

ĐH Bách Khoa TP.HCM – Khoa Điện-Điện Tử – Bộ Môn Thiết Bị Điện

Bài giảng: Biến đổi năng lượng điện cơ

Chương 6:
Máy điện đồng bộ

Biên soạn: Nguyễn Quang Nam
Cập nhật: Trần Công Bình

NH2012–2013, HK2

Máy điện đồng bộ

1

Máy điện đồng bộ – Giới thiệu

- Máy điện đồng bộ được sử dụng chủ yếu làm máy phát 3 pha trong hệ thống điện. Công suất từ vài kVA đến hơn 1000 MVA. Ngày nay động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu ngày càng được sử dụng phổ biến.
- Bộ dây quấn 3 pha được đặt trên stato (phần đứng yên) và một rôto (phần quay) với một dây quấn kích từ DC được kéo quay bởi một động cơ sơ cấp. Các máy công suất nhỏ có thể dùng nam châm vĩnh cửu để tạo ra từ trường rôto.
- Tốc độ của máy tỷ lệ trực tiếp với tần số của điện áp hay dòng điện stato, và độc lập với điều kiện tải.

Máy điện đồng bộ

2

Máy điện đồng bộ – Giới thiệu

- Bài giảng sẽ chỉ đề cập đến các khái niệm nền tảng như rút ra biểu thức mômen và sự vận hành xác lập hình sin bằng một mạch tương đương.
- Các máy điện quay 1 pha và 2 pha sẽ được giới thiệu sơ lược như nền tảng cho việc phân tích sự hoạt động của máy 3 pha.

Máy điện đồng bộ

3

Máy điện quay 1 pha

- Xét máy trong hình 6.1, với các dây quấn phân bố trên stato và rôto. Từ thông móc vòng là (từ ví dụ 4.2)

$$\lambda_s = N_s^2 L_0 i_s + N_s N_r L_0 (1 - 2\theta/\pi) i_r = L_s i_s + L_{sr}(\theta) i_r$$

$$\lambda_r = N_s N_r L_0 (1 - 2\theta/\pi) i_s + N_r^2 L_0 i_r = L_{sr}(\theta) i_s + L_r i_r$$

- Hai dây quấn có thể được coi như hai cuộn dây được ghép, với đồng năng lượng cho bởi

$$W_m' = \frac{1}{2} L_s i_s^2 + \frac{1}{2} L_r i_r^2 + L_{sr}(\theta) i_s i_r$$

Máy điện đồng bộ

4

Máy điện quay 1 pha (tt)

- Mômen có thể được tính

$$T^e = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} = i_s i_r \frac{dL_{sr}(\theta)}{d\theta} = -i_s i_r M \sin(\theta)$$

Nếu chỉ xét thành phần cơ bản của $L_{sr}(\theta)$ là $M \cos(\theta)$.

- Mô hình động học của máy (hình 6.3)

$$v_s = i_s R_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad v_r = i_r R_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad J \frac{d^2\theta}{dt^2} + K\theta + B \frac{d\theta}{dt} = T^e + T^m$$

với T^m là mômen bên ngoài đặt vào cùng chiều dương với θ .

Máy điện đồng bộ

5

Máy điện quay 1 pha (tt.)

- Ở trạng thái xác lập hình sin, công suất cơ là

$$p_m = T^e \omega_m = -\omega_m I_s I_r M \cos(\omega_s t) \cos(\omega_r t) \sin(\theta)$$

- Giả thiết điều kiện tần số được thỏa mãn, công suất trung bình là,

$$P_{m(av)} = -\omega_m I_s I_r \sin(\gamma)/4$$

- γ là một hằng số sao cho $\theta = \omega_m t + \gamma$. Mômen sinh ra có dạng đập mạch, với công suất thay đổi giữa 0 và một giá trị đỉnh. Điều này có thể được loại bỏ bằng cách thêm vào 1 dây quấn nữa trên cả stato và rôto, tạo thành máy 2 pha.

