

# Chương 5: Cơ cấu chấp hành

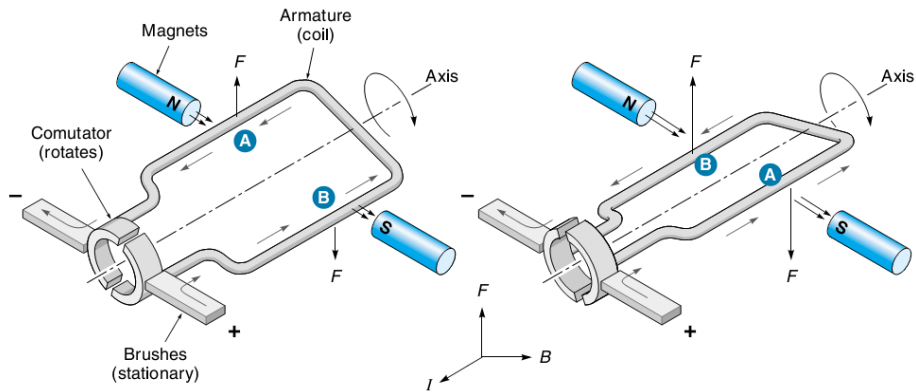
## 5.1) Giới thiệu

- Cơ cấu chấp hành (actuator) là thiết bị chuyển năng lượng thành chuyển động cơ học.
- Các loại cơ cấu chấp hành dùng kéo hệ máy cơ gồm:
  - Cơ cấu chấp hành khí nén: thường dùng trong các hệ thống sản xuất tự động (như robot nhấc-đặt, máy định lượng và đóng gói tự động, ...)
  - Cơ cấu chấp hành thủy lực: thường dùng trong các hệ thống cần lực tác động lớn như nâng hạ, ép, ...
  - Động cơ đốt trong: thường dùng trong những hệ thống đi động (xe, tàu thuyền, ...)
  - Cơ cấu chấp hành điện: dùng nhiều trong những hệ thống cơ điện tử; nó có ưu điểm là sạch (không rò rỉ như loại dùng thủy lực), không gây ô nhiễm, hiệu suất cao.
- Chương này trình bày các cơ cấu chấp hành điện thông dụng trong các hệ thống cơ điện tử, như động cơ DC, động cơ AC, động cơ bước, ...

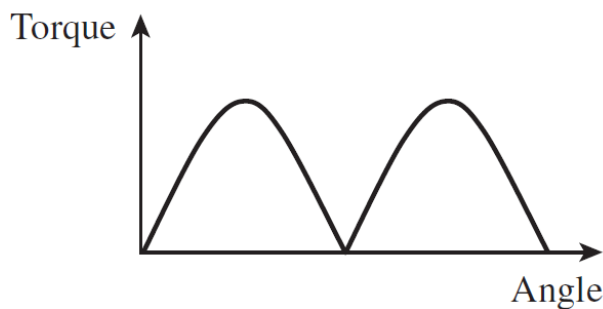
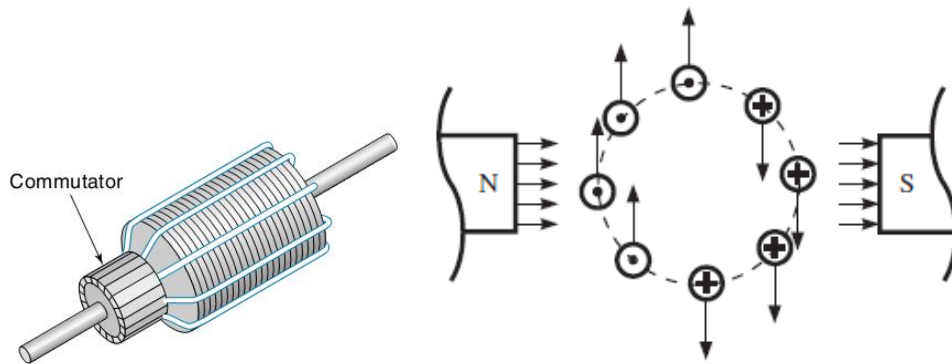
## 5.2) Động cơ DC có chổi than

- Động cơ điện một chiều (DC) thường được sử dụng trong các hệ truyền động, servo:
  - cần thay đổi tốc độ với yêu cầu dải điều chỉnh rộng,
  - độ ổn định tốc độ cao,
  - thường xuyên hoạt động ở chế độ khởi động, hãm và đảo chiều.

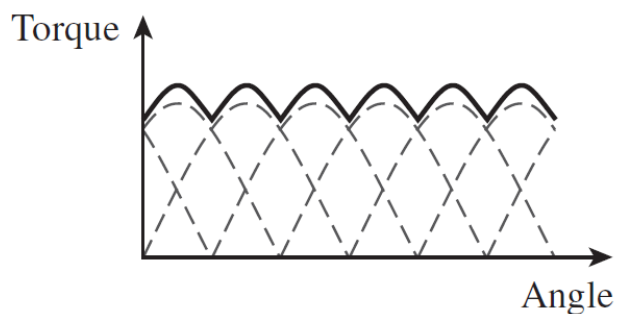
### 5.2.1) Nguyên lý



- Momen tác dụng lên khung dây lớn nhất khi mặt phẳng khung dây song song với từ trường nam châm, giảm dần cho đến khi mặt phẳng khung dây vuông góc từ trường thì momen bằng 0.
- Để giảm sự thay đổi của moment khi khung dây quay quanh trục  $\rightarrow$  sử dụng nhiều khung dây trên rotor.



Rotor một vòng dây



Rotor nhiều vòng dây

- Định luật Faraday

$$\text{Định luật Faraday} \Rightarrow E_b \sim \omega \Rightarrow E_b = K_E \omega \quad (5.1)$$

$$\text{Định luật Lorentz} \Rightarrow T \sim I \Rightarrow T = K_T I \quad (5.2)$$

trong đó:  $E_b$ : sức phản điện động phần ứng, volt

$\omega$ : vận tốc góc của trục động cơ, rad/s

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad \text{hay} \quad n = \frac{60}{2\pi} \omega$$

$n$ : tốc độ động cơ, rpm (vòng/phút)

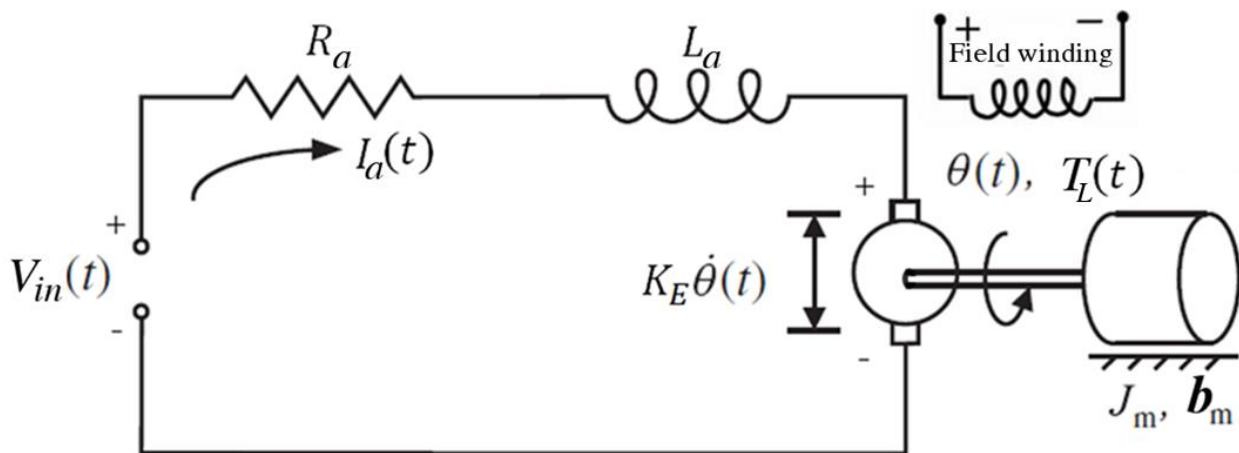
$I_a$ : dòng điện phần ứng, A

$T$ : mômen xoắn do động cơ sinh ra, Nm

$K_E$  là hằng số sức phản điện động, V/rad/sec

$K_T$  là hằng số mômen của động cơ, Nm/A

- Trong hệ đơn vị SI,  $K_E$  và  $K_T$  bằng nhau về trị số.
- Đối với những loại động cơ DC có từ thông kích từ thay đổi được,  $K_E$  và  $K_T$  không là hằng số mà biến thiên tỉ lệ với từ thông kích từ.
- Sơ đồ nguyên lý động cơ DC:



Phương trình định luật Kirchhoff cho mạch điện phần ứng:

$$V_{in}(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad (5.3)$$

trong đó:  $E_b(t) = K_E \omega(t),$  (5.4)

Phương trình định luật 2 Newton cho chuyển động quay của trục động cơ:

$$T(t) = b_m \omega(t) + J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + T_L(t) \quad (5.5)$$

trong đó:  $T(t) = K_T I(t),$  (5.6)

$\omega(t) = d\theta(t)/dt$ : vận tốc góc trục động cơ,

$J_m$ : mômen quán tính rotor,

$b_m$ : ma sát tại các ổ lăn.

- Phân loại động cơ DC:
  - Động cơ DC kích từ độc lập,
  - Động cơ DC kích từ song song,
  - Động cơ DC kích từ nối tiếp,
  - Động cơ DC kích từ hỗn hợp.
- Các thông số cơ bản:
  - Thông số định mức: được thiết lập theo điều kiện phát nóng, động cơ làm việc liên tục.
  - Thông số cực đại: được thiết lập theo điều kiện chuyển mạch, động cơ làm việc trong thời gian ngắn.

### 5.2.2) Động cơ DC kích từ nam châm vĩnh cửu (độc lập) ở trạng thái xác lập

- Khi xác lập,
  - dòng  $I$  không đổi  $\rightarrow \frac{dI(t)}{dt} = 0$
  - tốc độ động cơ không đổi  $\rightarrow \frac{d\omega(t)}{dt} = 0$

- Các phương trình (5.3), (5.4) và (5.6) trở thành:

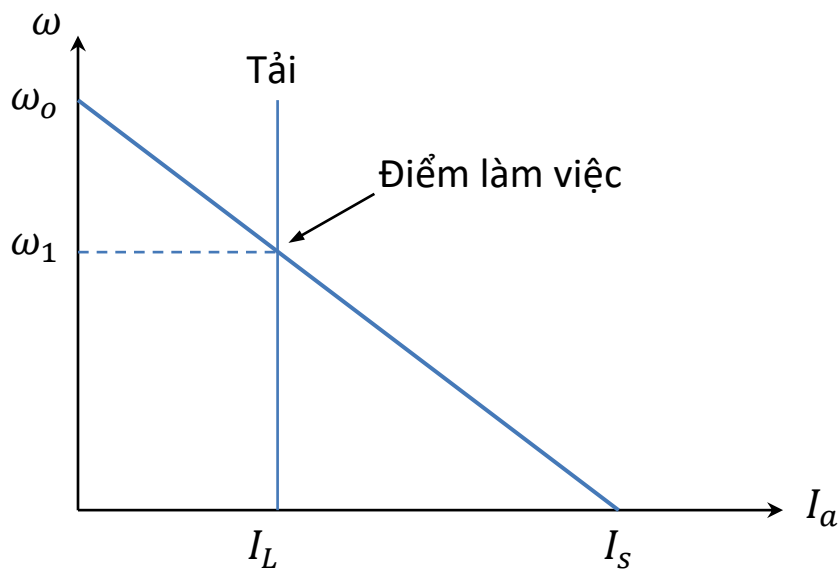
$$E_b = K_E \omega \quad (5.7)$$

$$T = K_T I_a \quad (5.8)$$

$$V_{in} = E_b + R_a I_a \quad (5.9)$$

- Từ (5.7) ~ (5.9), ta suy ra phương trình đặc tính cơ điện:

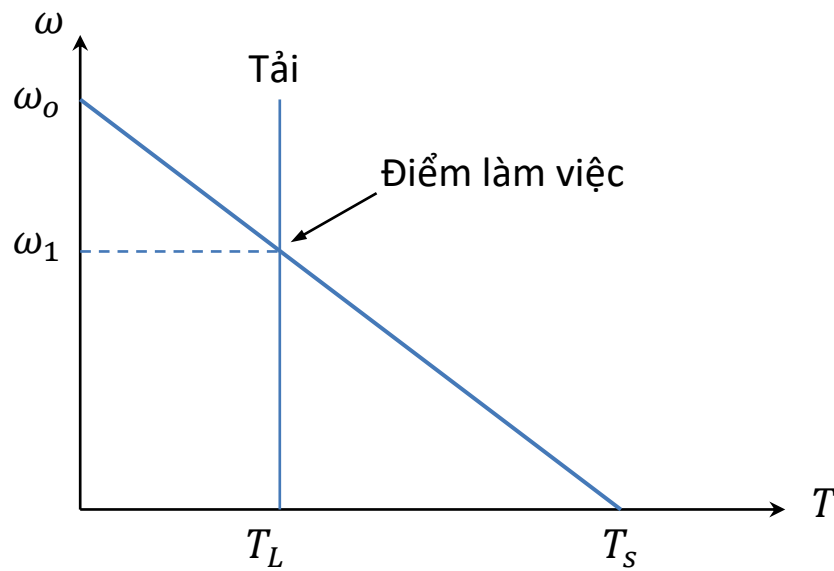
$$\omega = \frac{V_{in}}{K_E} - \frac{R_a}{K_E} I_a \quad (5.10)$$



Đặc tính cơ điện

- Thế (5.8) vào (5.10), suy ra phương trình đặc tính cơ:

$$\omega = \frac{V_{in}}{K_E} - \frac{R_a}{K_E K_T} T \quad (5.11)$$



Đặc tính cơ

- Khi không tải, nếu bỏ qua tổn hao cơ (trường hợp lí tưởng):

$$T = 0 \Rightarrow I_a = 0$$

⇒ Tốc độ không tải:

$$\omega_o = \frac{V_{in}}{K_E} \quad (5.12)$$

Thực tế, tốc độ không tải nhỏ hơn trị số tính toán từ (5.12) do có tổn hao cơ.

