từ bão hòa, thì việc cấp điện đồng thời cho hai mẫu động cơ sẽ sinh ra một moment xoắn theo vị trí là tổng của các moment xoắn đối với hai mẫu động cơ riêng lẻ. Đối với động cơ hai mẫu nam châm vĩnh cửu hoặc hỗn hợp, hai đường cong này sẽ là S radians khác pha, và nếu dòng qua hai mẫu bằng nhau, đỉnh của tổng sẽ nằm ở vị trí $S/2$ radians kể từ đỉnh của đường cong gốc, như ở **Hình 2.2**



Hình 2.2

Đây là cơ bản của điều khiển nửa bước. Moment xoắn giữ là đỉnh của đường cong moment xoắn kết hợp khi hai mẫu có cùng dòng lớn nhất đi qua. Đối với động cơ nam châm vĩnh cửu và hỗn hợp thông thường, moment xoắn giữ hai mẫu sẽ là:

$$h_2 = 2^{0.5} h_1$$

trong đó:

h_1 – moment xoắn giữ trên một mẫu

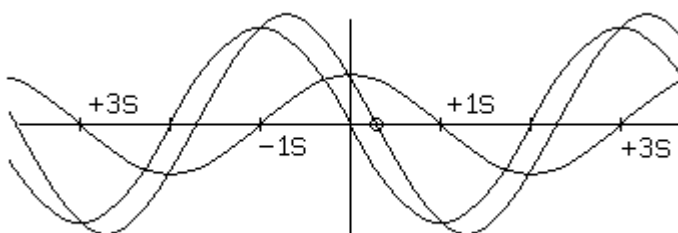
h_2 – moment xoắn giữ hai mẫu

Điều này cho thấy rằng không có phần nào trong mạch từ bão hoà và moment xoắn theo đường cong vị trí đối với mỗi mẫu là hình sin lý tưởng.

Hầu hết các bảng hướng dẫn động cơ nam châm vĩnh cửu và biến từ trở đều chỉ ra moment xoắn giữ hai mẫu mà không có đưa ra moment xoắn giữ trên một mẫu; phần nào, có lẽ vì nó sẽ chiếm nhiều giấy hơn, và phần nào cũng vì hầu hết các bộ điều khiển đủ bước thông thường luôn áp điện áp vào cả hai mẫu cùng lúc.

Nếu bất kỳ phần nào trong mạch từ của động cơ bị bão hoà, hai đường cong moment xoắn sẽ không thể cộng tuyến tính với nhau. Kết quả là moment tổng hợp có thể không nằm chính xác tại vị trí $S/2$ kể từ vị trí cân bằng ban đầu.

Điều khiển vi bước cho phép các bước nhỏ hơn bằng việc dùng các dòng khác nhau qua hai mẫu động cơ, như vẽ trên **Hình 2.3**:



Hình 2.3

Đối với một động cơ hai mấu biến từ trở hoặc nam châm vĩnh cửu, cho rằng các mạch từ không bão hoà và các đường cong moment xoắn trên mỗi mấu theo vị trí là một hình sin hoàn hảo, công thức dưới đây đưa ra những đặc tính chủ chốt của đường cong moment xoắn tổng hợp:

$$h = (a^2 + b^2)^{0.5}$$

$$x = (S / (\pi/2)) \arctan(b / a)$$

trong đó:

a – moment xoắn áp trên mấu với vị trí cân bằng tại 0 radians

b – moment xoắn áp trên mấu với vị trí cân bằng tại S radians

h – moment xoắn giữ tổng hợp

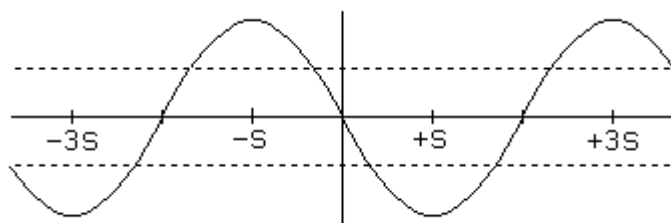
x -- vị trí cân bằng tính theo radians

S – góc bước, tính theo radians.

Khi không có bão hoà, các moment xoắn a và b tỉ lệ với dòng đi qua các mấu tương ứng. Điều này rất thông dụng khi làm việc với các dòng và moment xoắn bình thường, để moment xoắn giữ mấu đơn hoặc dòng cực đại được chấp nhận trong một mấu động cơ là 1.0.