Máy điện đồng bộ

6

Máy điện quay 2 pha

- Xét máy 2 pha trong hình 6.4, với các dây quấn đơn giản hóa trên stato và rôto như được thể hiện.
- Hai dây quấn stato hoàn toàn không bị ghép, tương tự với hai dây quấn rôto.
- Đồng năng lượng có thể được xác định từ từ thông móc vòng (xem giáo trình). Mômen sinh ra được cho bởi

$$T^e = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} = M [(i_{ar} i_{bs} - i_{as} i_{br}) \cos(\theta) - (i_{as} i_{ar} + i_{br} i_{bs}) \sin(\theta)]$$

Máy điện đồng bộ

7

Máy điện quay 2 pha

- Khi các dòng điện 2 pha cân bằng được đưa vào các dây quấn 2 pha cân bằng, một công suất hằng được tạo ra (không có thành phần xoay chiều nào).

$$p_m = T^e \omega_m = -\omega_m I_r I_s M \sin[(\omega_m - \omega_s + \omega_r)t + \gamma]$$

- Bằng cách đặt hai cuộn dây lệch 90° và các dòng điện lệch pha 90° (điện), điều kiện một tần số được tạo ra, và

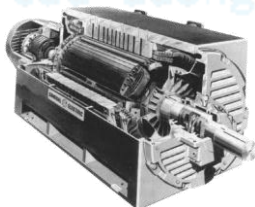
$$p_m = -\omega_m I_r I_s M \sin(\gamma)$$

Máy điện đồng bộ

8

Máy đồng bộ 3 pha

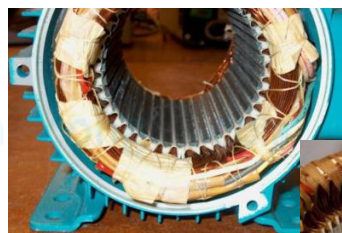
- Xét một máy 3 pha cực lồi có 2 cực (hình 6.7). Các máy cực lồi được dùng trong các máy phát thủy điện tốc độ thấp và động cơ đồng bộ 1 pha công suất thấp. Các cuộn dây stato phân bố được dùng để tạo ra sức từ động hình sin dọc theo chu vi khe hở.



Máy điện đồng bộ

9

Dây quấn stato 3 pha



Cận cảnh dây quấn



Dây quấn stato 3 pha

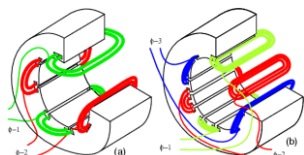


Máy điện đồng bộ

10

Khái niệm về từ trường quay

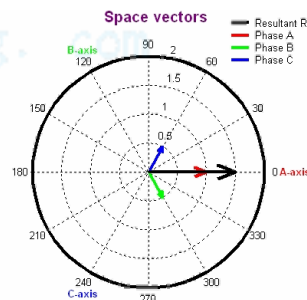
- Các cuộn dây stato được làm lệch cơ học 120° trong một dây quấn 3 pha. Khi được cung cấp một hệ dòng điện 3 pha, dây quấn 3 pha sẽ tạo một từ trường quay với độ lớn không đổi, giả thiết là mạch từ không bão hòa. Tương tự, một dây quấn 2 pha với các cuộn dây stato lệch 90° cũng sẽ tạo ra một từ trường quay khi được cung cấp một hệ dòng điện 2 pha.



Máy điện đồng bộ

11

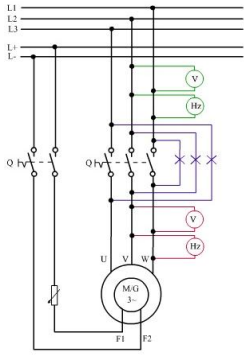
Khái niệm về từ trường quay (tt)