- Với tải  $T_L$ , tốc độ động cơ giảm đi một lượng  $\Delta\omega$  (gọi là độ sụt tốc):

$$\omega = \omega_o - \Delta\omega \quad (5.13)$$

Thành phần  $\Delta\omega$  có thể được xác định từ 5.11:

$$\Delta\omega = \frac{R_a}{K_E K_T} T_L \quad (5.14)$$

Hoặc dựa trên đồ thị đặc tính cơ:

$$\Delta\omega = \frac{T_L}{T_s} \omega_0 \quad (5.15)$$

- Khi khởi động ( $\omega = 0$ ):

○ Momen khởi động:

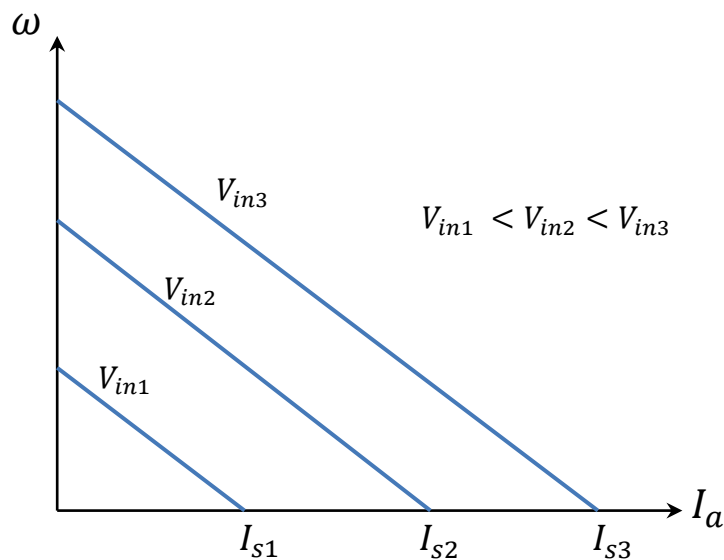
$$T_s = \frac{K_T}{R_a} V_{in} \quad (5.16)$$

○ Dòng điện khởi động:

$$I_s = \frac{V_{in}}{R_a} \quad (5.17)$$

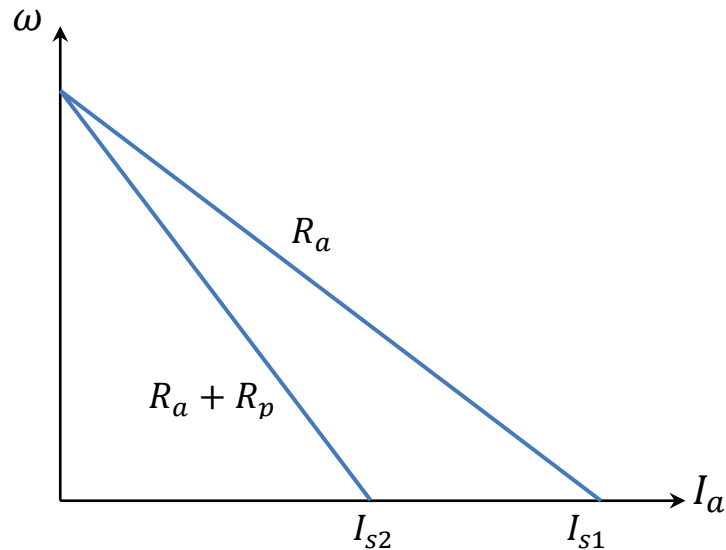
Nhận xét:

- $R_a$  nhỏ  $\rightarrow T_s$  lớn  $\rightarrow$  phù hợp trong điều kiện tải lớn.
  - $R_a$  nhỏ  $\rightarrow I_s$  lớn  $\rightarrow$  nếu vượt quá giới hạn cho phép có thể làm hỏng động cơ
- Các biện pháp giảm dòng khởi động:
- Giảm  $V_{in}$  lúc khởi động.



Đặc tính cơ điện khi tăng/giảm  $V_{in}$

- Mắc thêm điện trở phụ nối tiếp cuộn dây phần ứng.



Đặc tính cơ điện khi mắc thêm điện trở phụ  $R_p$

- Công suất cơ (ra):

$$P_{out} = T\omega \quad (5.18)$$

- Công suất điện (vào):

$$P_{in} = I_a V_{in} \quad (5.19)$$

- Hiệu suất:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (5.20)$$

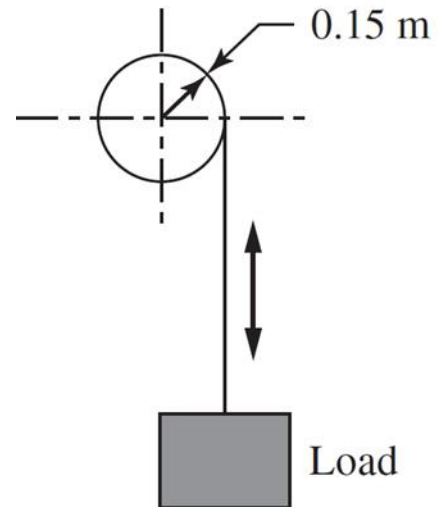
**VD:** Cho động cơ DC kích từ nam châm vĩnh cửu có các thông số như sau:  $V_{in} = 24V_{DC}$ ,  $R_a = 0.25\Omega$ ,  $K_E = 15 \text{ V/krpm}$ . Xác định dòng điện động cơ khi:

- Khởi động.
- Tốc độ động cơ 1200rpm.



**Giải: ...**

**VD:** Một động cơ DC công suất 1/4 hp được dùng để kéo 1 pulley bán kính 0,15m nâng một vật nặng 10kg (như hình) từ trạng thái đứng yên. Tốc độ không tải của động cơ là 300rpm, moment khởi động là 23,8Nm. Moment cản do ma sát là 2Nm. Bỏ qua moment quán tính của rotor, pulley và cable. Hãy tính:



- Gia tốc khởi động của tải.
- Tốc độ nâng khi xác lập.
- Công suất cơ khi xác lập.

(1hp = 746 W)

**Giải: ...**

### 5.2.3) Mô hình động cơ DC kích từ nam châm vĩnh cửu

- Nhắc lại các phương trình:

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E(t)$$

$$E(t) = K_E \omega(t)$$

$$T(t) = T_L(t) + b_m \omega(t) + J_m \frac{d\omega(t)}{dt}$$

$$T(t) = K_T I_a(t)$$

- Xét trường hợp không tải ( $T_L(t) = 0$ ). Thực hiện biến đổi Laplace các phương trình trên, với giả thiết điều kiện đầu bằng 0, ta có hàm truyền từ  $V_a$  đến  $\omega$ :

$$\begin{aligned}\frac{\omega(s)}{V_a(s)} &= \frac{K_T}{(J_m s + b_m)(L_a s + R_a) + K_E K_T} \\ &= \frac{K_T}{J_m L_a s^2 + (b_m L_a + J R_a) s + b_m R_a + K_E K_T}\end{aligned}$$

- Trong trường hợp bỏ qua ma sát  $b_m$ , hàm truyền đơn giản hóa thành:

$$\begin{aligned}\frac{\omega(s)}{V_a(s)} &= \frac{\frac{K_T}{J_m L_a}}{s^2 + \frac{R_a}{L_a} s + \frac{K_E K_T}{J_m L_a}} \\ \Rightarrow \frac{\omega(s)}{V_a(s)} &= \frac{K_v}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)}\end{aligned}\tag{5.21}$$

trong đó:

$$\tau_m = \frac{J_m R_a}{K_T K_E}: \text{thời hằng cơ}$$

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a}: \text{thời hằng điện}$$

$$K_v = 1/K_E$$

- Hàm truyền từ  $V_a$  đến  $\theta$ :

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_v}{s(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)}\tag{5.22}$$

- Thực tế, thường  $\tau_m \gg \tau_e \Rightarrow$  Hàm truyền động cơ DC từ  $V_a$  đến  $\omega$  là hàm truyền bậc 2 có 2 cực cách xa nhau, trong đó  $-1/\tau_m$  là cực trội. Hàm truyền này (trong một số trường hợp) có thể xấp xỉ thành hàm truyền bậc 1 bằng cách loại bỏ cực không trội.

## Bảng thông số Servo DC Motor PITTMAN 9236 series

Brush Commutated DC Servo Motors

9236 Series

**PITTMAN**®

Specification	Units	9236 9.55 V	9236 12.0 V	9236 15.2 V	9236 19.1 V	9236 24.0 V
Supply Voltage	VDC	9.55	12.0	15.2	19.1	24.0
Continuous Torque	oz-in	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50
	Nm	0.0671	0.0671	0.0671	0.0671	0.0671
Speed @ Cont. Torque	RPM	3530	3750	3850	3880	3980
Current @ Cont. Torque	Amps (A)	4.52	3.65	2.88	2.26	1.82
Continuous Output Power	Watts (W)	25	26	27	27	28
Motor Constant	oz-in/sqrt W	3.7	3.9	4.0	4.1	4.1
	Nm/sqrt W	0.026	0.028	0.028	0.029	0.029
Torque Constant	oz-in/A	2.62	3.25	4.12	5.24	6.49
	Nm/A	0.019	0.023	0.029	0.037	0.046
Voltage Constant	V/krpm	1.94	2.40	3.05	3.87	4.80
	V/rad/s	0.019	0.023	0.029	0.037	0.046
Terminal Resistance	Ohms	0.50	0.71	1.07	1.64	2.49
Inductance	mH	0.43	0.66	1.06	1.72	2.63
No-Load Current	Amps (A)	0.40	0.33	0.26	0.20	0.16
No-Load Speed	RPM	4730	4800	4800	4750	4820
Peak Current	Amps (A)	19.1	16.9	14.2	11.6	9.64
Peak Torque	oz-in	49.0	53.9	57.5	60.0	61.5
	Nm	0.3459	0.3805	0.406	0.4236	0.4342
Coulomb Friction Torque	oz-in	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
	Nm	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056
Viscous Damping Factor	oz-in/krpm	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
	Nm s/rad	3.56E-6	3.56E-6	3.56E-6	3.56E-6	3.56E-6
Electrical Time Constant	ms	0.86	0.93	0.99	1.0	1.1
Mechanical Time Constant	ms	10	10	8.9	8.5	8.4
Thermal Time Constant	min	14	14	14	14	14
Thermal Resistance	Celsius/W	14	14	14	14	14
Max. Winding Temperature	Celsius	155	155	155	155	155
Rotor Inertia	oz-in-sec <sup>2</sup>	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
	kg-m <sup>2</sup>	7.06E-6	7.06E-6	7.06E-6	7.06E-6	7.06E-6
Weight (Mass)	oz	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
	g	391.2	391.2	391.2	391.2	391.2

**VD:** Tra bảng thông số động cơ DC PITTMAN 9236 24.0V

- Tính thông số moment cực đại, so sánh với trị số tương ứng trong bảng.
- Tính hằng số điện và hằng số cơ, so sánh với trị số tương ứng trong bảng.
- Xác định hàm truyền  $\omega(s)/V_a(s)$ .

**Giải**

Tra bảng thông số kỹ thuật của nhà sản xuất, ta có:

$$K_E = 0,046 \text{ Nm/A}, K_T = 0,046 \text{ V/rad/sec}, R_a = 2,49\Omega, L_a = 2,63\text{mH}, J_m = 7,06 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2.$$

a) Moment đạt cực đại khi  $\omega = 0$ , thế vào phương trình đặt tính cơ:

$$\omega = \frac{V_a}{K_E} - \frac{R_a}{K_E K_T} T = 0$$

$$\Rightarrow T = \frac{V_a}{R_a} \times K_T = \frac{24}{2,49} \times 0,046 = 0,443 \text{ Nm}$$

b) Thời hằng cơ:

$$\tau_m = \frac{J_m R_a}{K_T K_E} = \frac{7,06 \times 10^{-6} \times 2,49}{0,046 \times 0,046} = 0,00831 \text{ s} = 8,31 \text{ ms}$$

Thời hằng điện:

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{2,63 \times 10^{-3}}{2,49} = 0,0011 \text{ s} = 1,1 \text{ ms}$$

c) Hàm truyền:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{21,7}{(0,00831s + 1)(0,0011s + 1)}$$

**VD:** Động cơ DC có các thông số:  $K_E = 6.7 \times 10^{-2} \text{ V.sec}$ ,  $K_T = 6.7 \times 10^{-2} \text{ Nm/A}$ ,  $R_a = 0.5\Omega$ ,  $L_a = 2\text{mH}$ ,  $J_m = 4.8 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ . Xác định hàm truyền  $\theta(s)/V_a(s)$  ( $\theta$  là góc quay của trục động cơ).

**Giải ...**

### 5.2.4) Động cơ DC kích từ nối tiếp ở trạng thái xác lập

$R_a$ : điện trở cuộn dây phần ứng.

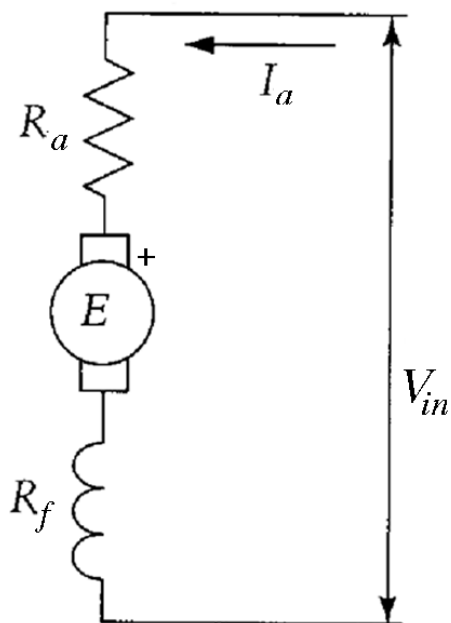
$R_f$ : điện trở cuộn dây kích từ.

Do dòng điện qua cuộn kích từ = dòng điện phần ứng ( $I_a$ ) thay đổi, nên  $K_T$  và  $K_E$  biến thiên.