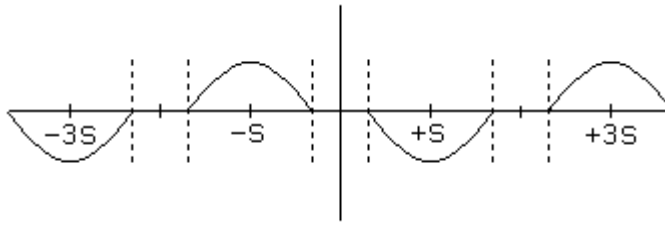
Ma sát và vùng chết

Đường cong moment xoắn so với vị trí được chỉ ra trong **Hình 2.1** không tính đến moment xoắn động cơ để thắng lực ma sát! Chú ý rằng các lực ma sát có thể được chia thành hai loại lớn, lực ma sát nghỉ là lực ma sát trượt, cần phải có một moment xoắn đủ lớn để thắng lại nó, không kể đến vận tốc và ma sát động học hay lực nhớt, hoặc các cản trở khác không phụ thuộc vận tốc. Ở đây, chúng ta quan tâm đến lực ma sát nghỉ. Cho rằng moment xoắn cần thiết để thắng lực ma sát nghỉ trong hệ là $\frac{1}{2}$ giá trị đỉnh moment xoắn của motor, như miêu tả trong **Hình 2.4**.



Hình 2.4

Đường gạch đứt trong hình 2.4 chỉ ra moment xoắn cần thiết để thắng ma sát, chỉ có một phần đường cong moment xoắn bên ngoài đường gạch đứt là làm cho rotor chuyển động. Đường cong chỉ ra moment xoắn hiệu quả khi có ma sát trực không giống những đường cong này, **Hình 2.5**:



Hình 2.5

Chú ý rằng tác dụng của lực ma sát gồm hai phần. Đầu tiên, tổng moment xoắn hiệu quả để quay tải bị giảm, thứ hai, có một vùng chết nằm ở mỗi vị trí cân bằng của động cơ lý tưởng. Nếu rotor động cơ được đặt tại bất cứ đâu trong vùng chết đối với vị trí cân bằng tức thời, moment xoắn ma sát sẽ vượt quá moment xoắn tác dụng bởi các mẫu động cơ, rotor sẽ không di chuyển. Cho rằng một đường cong hình sin lý tưởng giữa moment xoắn và vị trí khi không có ma sát, độ rộng góc của những vùng chết sẽ là:

$$d = 2 \left(S / (\pi/2) \right) \arcsin(f / h) = (S / (\pi/4)) \arcsin(f / h)$$

trong đó:

d -- độ rộng vùng chết tính bằng radians

S – góc bước tính bằng radians

f – moment xoắn cần thiết để thắng lực ma sát

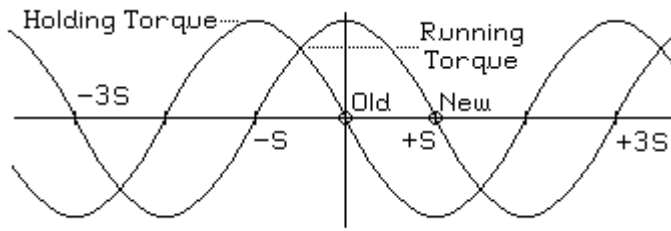
h – moment xoắn giữ

Điều quan trọng phải ghi chú về vùng chết là nó giới hạn độ chính xác vị trí sau cùng! Một ví dụ, khi lực ma sát nghỉ là 1/2 giá trị đỉnh moment xoắn, một động cơ bước mỗi bước 90° sẽ có vùng chết là 60° ! Điều đó có nghĩa là các bước hiệu quả sẽ dao động trong khoảng 30° đến 150° , tùy thuộc vào rotor dừng ở đâu trong vùng chết sau mỗi bước!

Sự xuất hiện của vùng chết có một ảnh hưởng rất lớn đến việc điều khiển vi bước thực tế! Nếu vùng chết rộng x° , thì việc điều khiển vi bước với độ rộng một bước nhỏ hơn x° có thể sẽ không làm cho rotor quay được một chút nào. Vì vậy, đối với các hệ thống định dùng điều khiển vi bước có độ phân giải cao, việc giảm thiểu ma sát nghỉ là rất quan trọng.