Máy điện đồng bộ

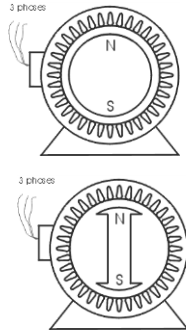
12

Sơ đồ nối dây máy điện đồng bộ



Máy điện đồng bộ

13

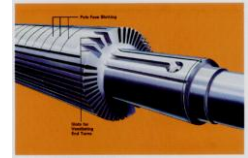


Rôto cực lồi và cực ẩn

> Rôto cực lồi sẽ không được khảo sát thêm nữa. Với rôto cực ẩn, mômen sinh ra bởi điện năng cho bởi

$$T^e = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} = i_a i_r \frac{dM_{ar}}{d\theta} + i_b i_r \frac{dM_{br}}{d\theta} + i_c i_r \frac{dM_{cr}}{d\theta}$$

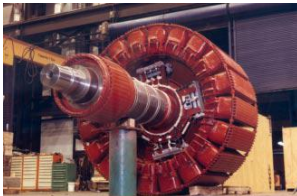
$$= -i_a i_r M \sin(\theta) - i_b i_r M \sin(\theta - 120^\circ) - i_c i_r M \sin(\theta + 120^\circ)$$



Máy điện đồng bộ

14

Rôto cực lồi thực

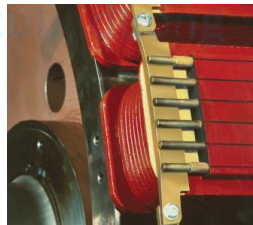


Rôto của một máy đồng bộ tốc độ thấp

Máy điện đồng bộ

15

Cận cảnh 1 cực rôto



Trường hợp rôto cực ẩn

> Dưới điều kiện dòng 3 pha kích thích là cân bằng, với dòng điện rôto không đổi, mômen có thể được biểu diễn như sau

$$T^e = \frac{-I_m I_r M 3 \sin(\theta - \omega_s t)}{2} = \frac{-I_m I_r M 3 \sin(\omega_m t + \gamma - \omega_s t)}{2}$$

với $\theta = \omega_m t + \gamma$. Mômen sẽ có giá trị trung bình nếu $\omega_m = \omega_s$, được gọi là **tốc độ đồng bộ**.

$$T^e = -\frac{3}{2} I_m I_r M \sin(\gamma) = -\frac{3}{\sqrt{2}} I_a I_r M \sin(\gamma)$$

Máy điện đồng bộ

16

> Vì tốc độ đồng bộ ω_m bằng với tần số điện ω_s (rad/s)

$$\omega_m = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi f}{P}$$

với n_s là tốc độ đồng bộ tính bằng vòng/phút (rpm).

Với P là số cặp cực.

Điện áp ở trạng thái xác lập

> Điện áp pha a ở trạng thái xác lập

$$\bar{V}_a = j \frac{3}{2} L_0 \omega_s \bar{I}_a + j \frac{M I_r}{\sqrt{2}} \omega_s e^{j\gamma} = j X_s \bar{I}_a + \bar{E}_{ar}$$

$$\bar{E}_{ar} = j \frac{M I_r}{\sqrt{2}} \omega_s e^{j\gamma} = \frac{M}{\sqrt{2}} I_r \omega_s \angle \left(\frac{\pi}{2} + \gamma \right)$$

Máy điện đồng bộ

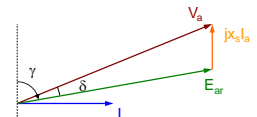
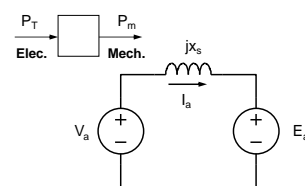
17

> Sức điện động pha tỷ lệ với dòng điện rotor và tốc độ quay

$$E_{ar} = \left(\frac{M}{\sqrt{2}} \right) \omega_s I_r$$

> Mạch tương đương với giản đồ vector pha tương ứng chế độ động cơ được thể hiện dưới đây. δ được định nghĩa là góc công suất tính từ V_a đến E_{ar}

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \delta - \gamma$$

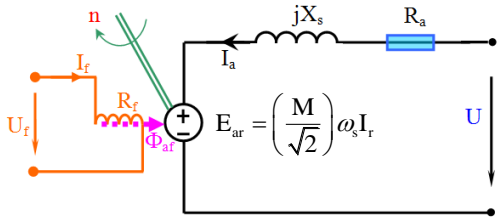


> Tương tự cho pha b và pha c.