Đặt:

$$K\Phi = K_E = K_T$$

trong đó,  $\Phi$  là từ thông kích từ,  $K$  là hằng số tỉ lệ phụ thuộc vào vật liệu mạch từ và dây quấn stator,  $K_E$  và  $K_T$  là hằng số điện và hằng số momen của động cơ có đơn vị trong hệ SI.



- Từ sơ đồ tương đương, viết phương trình định luật Kirchhoff:

$$\begin{aligned} V_{in} &= R_a I_a + R_f I_a + E \\ \Rightarrow I_a &= \frac{V_{in} - E}{R_a + R_f} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Ngoài ra, ta có:

$$\begin{aligned} E &= K_E \omega \\ T &= K_T I_a \end{aligned}$$

Theo đó, phương trình đặc tính cơ của động cơ DC kích từ nối tiếp được viết lại như sau:

$$\omega = \frac{V_{in}}{K\Phi} - \frac{R_a + R_f}{(K\Phi)^2} T \quad (5.24)$$

- Giả sử động cơ hoạt động trong vùng tuyến tính của đặc tuyến quan hệ dòng điện – từ thông kích từ,

$$\Phi = CI_a \quad (C \text{ là hằng số}) \quad (5.25)$$

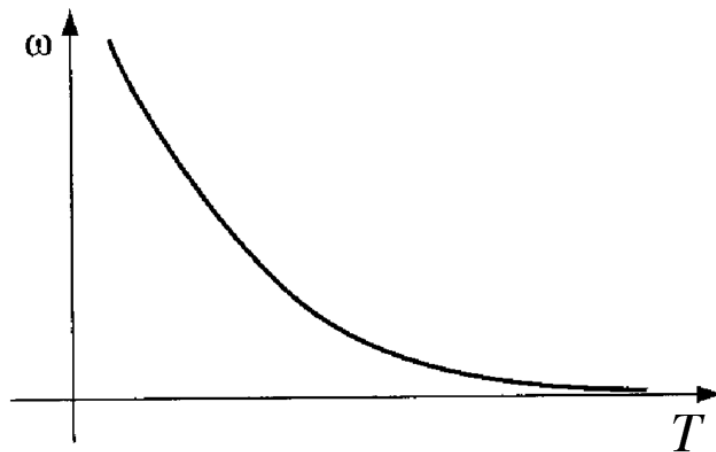
$$\Rightarrow T = K\Phi I_a = KCI_a^2 \quad (5.26)$$

Thế (5.19)-(5.20) vào (5.18), ta có:

$$\omega = \frac{V_{in}}{KCI_a} - \frac{R_a + R_f}{KC} \quad (5.27)$$

Thế (5.14) vào (5.15), ta có phương trình đặc tính cơ động cơ DC kích từ nối tiếp:

$$\omega = \frac{V_{in}}{\sqrt{KCT}} - \frac{R_a + R_f}{KC} \quad (5.28)$$



Đồ thị đặc tính cơ động cơ DC kích từ nối tiếp

Khi không tải ( $T \approx 0$ ), tốc độ tăng cao, có thể gây hư hỏng các bộ phận cơ khí. Vì vậy, động cơ DC kích từ nối tiếp khi hoạt động cần phải luôn có tải. Với đặc tính có tốc độ cao khi tải nhẹ, loại động cơ này còn được dùng trong các ứng dụng đòi hỏi tốc độ cao.

- Dòng khởi động (dòng quá tải): được xác định bằng cách thế  $E = 0$  (vì  $\omega = 0$ ) vào (5.17):

$$I_s = \frac{V_{in}}{R_a + R_f} \quad (5.29)$$

- Momen khởi động:

$$T_s = K\Phi I_s = KCI_s^2 = KC \left( \frac{V_{in}}{R_a + R_f} \right)^2 \quad (5.30)$$

Momen khởi động động cơ DC kích từ nối tiếp lớn hơn nhiều so với momen khởi động động cơ DC kích từ độc lập (cùng công suất). Vì vậy, nó được sử dụng trong những ứng dụng đòi hỏi mômen khởi động cao.

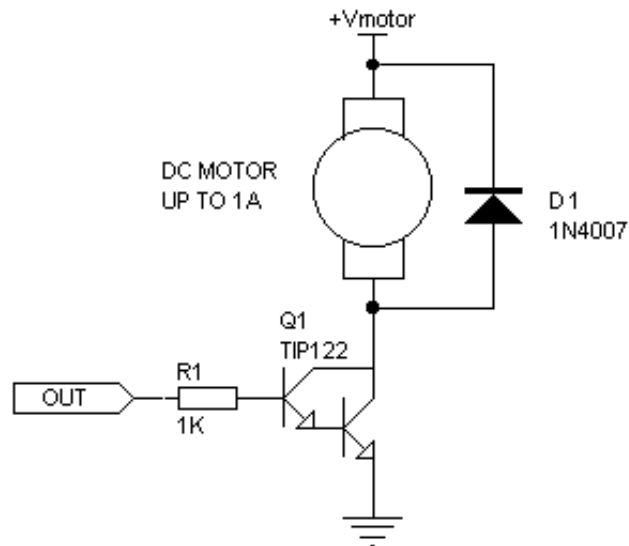
Ngoài ra, khi điện áp cấp đổi chiều, dòng điện kích từ cũng đổi chiều; vì vậy chiều quay của động cơ vẫn duy trì không đổi. Do đó, động cơ DC kích từ nối tiếp có thể được chế tạo để chạy với nguồn điện xoay chiều. Loại động cơ này được gọi là động cơ vạn năng (universal motor).

Nhờ vào đặc điểm này, cùng với ưu điểm là có mômen khởi động (mômen quá tải) lớn, động cơ sử dụng điện xoay chiều dựa trên nguyên lý động cơ DC kích từ nối tiếp được sử dụng rộng rãi trong các sản phẩm đòi hỏi mômen quá tải lớn như máy xay/nghiền, máy khoan, máy cưa, máy mài, ...

Việc điều chỉnh tốc độ của động cơ dựa trên nguyên tắc giảm điện áp đưa vào động cơ bằng cuộn cảm kháng, thường quấn chung với cuộn gây kích từ.

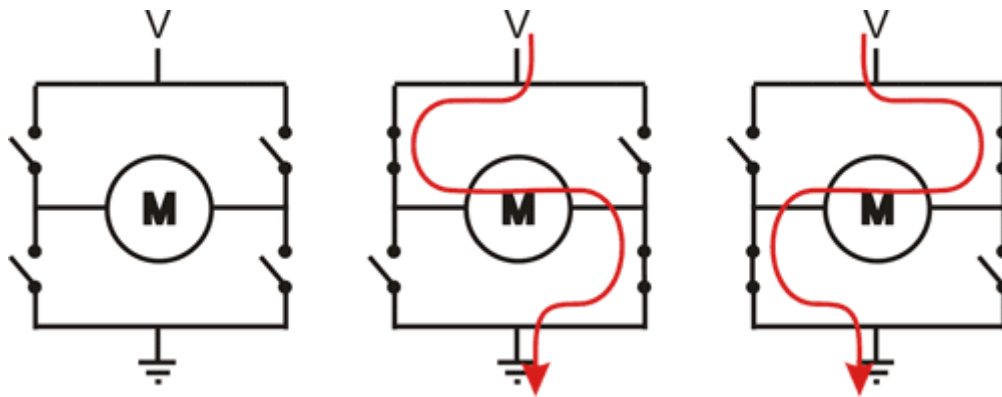
### 5.2.5) Mạch điều khiển động cơ DC

- Mạch driver 1 transistor:

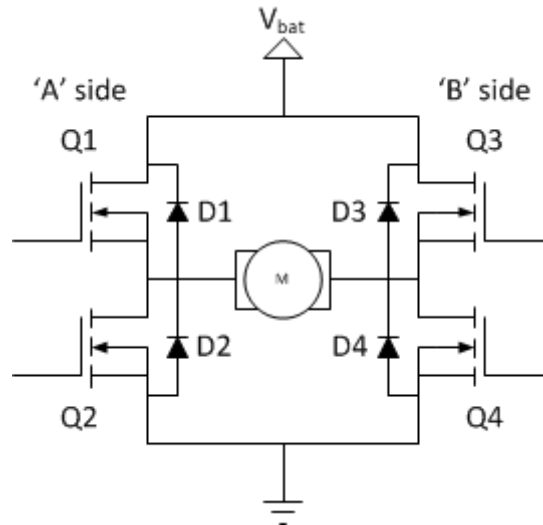


Mạch driver chỉ điều khiển động cơ theo 1 chiều.

- Mạch cầu H: có thể điều khiển động cơ theo 2 chiều.

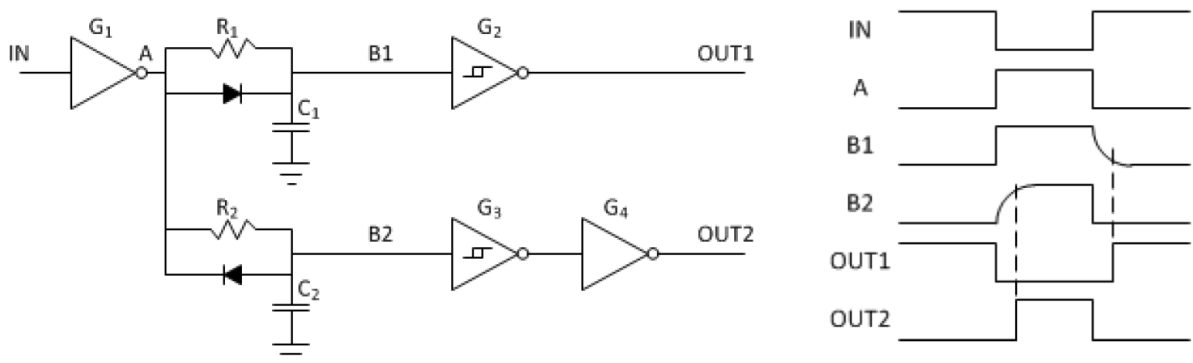






Vi mạch cầu H: L298, LMD18200, DRV8833C, ...

- Trùng dẫn (Shoot-through): Hiện tượng 2 transistor trên cùng 1 nhánh cầu H dẫn cùng lúc, gây ngắn mạch.
- Giải pháp chống “trùng dẫn”:
  - Bằng phần mềm (chương trình điều khiển): Nếu việc điều khiển các transistor trên cùng 1 nhánh mạch đóng/ngắt được thực hiện bởi chương trình, thì để chống trùng dẫn cần chèn lệnh delay ngay sau khi ngắt 1 transistor và trước khi đóng transistor còn lại.
  - Bằng phần cứng: Dùng linh kiện rời hoặc các vi mạch tích hợp.



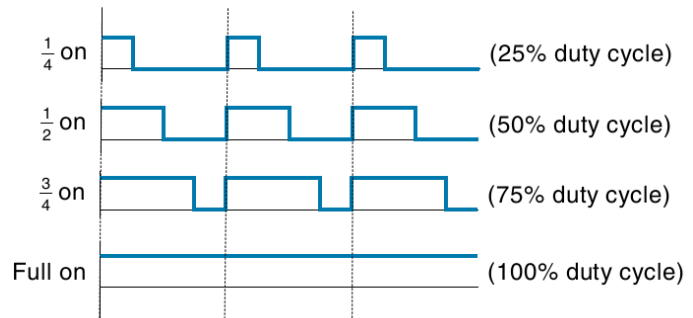
Mạch tích hợp chống trùng dẫn: IR3220S, MIC4605, MIC4102, LM5104,...

- Điều chế độ rộng xung (PWM – Pulse Width Modulation):

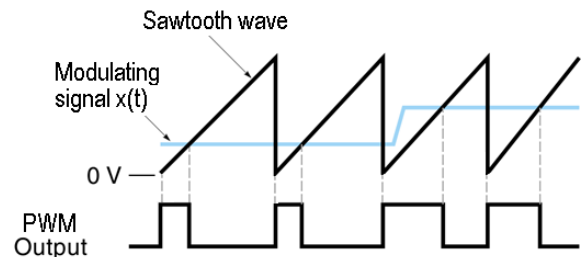
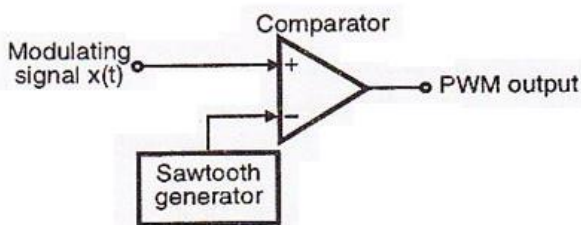
Điện áp trung bình:

$$V_{avg} = \frac{t_{on}}{T} V_{dc}$$

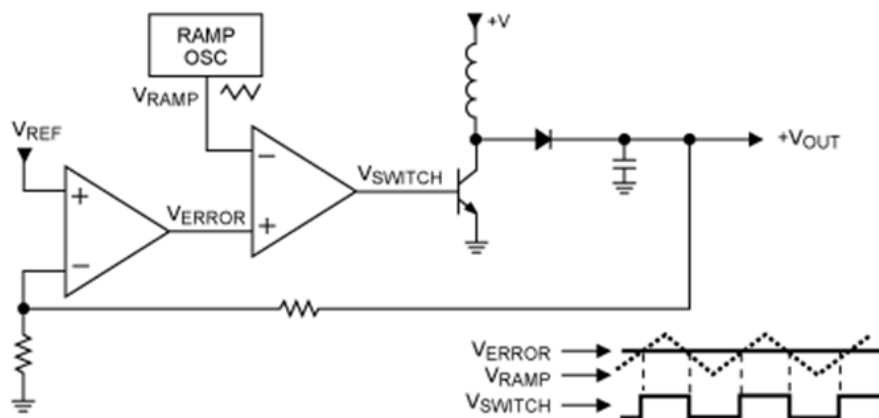
với chu kỳ  $T$  và điện áp nguồn  $V_{dc}$  được duy trì không đổi, ta có thể thay đổi độ rộng xung  $t_{on}$  để thay đổi điện áp trung bình trên tải.