Động lực học

Mỗi lần bạn quay động cơ một bước, bạn di chuyển rotor khỏi vị trí cân bằng S radians. Điều này di chuyển toàn bộ đường cong được miêu tả trong hình 2.1 một khoảng cách S radians, như **Hình 2.6**:

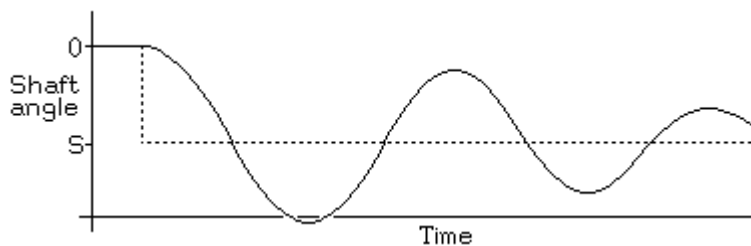


Hình 2.6

Điều đầu tiên ghi nhận về quá trình quay một bước là giá trị ngẫu lực hiệu dụng lớn nhất đạt tại giá trị nhỏ nhất khi roto đang quay nửa đường từ bước này sang bước kế tiếp. Giá trị nhỏ nhất này xác định moment xoắn động (**running torque**), giá trị moment xoắn lớn nhất của động cơ có thể đạt được khi nó bước tới trước rất chậm. Đối với động cơ nam châm vĩnh cửu hai mẫu thông thường với những đường cong hình sin lý tưởng của moment xoắn so với vị trí và moment xoắn giữ h , giá trị moment xoắn động sẽ là $h/(2^{0.5})$. Nếu động cơ được quay bằng cách cấp điện cho hai mẫu cùng lúc, moment xoắn động của một động cơ nam châm vĩnh cửu hai mẫu lý tưởng sẽ bằng moment xoắn giữ loại một mẫu.

Cũng nên ghi nhận rằng ở một tốc độ bước cao, moment xoắn động đôi khi được định nghĩa như là *moment kéo ra* (**pull-out torque**). Nghĩa là, nó là moment xoắn lớn nhất mà động cơ có thể vượt qua để quay tải từ bước này sang bước tiếp trước khi tải bị kéo ra khỏi vị trí bước bởi lực ma sát. Một vài hướng dẫn động cơ định nghĩa một moment xoắn thứ hai là moment xoắn kéo vào (**pull-in torque**). Nó là moment xoắn ma sát cực đại mà động cơ có thể vượt qua để gia tốc một tải đang đứng yên đến một tốc độ đồng bộ (vận tốc điều khiển mong muốn). Moment xoắn kéo vào được nêu trong các tài liệu sử dụng động cơ bước là giá trị không chính xác, bởi vì moment xoắn kéo vào phụ thuộc vào moment ban đầu của tải được sử dụng khi chúng được đo, và một vài bảng hướng dẫn động cơ chỉ ra giá trị này.

Trong thực tế, luôn có lực ma sát, vì thế, sau khi vị trí cân bằng quay một bước, rotor giống như dao động nhỏ xung quanh vị trí cân bằng mới. Quỹ đạo kết quả có thể tương tự như trong **Hình 2.7**:



Hình 2.7

Ở đây, quỹ đạo của vị trí cân bằng được biểu diễn bằng đường gạch đứt, trong khi đó, đường cong trên hình là quỹ đạo của rotor động cơ.

Cộng hưởng

Tần số cộng hưởng của rotor động cơ phụ thuộc vào biên độ của dao động; nhưng khi biên độ giảm, tần số dao động sẽ tăng đến một tần số mà biên độ nhỏ còn xác định được. Tần số này phụ thuộc vào góc bước và tỉ số giữa moment xoắn giữ và moment quán tính của rotor. Ngay cả khi moment xoắn lớn hơn hoặc nhỏ hơn cũng sẽ làm tăng tần số này!