Máy điện đồng bộ

18

Động cơ đồng bộ



Máy điện đồng bộ

19

Tính công suất theo điện áp

> Dòng điện được cho bởi

$$\vec{I}_a = \frac{\vec{V}_a - \vec{E}_{ar}}{jx_s}$$

> Dưới điều kiện cân bằng, công suất tổng là

$$P_T = 3P_a = 3\text{Re}(\vec{E}_{ar} \vec{I}_a^*)$$

> Chọn V_a là vectơ tham chiếu, và xét $\vec{E}_{ar} = E_{ar} \angle \delta$

$$P_T = \frac{3}{x_s} \text{Re}(jE_{ar} \angle \delta \times V_a \angle 0^\circ)$$

$$= \text{Re}\left(\frac{3E_{ar} V_a \angle(\pi/2 + \delta)}{x_s}\right) = -\frac{3E_{ar} V_a \sin(\delta)}{x_s}$$

Máy điện đồng bộ

20

Biểu thức mômen

> Biểu thức của mômen

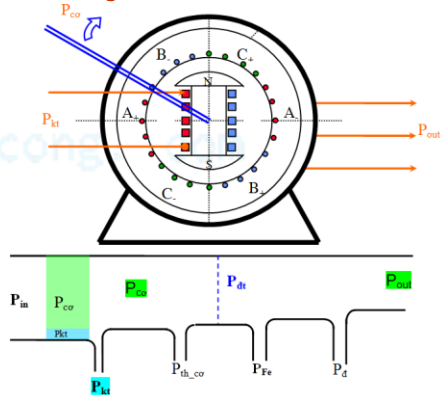
$$T^e = \frac{P_T}{\omega_m} = \frac{P_T}{\omega_s} = -\frac{3E_{ar} V_a \sin(\delta)}{x_s \omega_s}$$

> Ở chế độ động cơ, $P_T > 0$, ta phải có $\delta < 0$.

Máy điện đồng bộ

21

Phân bố công suất



22

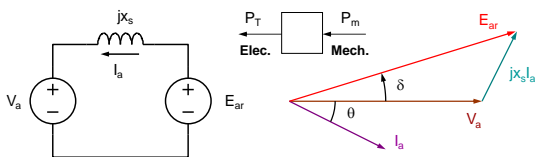
Máy phát đồng bộ

> Xét mạch vòng trong hình bên dưới

$$\vec{V}_a = -jx_s \vec{I}_a + \vec{E}_{ar} \quad \text{hay} \quad \vec{E}_{ar} = \vec{V}_a + jx_s \vec{I}_a$$

> Dòng điện và công suất có thể dễ dàng tính được

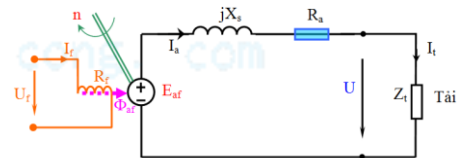
$$\vec{I}_a = \frac{\vec{E}_{ar} - \vec{V}_a}{jx_s} \quad P_T = 3\text{Re}\left(\frac{V_a \angle 0^\circ \times E_{ar} \angle(-\delta)}{-jx_s}\right) = \frac{3V_a E_{ar} \sin(\delta)}{x_s}$$