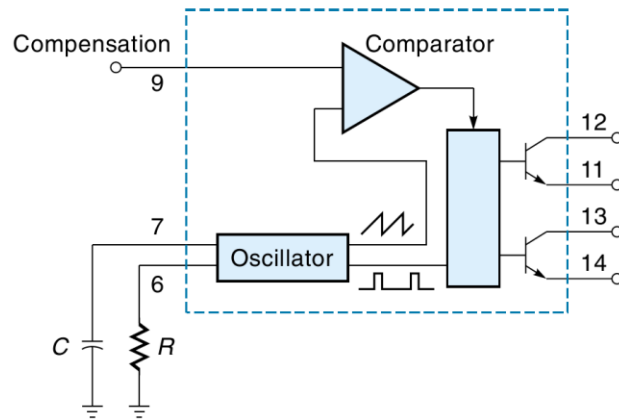
- Nguyên lý mạch tạo xung PWM:



- Mạch tạo xung PWM có phản hồi:

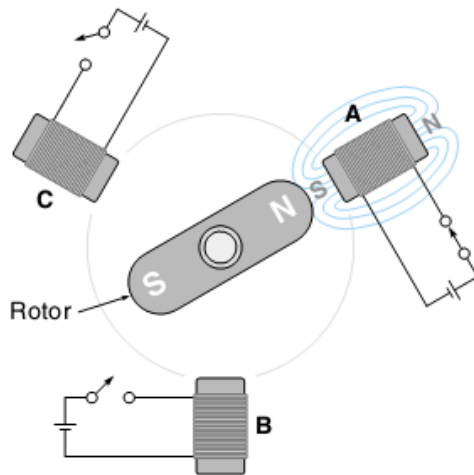


- Vi mạch tạo xung PWM - LM3524

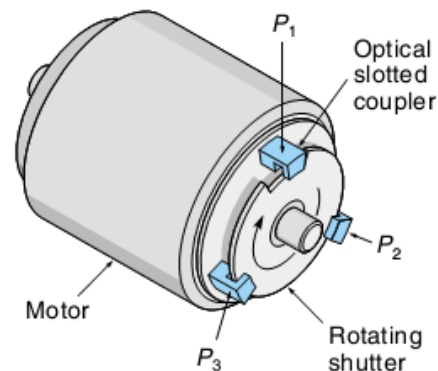


### 5.3) Động cơ DC không chổi than (Brushless DC Motor)

- Rotor: nam châm vĩnh cửu. Stator: cuộn dây phần ứng → không cần chổi than/cổ góp.

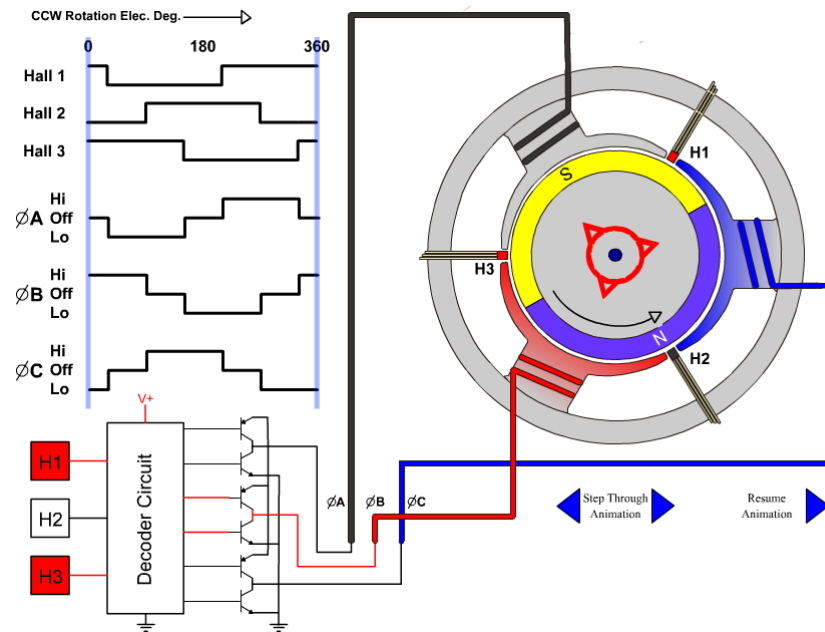


(a) Field coil arrangement



(b) Rotating shutter and sensors

- BLDC có cảm biến để xác định vị trí rotor (nam châm vĩnh cửu), qua đó điều khiển cấp điện cho các cuộn dây ở stator.
- Khi rãnh hở ở vị trí P1, cuộn dây A sẽ được cấp điện. Rotor sẽ quay hướng đến cuộn dây A. Khi nam châm rotor cùng phương với cuộn A, P1 sẽ tắt, P2 kích hoạt, cuộn dây B được cấp điện, ...
- Động cơ BLDC dùng cảm biến Hall

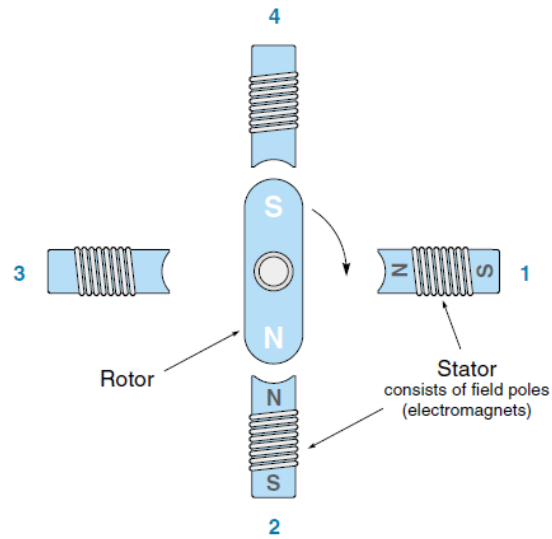


## 5.4) Động cơ bước

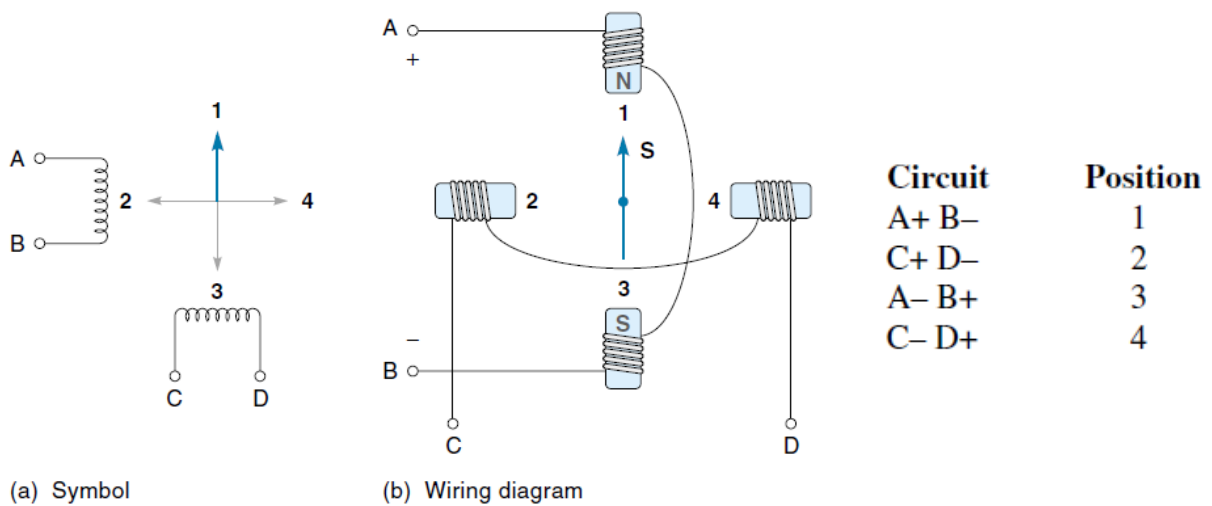
- Động cơ bước là loại động cơ điện biến đổi các tín hiệu điều khiển dưới dạng các xung điện rời rạc liên tiếp nhau thành chuyển động quay.
- Có 3 loại:
  - Động cơ bước nam châm vĩnh cửu (PM stepper motor).
  - Động cơ bước có từ trở biến thiên (Variable-reluctance).
  - Động cơ bước hỗn hợp (lai).

### 5.4.1) Động cơ bước nam châm vĩnh cửu

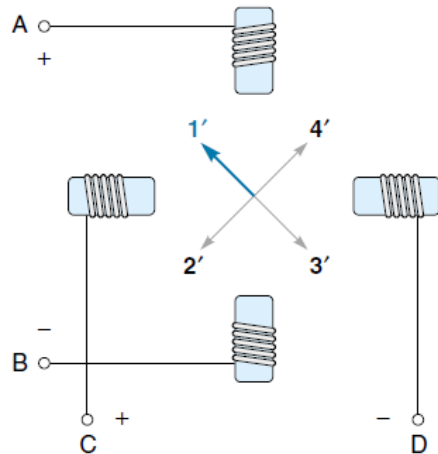
- Rotor là nam châm vĩnh cửu
- Đặc điểm:
  - momen bước lớn,
  - có momen giữ ngay cả khi không có dòng điện qua các cuộn dây,
  - không thực hiện được bước nhỏ.



- Động cơ bước 2 pha:  $90^\circ$ /bước

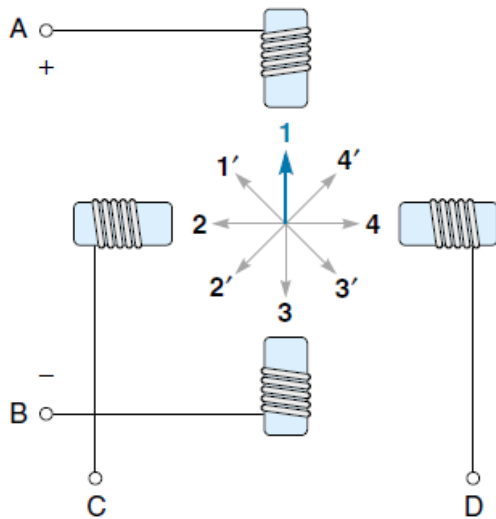


- Kích 2 cuộn 1 lúc  $\rightarrow$  tăng moment xoắn



Circuits	Position
A+ B- and C+ D-	1'
A- B+ and C+ D-	2'
A- B+ and C- D+	3'
A+ B- and C- D+	4'

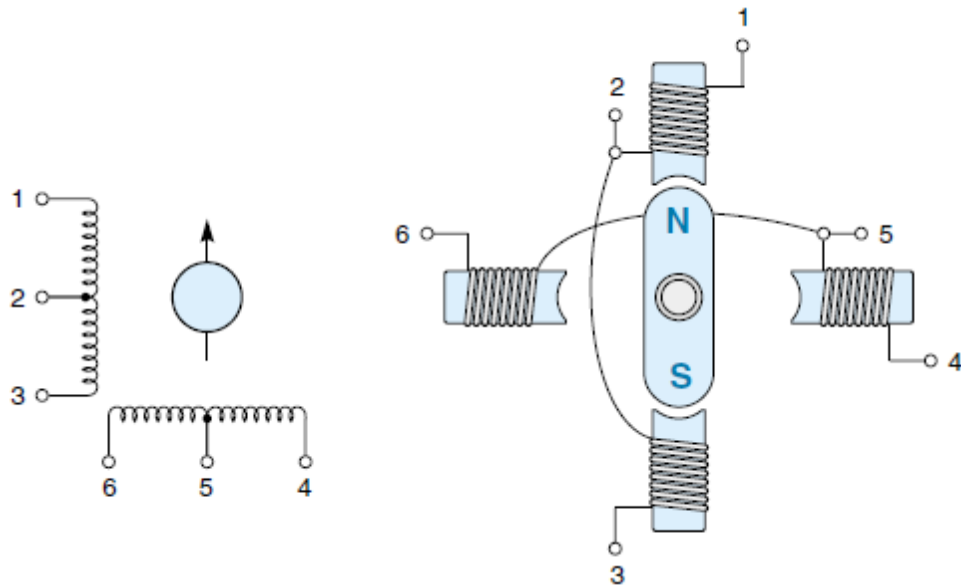
- Half-step:



Circuit	Position
A+ B-	1
C+ D-	2
A- B+	3
C- D+	4

Circuits	Position
A+ B- and C+ D-	1'
A- B+ and C+ D-	2'
A- B+ and C- D+	3'
A+ B- and C- D+	4'

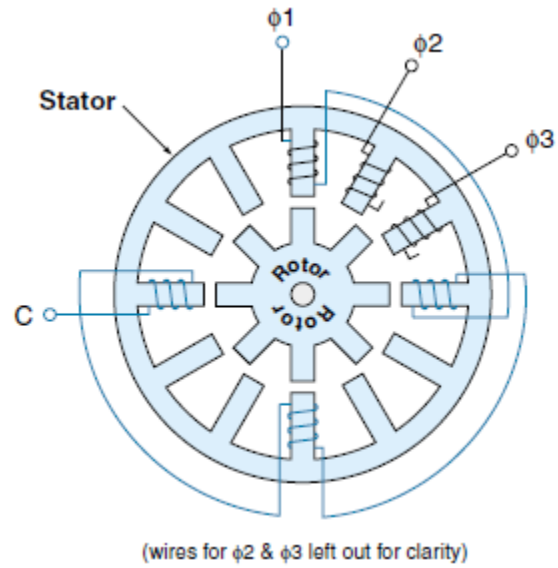
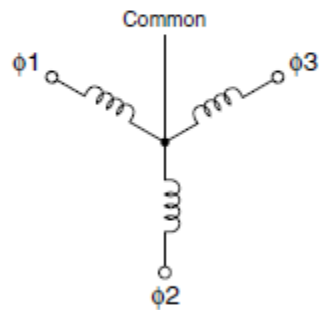
- Động cơ bước 4 pha có điểm giữa → có thể sử dụng mode 2 pha hoặc mode 4 pha.