Một cách hình thức, cộng hưởng tần số nhỏ có thể được tính như sau:

Đầu tiên, nhắc lại phương trình gia tốc góc theo định luật Newton:

$$T = \mu A$$

trong đó:

T – moment xoắn áp trên rotor

μ -- moment quán tính của rotor và tải

A – gia tốc góc tính theo radians/giây bình phương

Chúng ta cho rằng, với một biên độ nhỏ, moment xoắn trên rotor có thể được gần đúng bằng một hàm tuyến tính của độ dịch chuyển so với vị trí cân bằng. Vì vậy, áp dụng định luật Hooke:

$$T = -k \Theta$$

trong đó:

k -- hằng số dao động riêng của hệ, tính bằng đơn vị moment trên radian

Θ -- vị trí góc của rotor, tính bằng radians

Chúng ta có thể cân bằng hai công thức moment xoắn để có:

$$\mu A = -k \Theta$$

Chú ý rằng gia tốc là đạo hàm bậc hai của vị trí theo thời gian:

$$A = d^2\Theta/dt^2$$

Nên ta có thể viết lại phương trình trên thành dạng phương trình vi phân:

$$d^2\Theta/dt^2 = -(k/\mu) \Theta$$

Để giải bài toán này, nhắc lại rằng, cho:

$$f(t) = a \sin bt$$

Các đạo hàm của nó là:

$$df(t)/dt = ab \cos bt$$

$$d^2f(t)/dt^2 = -ab^2 \sin bt = -b^2 f(t)$$

Ghi chú rằng, xuyên suốt phần này, chúng ta cho rằng rotor đang cộng hưởng.

Vì vậy, nó có phương trình chuyển động có dạng:

$$\Theta = a \sin(2\pi f t)$$

a = biên độ góc cộng hưởng

f = tần số cộng hưởng

Đây là một cách giải có thể chấp nhận được đối với phương trình vi phân ở trên nếu ta lấy:

$$b = 2\pi f$$

$$b^2 = k/\mu$$

Giải ra tần số cộng hưởng f là một hàm của k and μ , ta có:

$$f = (k/\mu)^{0.5} / 2\pi$$

Điều cốt yếu nó là moment quán tính của rotor cộng thêm bất kỳ tải ngẫu lực kèm theo nào. Moment của rotor, trong sự cô lập, là không thích hợp! Một số hướng dẫn động cơ có kèm theo thông tin về cộng hưởng, nhưng nếu động cơ mang tải, tần số cộng hưởng sẽ thay đổi!

Trong thực nghiệm, sự dao động này có thể là nguyên nhân của những bài toán quan trọng khi tỉ lệ bước ở bất kỳ đâu cũng gần với tần số cộng hưởng của hệ; kết quả thường xuất hiện những chuyển động ngẫu nhiên không điều khiển được.

Cộng hưởng và động cơ lý tưởng

Đến điểm này, chúng ta chỉ chia với hằng số đàn hồi góc nhỏ k cho hệ thống. Điều này được đo bằng thực nghiệm, nhưng nếu đường cong moment xoắn so với vị trí là hình sin, nó cũng là một hàm đơn giản của moment xoắn giữ. Nhắc lại rằng:

$$T = -h \sin\left(\left(\frac{\pi}{2}\right)/S\right) \Theta$$

Hệ số đàn hồi góc nhỏ k là trừ của đạo hàm T tại gốc.

$$k = -dT / d\Theta = -(-h \left(\frac{\pi}{2}\right)/S \cos(0)) = (\pi/2)(h / S)$$

Thay vào công thức tần số, ta có:

$$f = \left(\left(\frac{\pi}{2}\right)(h / S) / \mu\right)^{0.5} / 2\pi = (h / (8\pi \mu S))^{0.5}$$

Nếu biết moment xoắn giữ và tần số cộng hưởng, cách dễ nhất để xác định moment quán tính của các phần di chuyển trong một hệ được điều khiển bởi một động cơ bước là tính gián tiếp từ mối quan hệ trên!

$$\mu = h / (8\pi f^2 S)$$

Vì mục đích thực nghiệm, vấn đề không phải là moment xoắn hay moment quán tính, mà là gia tốc chịu được lớn nhất! Tiện thể, đây là một hàm đơn giản của tần số cộng hưởng! Bắt đầu với định luật Newton cho gia tốc góc:

$$A = T / \mu$$

Chúng ta có thể thay thế công thức trên cho moment quán tính như là một hàm của tần số cộng hưởng, và sau đó thay thế moment xoắn động chịu được lớn nhất thành hàm của moment xoắn giữ để có:

$$A = (h / (2^{0.5})) / (h / (8\pi f^2 S)) = 8\pi S f^2 / (2^{0.5})$$

Do gia tốc tính theo bước trên giây bình phương thay vì dùng radians trên giây bình phương, ta được:

$$A_{\text{steps}} = A / S = 8\pi f^2 / (2^{0.5})$$

Vì vậy, đối với một động cơ lý tưởng có một hàm moment xoắn theo vị trí dạng sin, gia tốc lớn nhất tính theo bước trên giây bình phương là một hàm thông thường của tần số cộng hưởng của động cơ và tải gắn cứng!