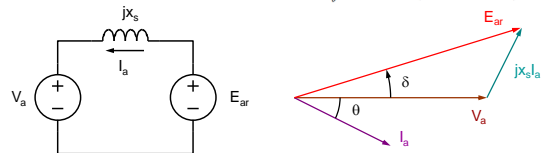
Máy điện đồng bộ

23

Máy phát đồng bộ



$$\vec{E}_{ar} - \vec{U} = (R_a + jX_s) \vec{I}_a$$

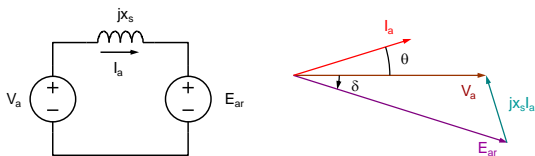


Máy điện đồng bộ

24

Ví dụ 6.1

♦ Một máy đồng bộ 3 pha nối Y 60 Hz có 2 cực với điện kháng đồng bộ $x_s = 5 \Omega/\text{pha}$. Khi vận hành ở chế độ động cơ, máy tiêu thụ dòng điện 30 A và điện áp pha là 254 V ở hệ số công suất 0,8 sớm. Tìm E_{ar} và T^e . Nếu máy có tổng tổn hao do quạt gió, ma sát, và lõi thép là 400 W, mômen hữu ích đầu trục là bao nhiêu? Hiệu suất là bao nhiêu?



Máy điện đồng bộ

25

Ví dụ 6.1 (tt)

> Chọn V_a làm vector pha tham chiếu, dòng điện sẽ là

$$\vec{I}_a = 30 \angle \cos^{-1}(0,8) = 30 \angle 36,87^\circ \text{ A}$$

> Điện áp E_{ar} sẽ là

$$\vec{E}_{ar} = \vec{V}_a - jx_s \vec{I}_a = 254 \angle 0 - j(5)30 \angle 36,87^\circ = 364,3 \angle -19,23^\circ \text{ V}$$

> Công suất điện từ

$$P_T = -3 \frac{V_a E_{ar} \sin(\delta)}{x_s} = 3 \frac{(254)(364,3) \sin(19,23^\circ)}{5} = 18286 \text{ W}$$

> Công suất cơ hữu ích

$$P_2 = 18286 - 400 = 17886 \text{ W}$$

Máy điện đồng bộ

26

Ví dụ 6.1 (tt)

> Mômen điện từ của động cơ

$$T^e = \frac{P_T}{\omega_m} = \frac{18286}{120\pi} = 48,5 \text{ N.m}$$

> Mômen hữu ích của động cơ

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega_m} = \frac{17886}{120\pi} = 47,44 \text{ N.m}$$

> Công suất điện ngõ vào

$$P_1 = 3V_a I_a (\text{PF}) = 3(254)(30)(0,8) = 18286 \text{ W}$$

> Hiệu suất

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{17886}{18288} = 0,978$$

Máy điện đồng bộ

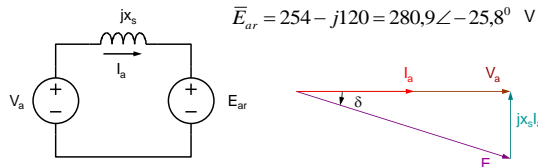
27

Ví dụ 6.3

♦ Giả sử dòng điện kích từ I_f được thay đổi sao cho tổng công suất là như trong ví dụ 6.2 và hệ số công suất là đơn vị ở cùng ngõ vào. Tìm dòng điện stato mới và điện áp cảm ứng E_{ar} .

$$I_a = \frac{P_T}{3V_a \cos(\theta^0)} = \frac{18286}{3 \times 254} = 24 \text{ A}$$

$$\vec{E}_{ar} = 254 - j120 = 280,9 \angle -25,8^\circ \text{ V}$$

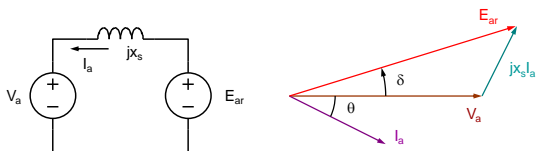


Máy điện đồng bộ

28

Ví dụ 6.4

♦ Một máy đồng bộ 2 cực, 3 pha, nối Y có điện kháng đồng bộ $x_s = 2 \Omega$ trên mỗi pha. Máy vận hành ở chế độ máy phát cung cấp công suất ở điện áp 1905 V trên mỗi pha. Dòng điện là 350 A và hệ số công suất của tải là 0,8 trễ. Tìm E_{ar} , δ , và mômen điện từ sinh ra.