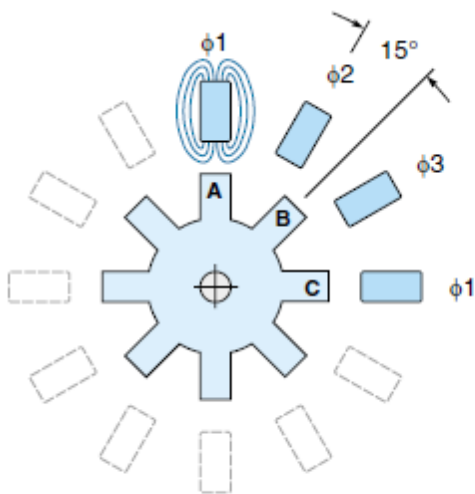
- Để có bước nhỏ hơn, tăng số pha (tăng số cuộn stator),
- Độ lớn bước của một số động cơ bước PM tiêu biểu:  $30^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $7.5^\circ$ .

#### 5.4.2) Động cơ bước từ trở biến thiên

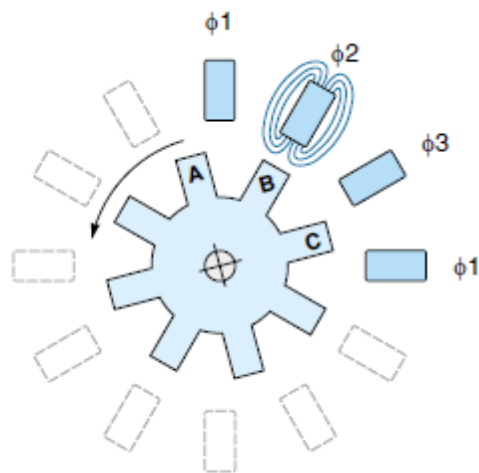
- Rotor là sắt từ mềm, có nhiều răng moment nhỏ,
- Đặc điểm:
  - o moment bước không lớn bằng loại PM,
  - o không có moment giữ khi không cấp điện cho các cuộn dây,
  - o có thể thực hiện bước nhỏ bằng cách tăng số răng rotor.
- Thường có 3 hoặc 4 pha.



- Nguyên lý:



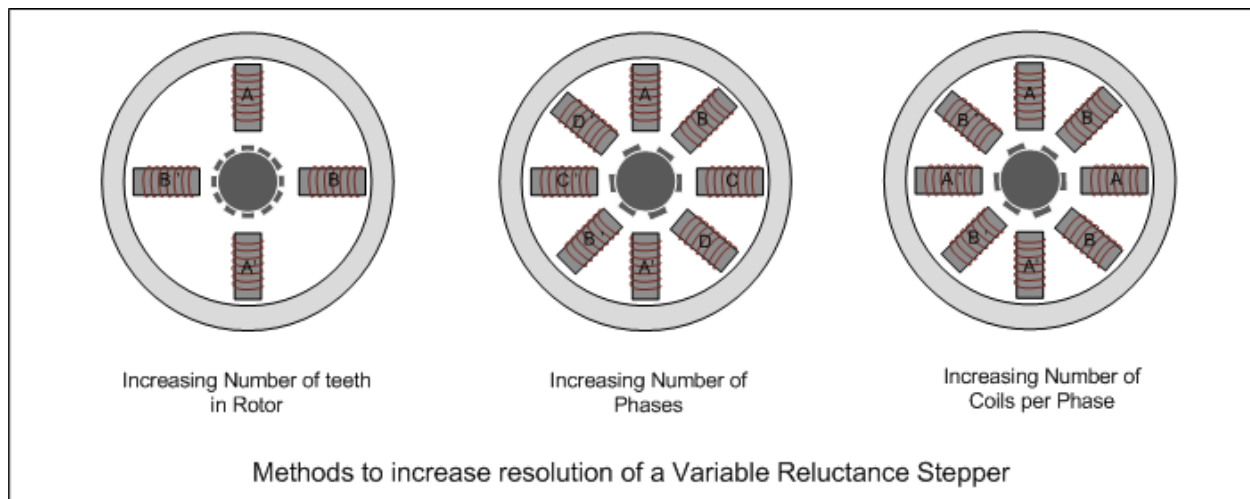
(a) Pole Ø1 energized



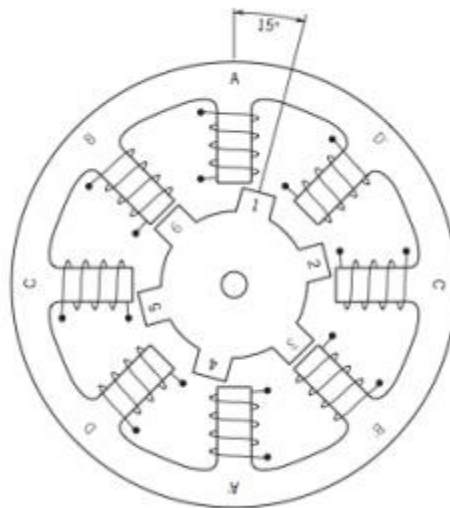
(b) Pole Ø2 energized

- Tăng độ phân giải bằng cách tăng số răng rotor hoặc tăng số cuộn dây trên 1 pha.





- Góc 1 bước bằng hiệu của góc giữa 2 cực kề nhau trên rotor và góc giữa 2 cực kề nhau trên stator.



Theo hình trên:

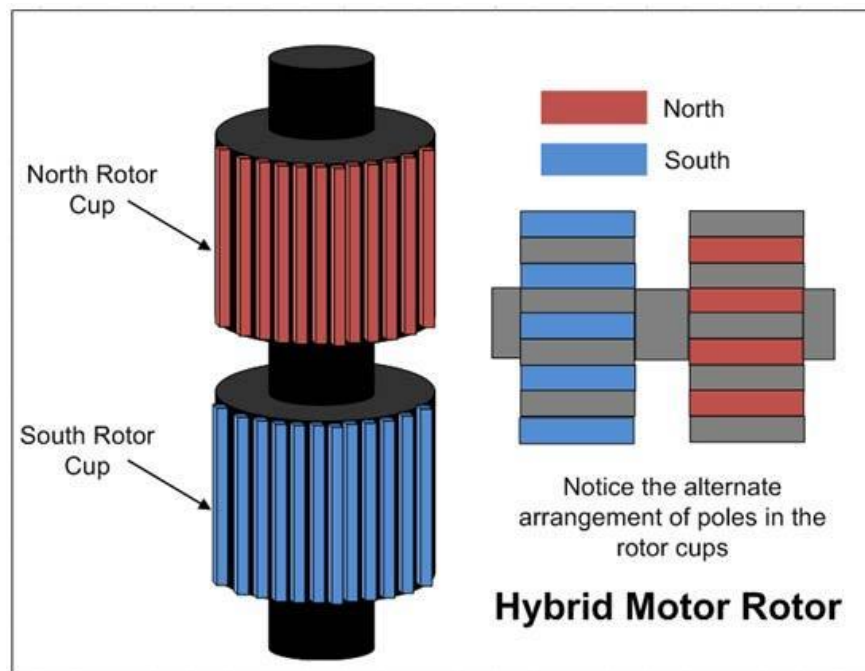
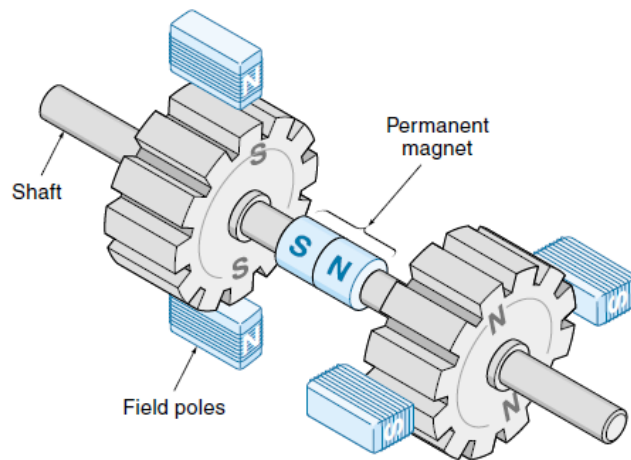
$$\text{Góc rotor} = 360^\circ / 6 = 60^\circ, \text{ góc stator} = 360^\circ / 8 = 45^\circ$$

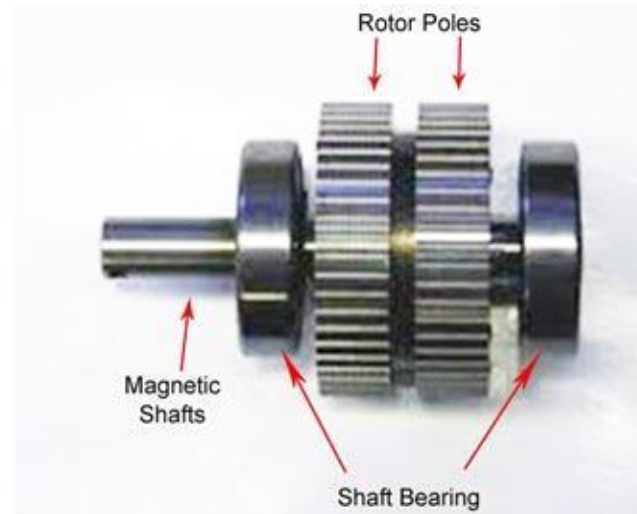
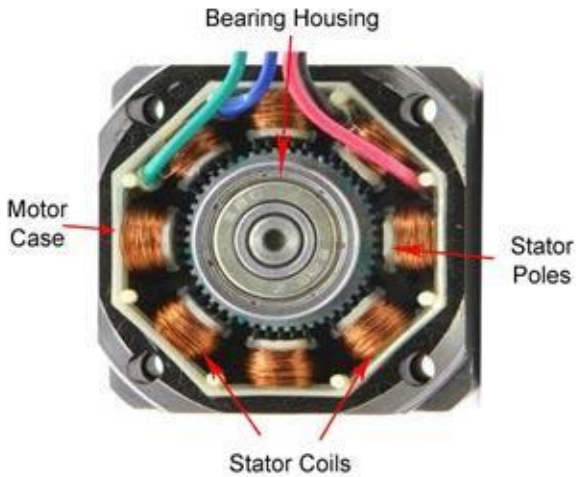
$$\Rightarrow \text{Góc 1 bước} = 60^\circ - 45^\circ = 15^\circ$$

### 5.4.3) Động cơ bước hỗn hợp (Hybrid stepper motor)

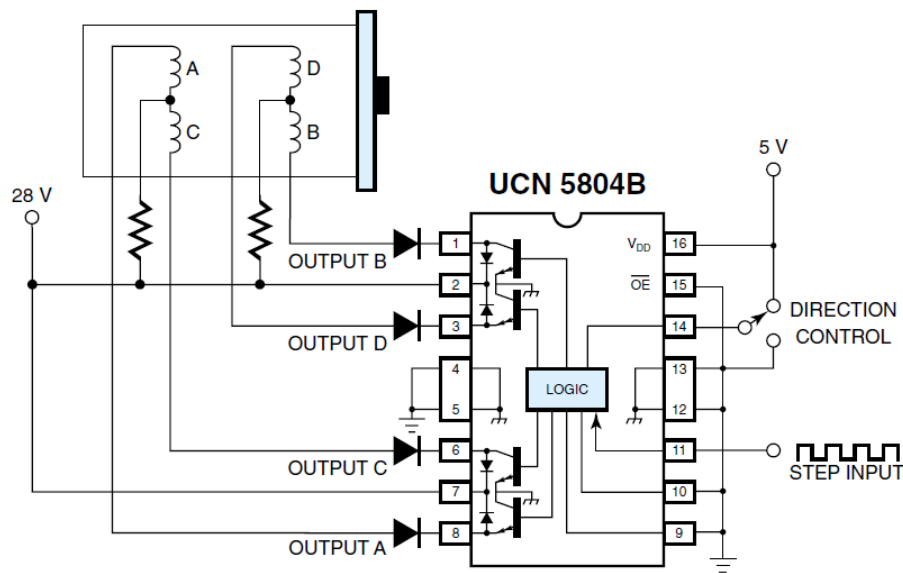
- Kết hợp cả nam châm vĩnh cửu và từ trở biến thiên  $\rightarrow$  có các ưu điểm của cả 2 loại động cơ bước nam châm vĩnh cửu và từ trở biến thiên. Đây là loại động cơ bước được sử dụng phổ biến hiện nay.

- Rotor có nhiều răng, gồm 2 tầng có từ tính như hình. Các răng rotor phía cực bắc và cực nam được xếp xen kẽ nhau.