Trong động cơ nam châm vĩnh cửu hoặc biến từ trở hai mấu, với một đường đặc tính moment xoắn theo vị trí có dạng sin lý tưởng, moment xoắn giữ hai mấu là một hàm đơn giản theo moment xoắn giữ mấu đơn:

$$h_2 = 2^{0.5} h_1$$

trong đó:

h_1 – moment xoắn giữ mẫu đơn

h_2 – moment xoắn giữ hai mẫu

Thay vào công thức tần số cộng hưởng, chúng ta có thể tìm tỉ lệ giữa các tần số cộng hưởng trong hai trường hợp điều khiển này:

$$f_1 = (h_1 / \dots)^{0.5}$$

$$f_2 = (h_2 / \dots)^{0.5} = (2^{0.5} h_1 / \dots)^{0.5} = 2^{0.25} (h_1 / \dots)^{0.5} = 2^{0.25} f_1 = 1.189... f_1$$

Mối quan hệ này chỉ duy trì nếu moment xoắn được cung cấp bởi động cơ không thay đổi đáng kể khi tốc độ bước khác nhau giữa hai tần số này.

Nói chung, như sẽ thảo luận ở phần sau, moment xoắn hiệu dụng sẽ gần như không đổi đến khi một bước tiếp theo xảy ra, nó sẽ bị cắt đi. Vì vậy, mối quan hệ này chỉ giữ nguyên nếu tần số cộng hưởng thấp dưới tốc độ bước này. Tại các tốc độ bước trên tốc độ cắt, hai tần số sẽ gần nhau hơn!

Tóm tắt chương

Trong chương này, chúng ta tìm hiểu hai phần chính là tĩnh học và động học của động cơ bước. Tuy có sự khác nhau đôi chút về cấu tạo và nguyên lý tạo ra từ trường, nhưng về bản chất mối quan hệ giữa moment và vị trí góc của rotor dường như là không khác biệt mấy. Chính vì thế, những lý thuyết của động cơ bước nam châm vĩnh cửu đều có thể áp dụng gần đúng cho động cơ biến từ trở, và hỗn hợp.

Điều khiển nửa bước và vi bước thực chất là tạo ra một moment tổng hợp mà chúng ta vẫn thường làm với phép cộng hai dao động hình sin lệch pha nhau. Khi điều khiển nửa bước, điện áp cấp cho động cơ không thay đổi trên các mẫu. Nếu điện áp này thay đổi, vị trí đỉnh của moment tổng không nằm chính giữa vị trí cân bằng của rotor như điều khiển thông thường. Khi điện áp này được thay đổi một cách hợp lý, chúng ta có thể tạo ra những góc bước rất nhỏ cho động cơ, gọi là điều khiển vi bước.

Một điều quan trọng nữa trong phần tĩnh học, đó là lực ma sát bên trong động cơ sẽ gây nên các vùng chết, và thường thì với điều khiển đủ bước hoặc nửa bước, chúng ta không quan tâm đến các vùng chết này. Trong khi đó, vùng chết lại ảnh hưởng lớn đến khả năng điều khiển vi bước, mà chúng ta sẽ xem xét ở các phần sau.

Bài toán động lực học được quan tâm là khi trục động cơ quay từ bước này sang bước khác, và dừng lại, trục động cơ không thể đứng yên hoàn toàn, mà nó còn bị dao động. Chính những dao động này sẽ bị khuếch đại khi có cộng hưởng cơ.

Bài toán được đặt ra là làm sao để xác định được khoảng vận tốc bước hợp lý mà không xảy ra hiện tượng cộng hưởng, hoặc giả làm sao để điều khiển chống lại việc cộng hưởng.

Phần này chưa được hoàn chỉnh, tôi sẽ còn bổ sung và sửa chữa. Tuy nhiên, vẫn cung cấp cho các bạn để các bạn tham khảo. Tôi sẽ tiếp tục sửa chữa và bổ sung sau.