Máy điện đồng bộ

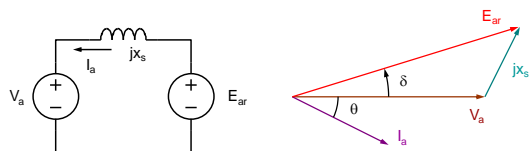
29

Ví dụ 6.4 (tt)

> Từ giản đồ vector pha

$$\vec{E}_{ar} = 1905 + j2(350 \angle -36,87^\circ) = 2391 \angle 13,54^\circ \text{ V}$$

$$T^e = \frac{3E_{ar} V_a \sin(\delta)}{x_s \omega_s} = \frac{3 \times 2391 \times 1905 \times 0,23416}{2 \times 377} = 42440 \text{ N.m}$$



Máy điện đồng bộ

30

Bài tập máy phát đồng bộ

Một máy phát đồng bộ ba pha cực từ ẩn, 2 cực, kích từ độc lập, dòng kích từ 1A, tần số 50Hz, nối Y, 12A. Bỏ qua điện trở phần ứng, điện kháng đồng bộ pha là 10Ω. Biết tổn hao cơ là 500W, bỏ qua tổn hao sắt.

- a. Khi máy phát cấp nguồn cho tải với điện áp định mức 380V, và dòng điện định mức 12A, tải có hệ số công suất $\cos\varphi=0,8$, chậm pha. Vẽ giản đồ vector, tính sức điện động cảm ứng pha, góc công suất và momen cơ kéo máy phát?
- b. Khi máy phát cấp nguồn cho tải có dòng điện định mức 12A, tải có hệ số công suất $\cos\varphi=1$. Vẽ giản đồ vector, tính điện áp dây cấp cho tải $U_{dây}$, góc công suất? Biết sức điện động của máy phát vẫn không đổi như ở câu a?
- c. Với tải (có dòng điện, $\cos\varphi$ như) ở câu b, tính dòng kích từ điều chỉnh để điện áp dây vẫn là 380V? Biết mạch từ còn tuyến tính.

Máy điện đồng bộ

31

Máy nhiều cực

- > Số cực trong máy được xác định bởi cấu hình của từ trường. Xét rôto trong hình 6.24(a). Với mỗi cuộn, có 2 cực để cắt ngang khi đi hết một vòng.
- > Với rôto trong hình 6.24(b), khi đi hết một vòng sẽ gặp 4 cực. Từ trường quay do đó sẽ hoàn tất 2 chu kỳ (720°) trong một vòng quay cơ học 360°. Nghĩa là

$$\omega_{elec} = 2\omega_{mech}$$

- > Nói chung, với máy có p đôi cực, $\omega_{elec} = \omega_s = p\omega_{mech}$

Máy điện đồng bộ

32

Máy nhiều cực (tt)

- > ω_s là tần số đồng bộ tính bằng rad/s điện.
- > Và quan hệ giữa tần số đồng bộ f (tính bằng Hz) và tốc độ cơ đồng bộ n_s là

$$n_s = \frac{60f}{P}$$

- > Chú ý rằng p là số đôi (cặp) cực từ của máy.

Máy điện đồng bộ

33

Ví dụ 6.5

♦ Một máy phát đồng bộ 3 pha, 60 Hz, 6 cực, nối Y được kéo bởi một tuabin cung cấp 16910 W ở đầu trục. Tổng tổn hao ma sát và quạt gió là 500 W. Dòng điện kích từ cũng được điều chỉnh sao cho điện áp E_{ar} (tỷ lệ với dòng kích từ) có giá trị pha $E_{ar} = 355$ V. Máy phát cung cấp cho tải ở 440 V (giá trị dây). Tìm tốc độ, các vector pha E_{ar} , I_a và công suất thực và phản kháng do máy phát sinh ra. Điện kháng đồng bộ là $x_s = 5 \Omega$.

- ♦ Tính moment cơ kéo máy phát, và moment điện từ?