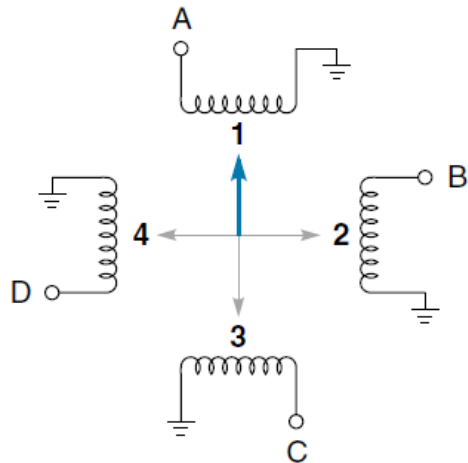


- Một số vi mạch driver/controller cho động cơ bước: L297 (ST), TB6560 (Toshiba), STK672-080 (Sanyo), DRV8811 (TI), UCN-5804B (Allegro).
- **Allegro UCN-5804B**: a unipolar stepper motor translator/driver



**TRUTH TABLE**

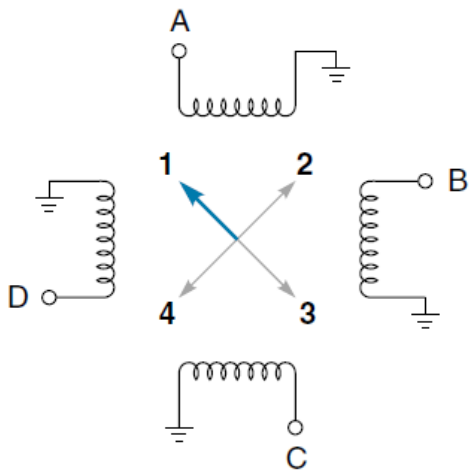
Drive Format	Pin 9	Pin 10
Two-Phase	L	L
One-Phase	H	L
Half-Step	L	H
Step-Inhibit	H	H



a) Wave-drive (One-phase)

### WAVE-DRIVE SEQUENCE

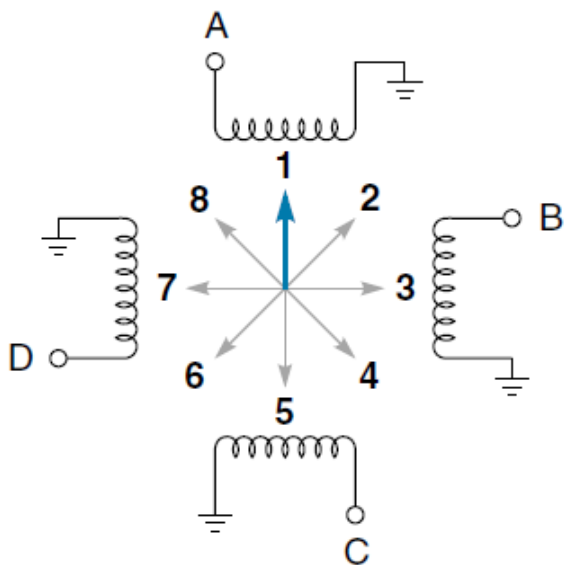
Half Step = L, One Phase = H				
Step	A	B	C	D
POR	ON	OFF	OFF	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	ON	OFF	OFF
3	OFF	OFF	ON	OFF
4	OFF	OFF	OFF	ON



b) Two-phase

### TWO-PHASE DRIVE SEQUENCE

Half Step = L, One Phase = L				
Step	A	B	C	D
POR	ON	OFF	OFF	ON
1	ON	OFF	OFF	ON
2	ON	ON	OFF	OFF
3	OFF	ON	ON	OFF
4	OFF	OFF	ON	ON



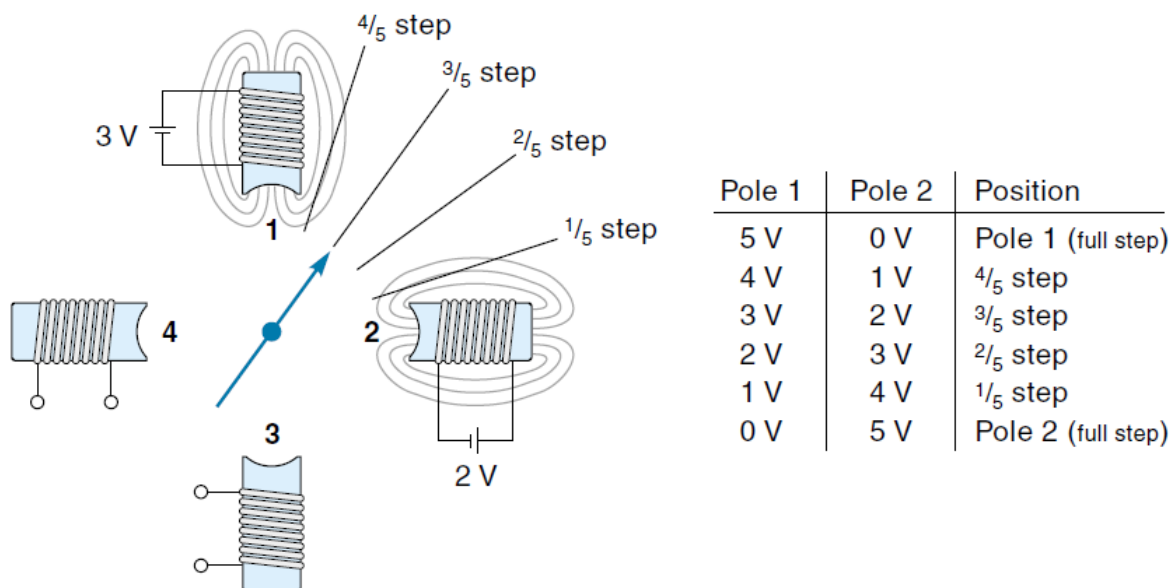
c) Half-step

### HALF-STEP DRIVE SEQUENCE

Half Step = H, One Phase = L				
Step	A	B	C	D
POR	ON	OFF	OFF	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	OFF	OFF
3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	ON	ON	OFF
5	OFF	OFF	ON	OFF
6	OFF	OFF	ON	ON
7	OFF	OFF	OFF	ON
8	ON	OFF	OFF	ON

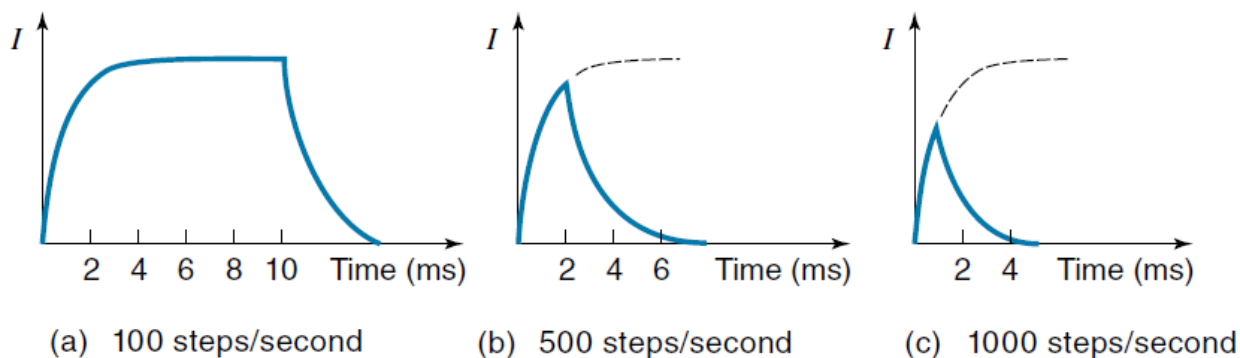
#### 5.4.4) Điều khiển vi bước (microstep)

- Độ lớn vi bước thông thường (so với fullstep): 1/5, 1/10, 1/16, 1/32, 1/125, 1/250.
- Điều khiển vi bước được thực hiện bằng cách điều khiển mức điện áp 2 cực kề nhau thông qua việc điều chế độ rộng xung PWM.



#### 5.4.5) Biện pháp tăng moment khi hoạt động ở tốc độ cao

- Khi tăng tốc độ cơ bước  $\rightarrow$  tần số xung cấp cho các cuộn dây tăng  $\rightarrow$  momen giảm, có thể gây “mất bước”.
- Nguyên nhân:

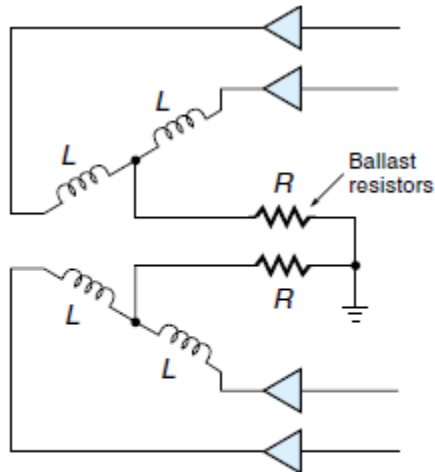


Thời hằng các cuộn dây:  $\tau = \frac{L}{R}$

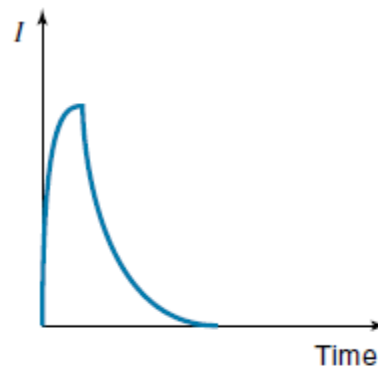
- Biện pháp tăng moment bước:

### (1) Tăng R

Tăng R  $\rightarrow$  giảm  $\tau \rightarrow$  dòng điện qua cuộn dây sẽ tăng nhanh  $\rightarrow$  moment bước không bị suy giảm khi động cơ chạy tốc độ cao.



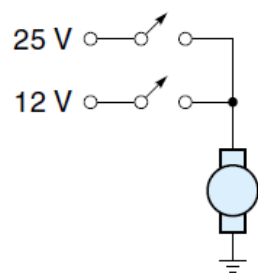
(a) Motor coils and ballast resistors



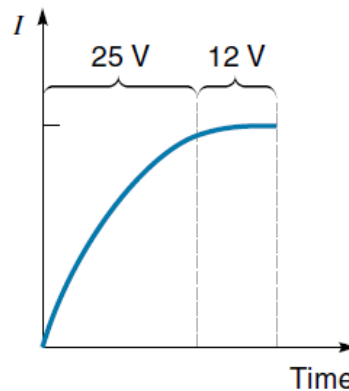
(b) Coil current at 1000 steps/second with ballast resistor

### (2) Kích xung bằng 2 mức điện áp:

- Sử dụng 2 nguồn kết hợp với các khóa chuyển mạch transistor.



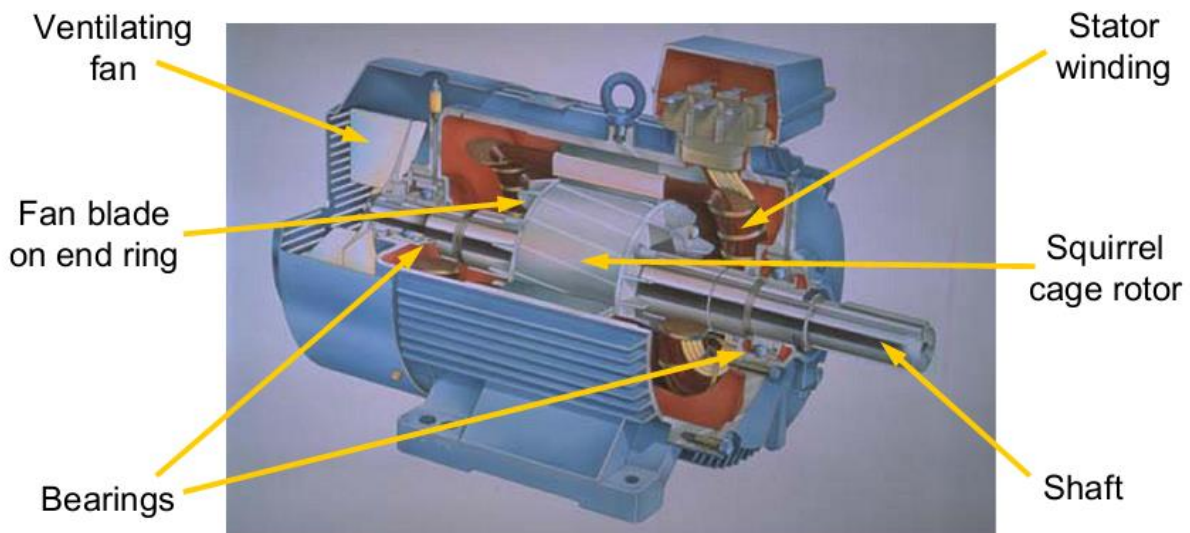
(a) Circuit



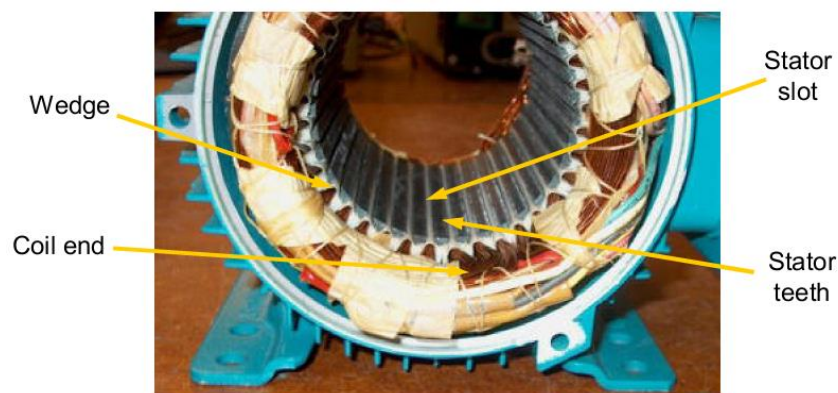
(b) First, 25 V is applied, then 12 V



- ĐCKĐB rôto lồng sóc (rôto ngắn mạch),
- ĐCKĐB rôto dây quấn.
- Ưu nhược điểm:
  - Ưu điểm: bền, tin cậy, dễ bảo trì, tương đối rẻ tiền (so với các loại động cơ khác cùng công suất).
  - Nhược điểm: điều khiển tốc độ và khống chế các quá trình quá độ khó khăn.
- Cấu tạo:

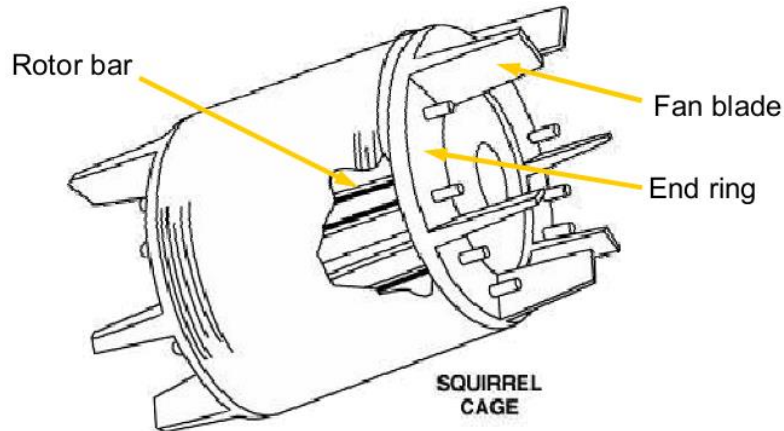


- Stator: gồm các lá thép có rãnh để đặt dây quấn 3 pha. Nêm được dùng để giữ dây quấn trong rãnh.

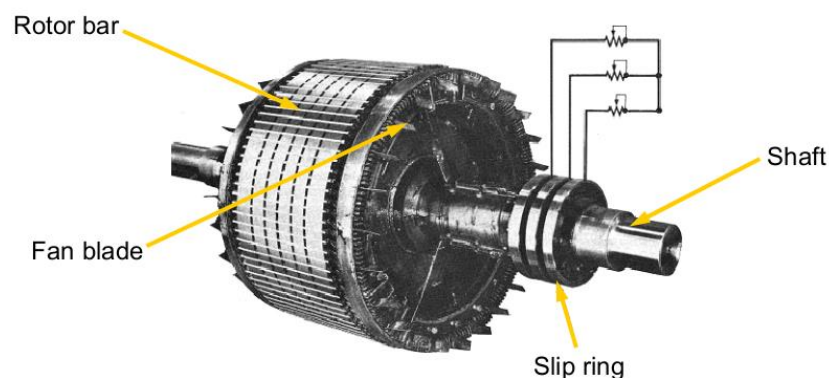




- Rotor lồng sóc: gồm các lá thép mỏng, có rãnh để đặt các thanh rotor. Các thanh rotor được ngắn mạch bởi 2 vành ngắn mạch ở 2 đầu.



- Rotor dây quấn: gồm các lá thép mỏng, có rãnh để đặt các thanh rotor. Các thanh này được sắp xếp thành dây quấn 3 pha. Dây quấn 3 pha được nối với điện trở ngoài hoặc nguồn điện riêng thông qua các vành trượt để đạt được đặc tính cơ mong muốn.



#### - Nguyên lý hoạt động:

- Các cuộn dây 3 pha stator được cấp nguồn điện 3 pha hình sin lệch nhau góc  $120^\circ$ .
- Dòng điện qua cuộn dây 3 pha sinh ra từ thông 3 pha.

- Từ thông khe hở không khí là từ thông tổng hợp của tất cả từ thông sinh ra bởi cuộn dây 3 pha → Từ trường quay với tốc độ đồng bộ  $n_s$ .

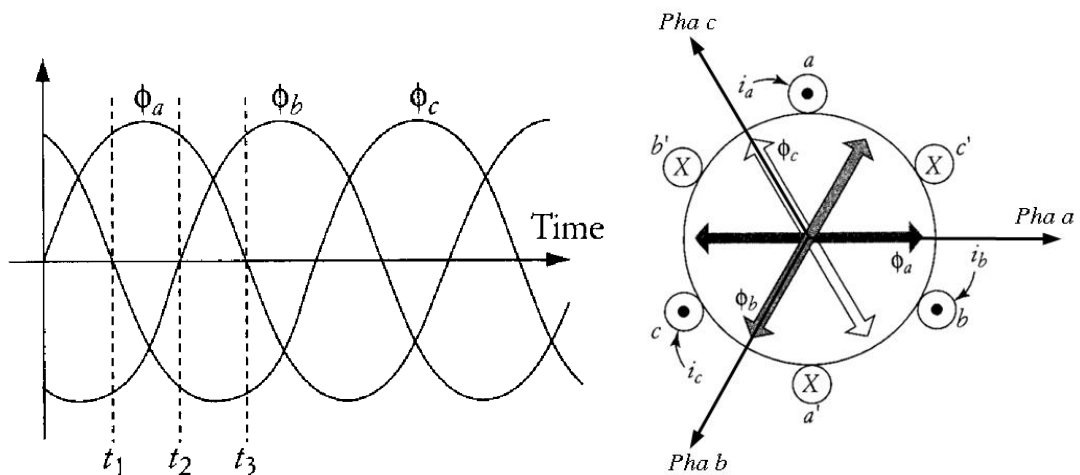
$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ [rpm]} \quad (5.31)$$

trong đó:  $p$  là số đôi cực.

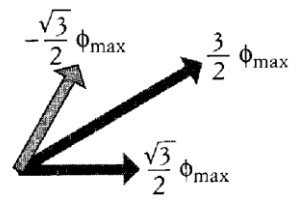
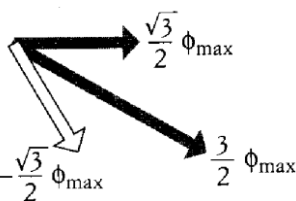
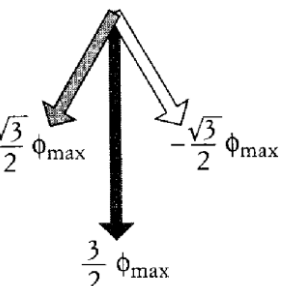
**VD:** Tần số  $f = 50 \text{ Hz}$ .

Số đôi cực (số cực)	Tốc độ đồng bộ
1 (2)	3000 rpm
2 (4)	1500 rpm
3 (6)	1000 rpm
4 (8)	750 rpm

- Xét động cơ KĐB 3 pha một đôi cực được cấp điện 3 pha. Từ thông qua khe hở không khí (giữa rotor và stator) do 3 cuộn dây trên stator sinh ra.



Từ thông tổng hợp khe hở không khí tại các thời điểm  $t_1, t_2, t_3$  ở hình trên:

$t$	$\vec{\phi}(t_1)$	Giản đồ vectơ
$t_1$	$\begin{aligned}\vec{\phi}(t_1) &= \vec{\phi}_a(t_1) + \vec{\phi}_b(t_1) + \vec{\phi}_c(t_1) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{\max} \angle 0^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{\max} \angle 60^\circ + 0 \\ &= \frac{3}{2} \phi_{\max} \angle 30^\circ\end{aligned}$	
$t_2$	$\begin{aligned}\vec{\phi}(t_2) &= \vec{\phi}_a(t_2) + \vec{\phi}_b(t_2) + \vec{\phi}_c(t_2) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{\max} \angle 0^\circ + 0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{\max} \angle -60^\circ \\ &= \frac{3}{2} \phi_{\max} \angle -30^\circ\end{aligned}$	
$t_3$	$\begin{aligned}\vec{\phi}(t_3) &= \vec{\phi}_a(t_3) + \vec{\phi}_b(t_3) + \vec{\phi}_c(t_3) \\ &= 0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{\max} \angle -120^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{\max} \angle -60^\circ \\ &= \frac{3}{2} \phi_{\max} \angle 30^\circ\end{aligned}$	

○ Định luật Faraday:  $\rightarrow e = f(\phi, \Delta\omega)$

trong đó:  $\Delta\omega$  là tốc độ tương đối của dây dẫn trên rotor so với từ thông khe hở (sinh bởi cuộn stator).

$$\Delta\omega = \omega_s - \omega \quad [\text{rad/s}]$$

$\omega_s$ : tốc độ từ thông khe hở (tốc độ đồng bộ),

$\omega$ : tốc độ rotor.

Định luật Lorentz:  $\rightarrow M = f(\phi, i)$

○ Khi xác lập:  $\Delta\omega \neq 0 \rightarrow e \rightarrow i \rightarrow M$

- Nếu tốc độ rotor = tốc độ đồng bộ, thì:

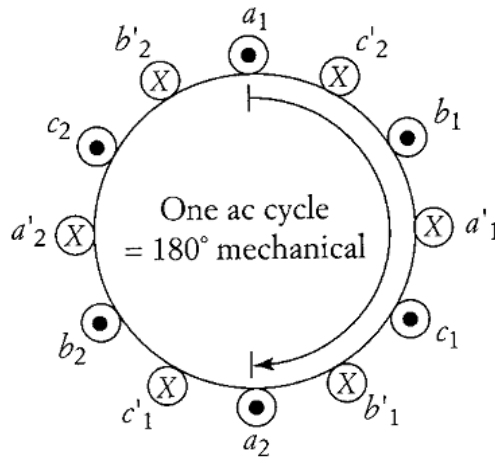
$$\Delta\omega = 0 \rightarrow e = 0 \rightarrow i = 0 \rightarrow M = 0 \rightarrow \omega \text{ giảm} \rightarrow \Delta\omega \neq 0$$

- Hệ số trượt:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\Delta\omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s} \quad (5.32)$$

Khi khởi động:  $s = 1$

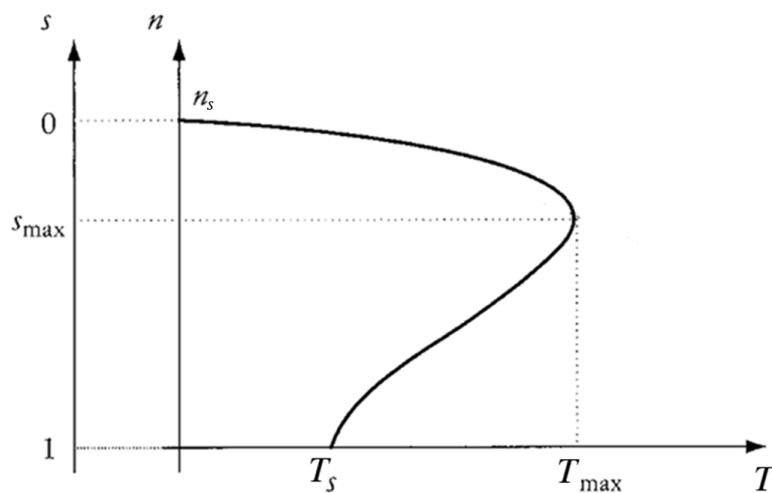
- Trường hợp số đôi cực bằng 2 (mỗi pha nối vào 2 cuộn dây):



$$\text{Tốc độ đồng bộ: } n_{syn} = \frac{60f}{p} = 30f \quad [\text{rpm}]$$

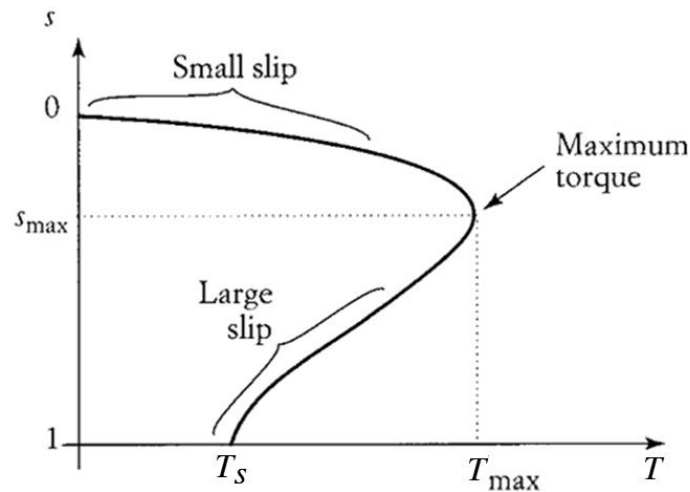
$$(p = 2)$$

### 5.5.2) Đặc tính cơ động cơ KĐB



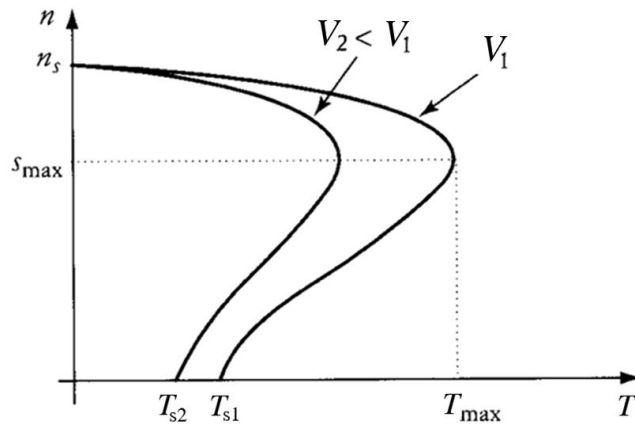
- Đặc tính cơ động cơ KĐB gồm 3 phần:

- Vùng trượt nhỏ,
- Điểm momen cực đại,
- Vùng trượt lớn (hay vùng khởi động).

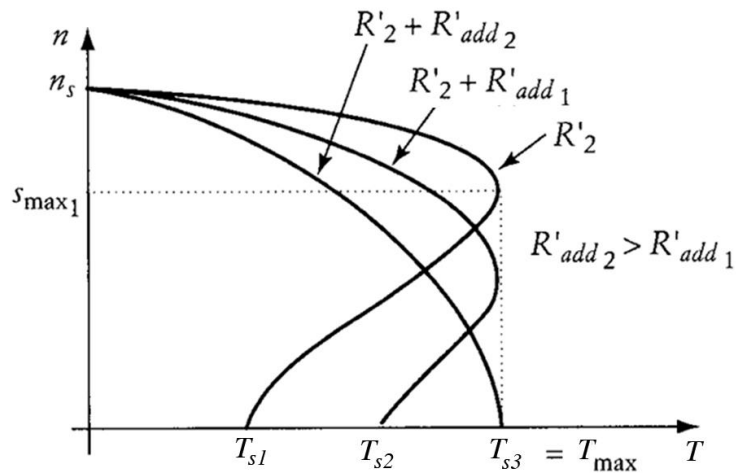


### 5.5.3) Khởi động động cơ KĐB

- Trong phần lớn các trường hợp, động cơ KĐB có thể khởi động trực tiếp do dòng khởi động thường được giới hạn bởi trở kháng dây quấn ở mức chấp nhận được.
- Đối với động cơ lớn, trở kháng dây quấn nhỏ, dòng khởi động có thể vượt quá mức dòng cho phép → cần phải giảm dòng khởi động.
- 2 phương pháp giảm dòng khởi động:
  - Giảm điện áp cấp.
  - Thêm điện trở vào mạch rotor (chỉ áp dụng được với ĐCKĐB rotor dây quấn).
- Sự thay đổi đặc tính cơ khi giảm điện áp stator:



- Sự thay đổi đặc tính cơ khi thêm điện trở vào mạch rotor:

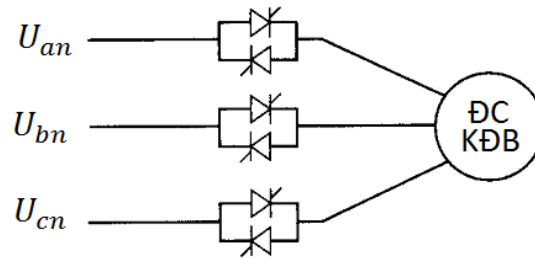


#### 5.5.4) Điều khiển tốc độ ĐCKĐB

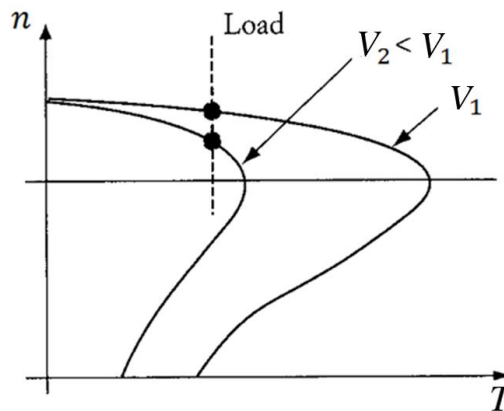
- Trong phần này, ta xét các phương pháp điều khiển sau đây:
  - 1) Thay đổi điện áp stator,
  - 2) Thay đổi tần số nguồn cấp,
  - 3) Thay đổi điện trở rotor,
- Phương pháp (1) và (2) có thể áp dụng cho ĐCKĐB rotor lồng sóc và ĐCKĐB rotor dây quấn. Riêng phương pháp (3) chỉ có thể áp dụng cho ĐCKĐB rotor dây quấn.