Máy điện đồng bộ

34

Ví dụ 6.5 (tt)

- > Tốc độ của máy

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60(60)}{3} = 1200 \text{ vòng/phút}$$

- > Công suất điện từ

$$P_T = 16910 - 500 = 16410 \text{ W}$$

- > Rút ra giá trị của góc công suất δ

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{16410 \times 5}{3(440/\sqrt{3})(355)}\right) = 17,65^\circ$$

Máy điện đồng bộ

35

Ví dụ 6.5 (tt)

- > Vector pha dòng điện pha A

$$\bar{I}_a = \frac{355 \angle 17,65^\circ - (440/\sqrt{3}) \angle 0}{j5} = 27,34 \angle -38,04^\circ \text{ A}$$

- > Công suất phức

$$\bar{S}_T = 3(440/\sqrt{3})(27,34 \angle 38,04^\circ) = 16410 + j12841 \text{ VA}$$

- > Do đó:

$$P = 16410 \text{ W} \quad Q = j12841 \text{ VAR}$$

Máy điện đồng bộ

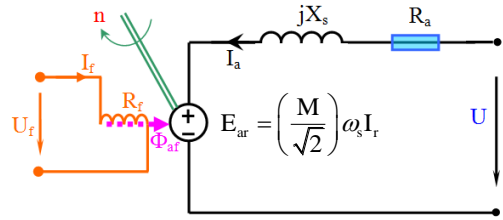
36

Cải thiện hệ số công suất

- Một động cơ đồng bộ có thể nhận công suất điện ở hệ số công suất sớm hoặc trễ. Đặc tính này có thể được dùng để cải thiện hệ số công suất chung của lưới có động cơ đồng bộ nối vào.
- Trong thực tế, một máy bù đồng bộ là một động cơ không tải và có kích từ thay đổi. Dưới điều kiện này, từ biểu thức công suất, $E_{ar}\sin\delta$ phải là hằng số (do công suất tích cực tiêu thụ từ nguồn là hằng số), dẫn đến giản đồ vector pha sau đây.

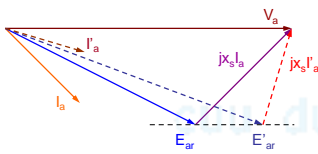
Máy điện đồng bộ

Động cơ đồng bộ



Máy điện đồng bộ

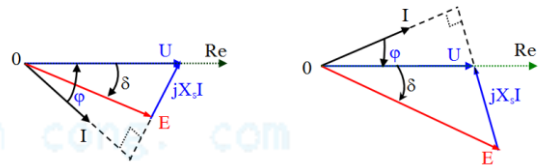
Cải thiện hệ số công suất của động cơ đồng bộ



- Do đó, khi tăng kích từ, độ lớn của dòng điện và góc lệch giữa V_a và I_a giảm (hay hệ số công suất tăng).

Máy điện đồng bộ

Cải thiện hệ số công suất của động cơ đồng bộ



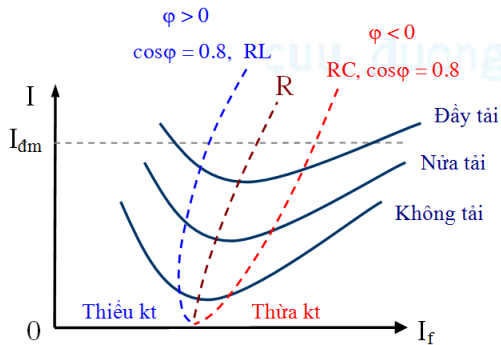
$$\vec{U} = \vec{E}_{af} + jX_s \vec{I}, \quad U \angle 0^\circ = E_{af} \angle \delta + jX_s I \angle (-\varphi)$$

Thiếu kích từ, E nhỏ
I chậm pha hơn U, $\varphi > 0$
Động cơ đóng vai trò tải RL
Động cơ tiêu thụ P và Q

Thừa kích từ, E lớn
I nhanh pha hơn U, $\varphi < 0$
Động cơ đóng vai trò tải RC
Động cơ tiêu thụ P, phát Q
(Tụ bù công suất phản kháng)

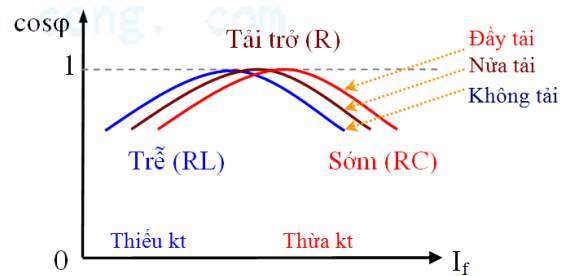
Máy điện đồng bộ

Đặc tính hình V



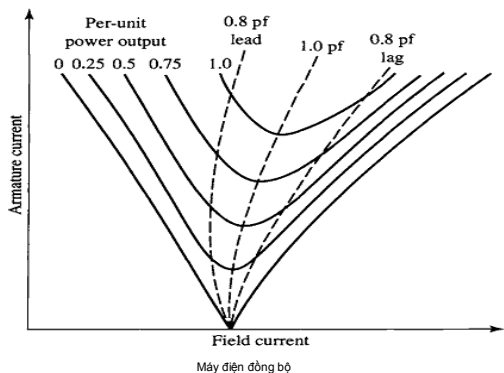
Máy điện đồng bộ

Đặc tính hình V ngược



Máy điện đồng bộ

Cải thiện hệ số công suất (tt)



Máy điện đồng bộ

Ví dụ 6.6

Đ/cơ đồng bộ 3 pha, 6 cực, 50Hz, 380V, Y. Có điện kháng đồng bộ là 2Ω, bỏ qua điện trở phần ứng. Khi dòng điện phần ứng là 50A, hệ số công suất 0,85 sớm. Dòng điện kích từ là 5A.

- a) Tính tốc độ động cơ, sức điện động, góc công suất, công suất tiêu thụ, moment điện từ?
- b) Để hệ số công suất là đơn vị; tính dòng điện kích từ cần điều chỉnh?

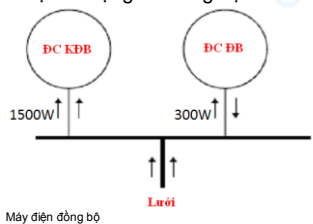
Máy điện đồng bộ

Ví dụ 6.7

♦ Một động cơ không đồng bộ 3 pha nối Y, 1500W ở hệ số công suất 0,8 trễ được nối vào một nguồn 3 pha với điện áp (dây) là 380V. Một động cơ đồng bộ 3 pha không mang tải được nối song song với tải để nâng hệ số công suất thành đơn vị. Tìm dòng điện tiêu thụ bởi động cơ đồng bộ.

Ví dụ 6.8

♦ Tính lại câu 6.7 trên nếu động cơ đồng bộ kéo tải 300W?



Máy điện đồng bộ

Ví dụ 6.7

♦ Một tải 3 pha nối Y 1500 kW ở hệ số công suất 0,8 trễ được nối vào một nguồn 3 pha với điện áp dây là 1732 V. Một động cơ đồng bộ không mang tải được nối song song với tải để nâng hệ số công suất thành đơn vị. Tìm dòng điện tiêu thụ bởi động cơ đồng bộ.

> Chọn điện áp pha A làm vector tham chiếu, vector pha dòng điện pha A của tải sẽ là

$$\vec{I}_{aL} = \frac{1500000}{\sqrt{3}(1732)(0,8)} \angle -\cos^{-1}(0,8) = 625 \angle -36,87^\circ \text{ A}$$

Máy điện đồng bộ

Ví dụ 6.7 (tt)

> Vector pha dòng điện pha của tổ hợp tải và động cơ là:

$$\vec{I}_{aT} = \frac{1500000}{\sqrt{3}(1732)} \angle 0 = 500 \angle 0 \text{ A}$$

> Vector pha dòng điện pha A của động cơ, tính theo giản đồ vector pha:

$$\begin{aligned} \vec{I}_{aM} &= \vec{I}_{aT} - \vec{I}_{aL} = 500 - 625 \angle -36,87^\circ \\ &= 375 \angle 90^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Máy điện đồng bộ