##### (1) Thay đổi điện áp stator

- Mạch điều khiển điện áp stator:



- Đồ thị đặc tính cơ khi điện áp thay đổi:



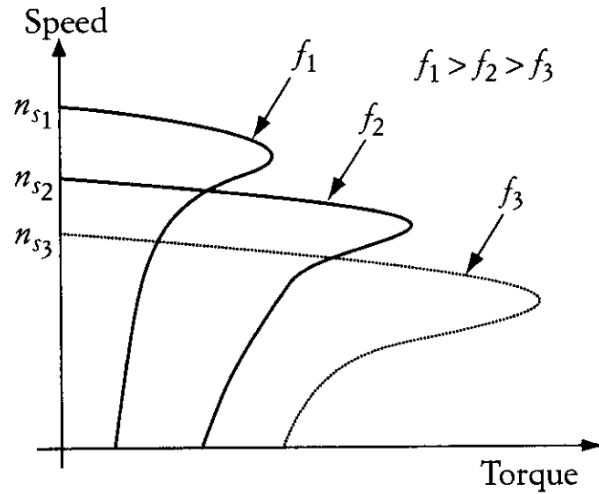
Đặc tính cơ khi điện áp thay đổi

#### Nhận xét:

- $V$  thay đổi  $\rightarrow s_m$  không đổi.
- $M$  tỉ lệ với  $V^2$  (pt đặc tính cơ).
- Nếu giữ hệ số trượt và tần số không đổi, một sự thay đổi nhỏ điện áp stator sẽ làm momen thay đổi nhiều.
- Khi thay đổi điện áp stator, tốc độ chỉ thay đổi một ít. Phương pháp điều khiển điện áp stator không phù hợp để điều khiển tốc độ trong dải rộng.

## **(2) Thay đổi tần số nguồn cấp**

- Xét các đặc tính cơ khi thay đổi khi thay đổi tần số nguồn cấp.

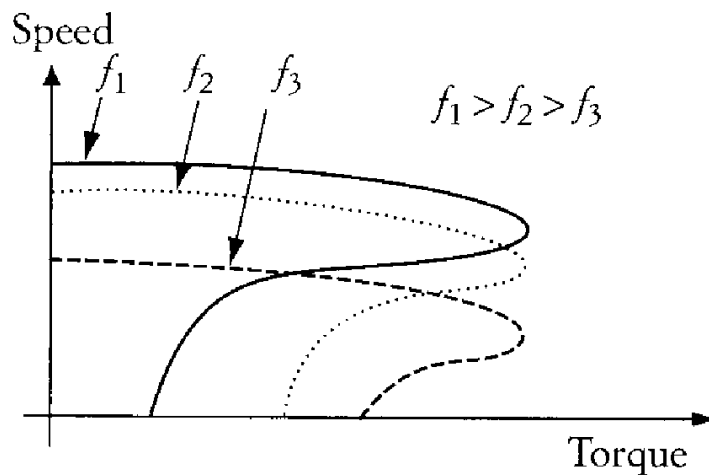


Đặc tính cơ khi tần số thay đổi

**Nhận xét:** Khi tần số tăng, momen cực đại giảm.

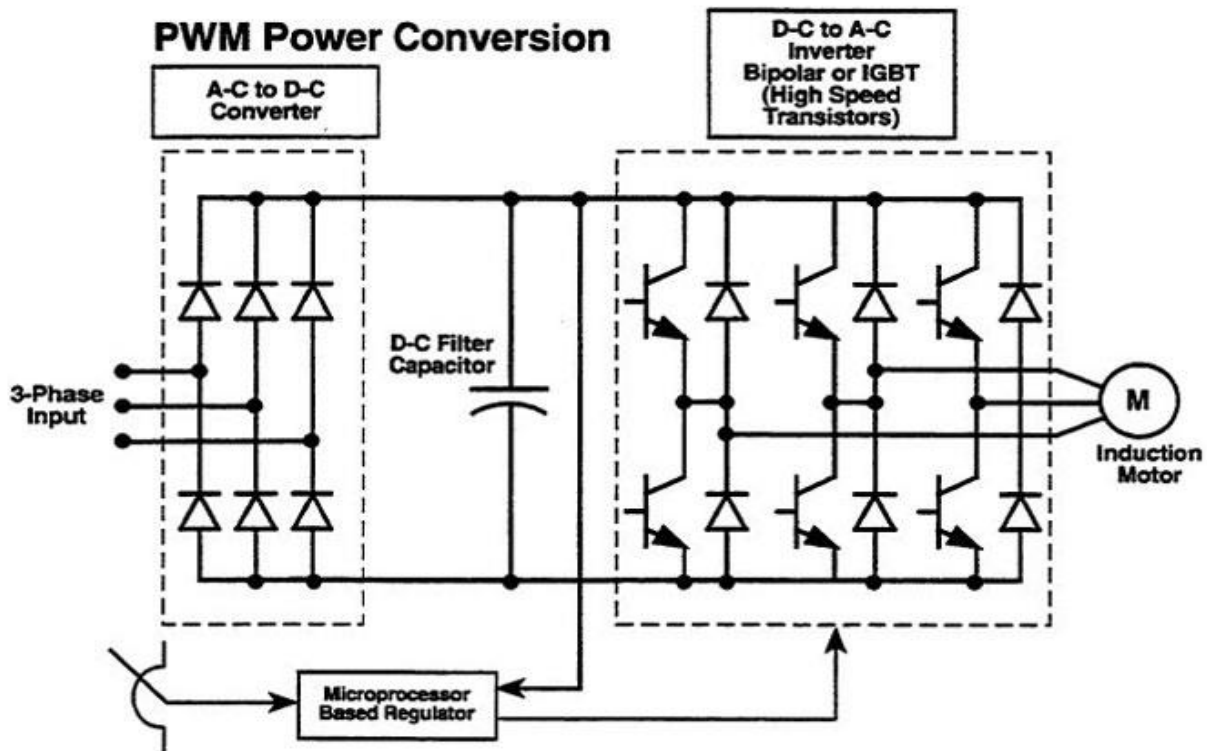
→ Thay đổi tần số kết hợp với thay đổi biên độ điện áp cấp để duy trì momen cực đại không đổi.

- Họ đặc tính cơ khi  $v/f = \text{const}$ :



- **Biến tần (VFD - Variable Frequency Drive):** Bộ điều khiển động cơ KĐB dựa trên nguyên lý thay đổi tần số.





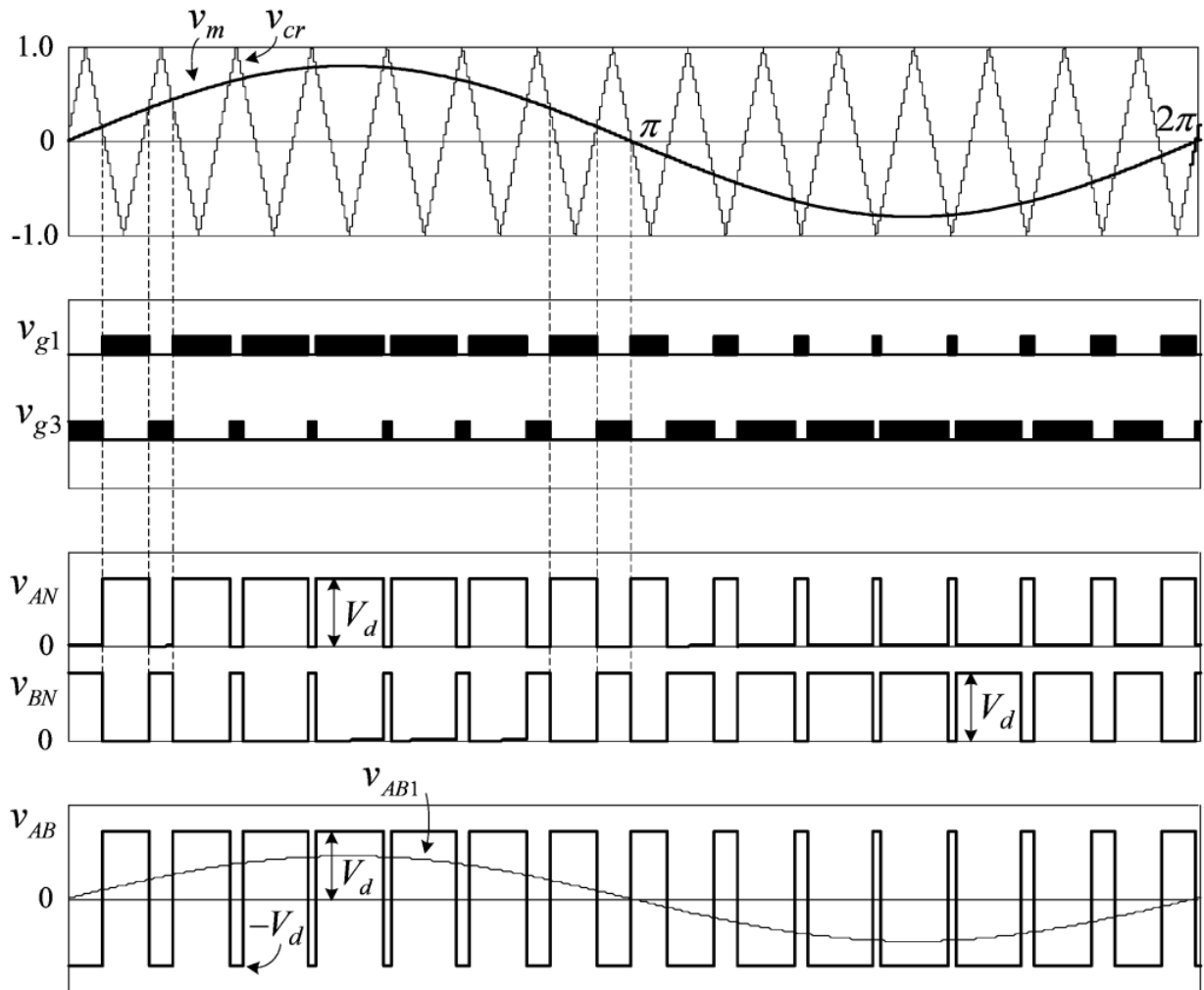
Sơ đồ nguyên lý bộ biến tần

Trong VFD có 3 thành phần chính là bộ chỉnh lưu, bộ nghịch lưu và bộ điều khiển.

- (1) Bộ chỉnh lưu (Rectifier): là mạch cầu diode, chỉnh lưu nguồn điện AC thành điện DC. Điện áp DC ở ngõ ra của bộ chỉnh lưu được lọc phẳng bởi bộ lọc (filter).
- (2) Bộ nghịch lưu (Inverter): là mạch cầu gồm các khóa điện tử điều khiển được (Transistor, GTO, IGBT,...), thực hiện đóng/ngắt dòng điện qua tải (động cơ).
- (3) Mạch điều khiển: mạch điện tử điều khiển các khóa điện tử đóng/ngắt với theo chu kỳ và độ rộng xung thay đổi theo phương pháp PWM để tạo ra dòng điện hình sin có tần số và biên độ thay đổi được theo nguyên lý v/f không đổi.

Điện áp ra của bộ biến tần có dạng xung có độ rộng thay đổi được, cấp cho động cơ. Các cuộn dây động cơ có vai trò như bộ

lọc thông thấp, làm “mềm” các xung ngõ ra biến tần, nhờ đó dòng điện chảy trong cuộn dây động cơ có dạng như hình sin.



## 5.6) Đặc tính kỹ thuật các loại động cơ

Characteristic	Brush DC	Brushless DC	AC	Stepper
<i>Supply voltage</i>	Needs a simple DC voltage power source	Uses DC voltage but uses a special amplifier	Can be readily run from the AC line voltage	Uses DC voltage but requires special amplifier to drive each phase
<i>Direction change</i>	Easily done by reversing polarity to the motor leads	By activating the phases in a reverse fashion	By changing the wiring in the starting circuitry in single-phase motors, and by changing two of the phases in three-phase motors	By activating the phases in a reverse fashion or by changing the direction signal if a stepper driver is used
<i>Speed change</i>	Easily done by changing the value of the input voltage	By changing the rate of activating the phases	More difficult to do and requires a variable-frequency input device	By changing the rate of activating the phases or the pulse rate if a stepper driver is used
<i>Starting</i>	Self starting	Self starting	Single-phase motors are not self-starting and need a special starting winding/circuitry. Three-phase motors are self-starting	Self-starting
<i>Maintenance</i>	Need to periodically replace the brushes and resurface the commutator	No need to replace brushes or resurface the commutator	Requires less maintenance especially for AC induction motors	No wear problems due to the absence of brush contact
<i>Available sizes</i>	Few watts to several hp rating	Few watts to few hundred hp	Single-phase up to few hp and multiphase up to several thousand hp	Stepper motors do not have a hp rating since they do not rotate continuously. The equivalent max hp rating is a fraction of 1 hp. They could have torque rating up to a few thousand oz-in.