

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

Bài giảng: Biến đổi năng lượng điện cơ

Chương 7: Máy điện không đồng bộ

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

NH2012–2013, HK2

Máy điện không đồng bộ

1

Máy điện không đồng bộ - Giới thiệu

- > Đây là loại máy điện được dùng rộng rãi nhất như động cơ trong công nghiệp. Cả stato lẫn rôto đều tải dòng điện xoay chiều.
- > Các đặc tính cơ hoàn hảo có thể thu được thông qua các bộ biến đổi công suất tiên tiến.
- > Bài giảng chỉ tập trung vào các hiện tượng và các mạch tương đương cơ bản, rút ra từ quan điểm năng lượng.

Máy điện không đồng bộ

2

Máy điện không đồng bộ - Giới thiệu (tt)

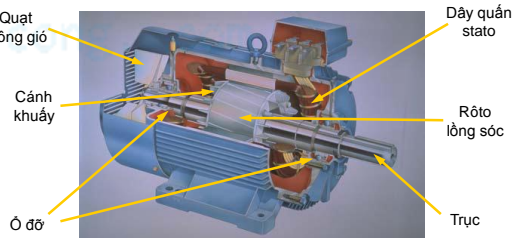
- > Stato giống hệt như trong máy điện đồng bộ, với dây quấn 3 pha, tạo ra một từ trường quay ở tốc độ đồng bộ $\omega_s = p\omega_m$, với p là số đôi cực và ω_m là tốc độ cơ học tính bằng rad/s.
- > Rôto cũng có một dây quấn 3 pha có cùng số cực với stato, nhờ cảm ứng bởi từ trường, hoặc các biện pháp nhân tạo. Rôto được ngắn mạch bên trong máy (*rôto lồng sóc*) hay bên ngoài thông qua các vành trượt (*rôto dây quấn*).

Máy điện không đồng bộ

3

Cấu tạo của máy

- > Lõi thép stato và rôto được ghép từ các lá thép, với các rãnh cho dây quấn. Rôto có một số cánh khuấy ở hai đầu để đối lưu không khí bên trong máy. Ở phía không gắn tải của trục máy là quạt thông gió.

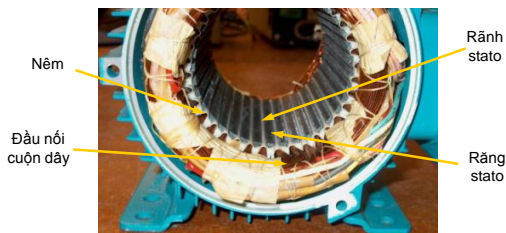


Máy điện không đồng bộ

4

Cấu tạo stato

- > Lõi thép ghép từ các lá mỏng, có rãnh cho dây quấn 3 pha. Các nêm được dùng để giữ các cuộn dây trong rãnh. Dây quấn 3 pha sẽ tạo ra từ trường quay khi được cung cấp một hệ dòng điện 3 pha.

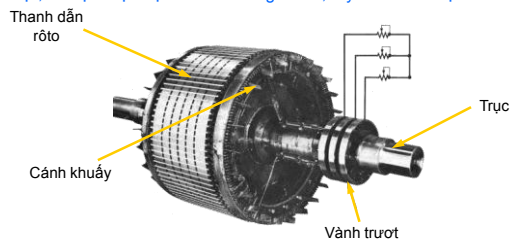


Máy điện không đồng bộ

5

Cấu tạo rôto dây quấn

- > Lõi thép ghép từ các lá mỏng, với rãnh cho các thanh dẫn rôto. Các thanh dẫn rôto được bố trí thành một dây quấn 3 pha. Dây quấn 3 pha được nối với các điện trở ngoài hay nguồn độc lập thông qua các vành trượt, để đạt được đặc tính cơ mong muốn, tùy theo điều kiện tải.

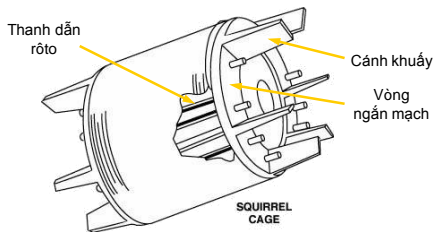


Máy điện không đồng bộ

6

Cấu tạo rôto lồng sóc

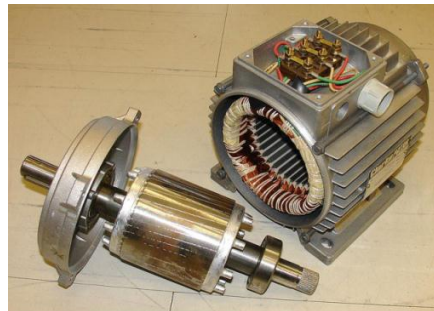
➢ Lõi thép ghép từ các lá mỏng, có rãnh cho thanh dẫn rôto. Các thanh dẫn được nối ngắn mạch với nhau thông qua vòng ngắn mạch ở hai đầu. Có các cánh khuấy ở mỗi vòng ngắn mạch để cải thiện việc làm mát bên trong máy. Các thanh dẫn trong các động cơ nhỏ được nghiêng rãnh để giảm nhiễu và cải thiện hiệu năng.



Máy điện không đồng bộ

7

Hình ảnh của một động cơ không đồng bộ thực



Máy điện không đồng bộ

8

Hoạt động của động cơ không đồng bộ

- Dòng điện 3 pha được đưa vào dây quấn stato, tạo ra từ trường quay ở tốc độ đồng bộ. Nếu tốc độ rôto khác với tốc độ đồng bộ, sẽ xuất hiện các dòng điện cảm ứng bên dây quấn rôto, với cùng số cực như của dây quấn stato.
- Dòng điện cảm ứng bên dây quấn rôto cũng sẽ tạo ra một từ trường quay, tương tác với từ trường tạo ra bởi dây quấn stato, và sinh ra mômen.

Máy điện không đồng bộ

9

Hoạt động của động cơ không đồng bộ (tt)

- Một cách lý tưởng, mômen sinh ra (bởi dòng điện cảm ứng) sẽ tăng tốc rôto, theo định luật Lenz's, cho đến khi tốc độ rôto bằng với tốc độ đồng bộ, ở đó mômen giảm xuống bằng 0.
- Trong thực tế, do các tổn hao công suất cơ (thông gió, ma sát, v.v...) rôto sẽ không bao giờ đạt tốc độ đồng bộ, mà sẽ trượt lùi so với từ trường quay, tạo ra vừa đủ mômen để chống lại mômen cản (trong điều kiện không tải hay có tải).

Máy điện không đồng bộ

10

Hoạt động của động cơ KĐB (tt)

➢ Trong động cơ có p đôi cực, tốc độ cơ học ω_m (tính bằng rad/s) thỏa mãn

$$\omega_s - \omega_r = p\omega_m$$

với ω_s và ω_r lần lượt là tần số stato và rôto tính bằng rad/s.

➢ Độ lớn của dòng điện cảm ứng phụ thuộc vào sự khác biệt tốc độ giữa từ trường quay stato và bản thân rôto. Sự khác biệt tốc độ được biểu diễn bằng một đại lượng không thứ nguyên gọi là **độ trượt s** như sau

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - p\omega_m}{\omega_s}$$

Máy điện không đồng bộ

11

Hoạt động của động cơ KĐB (tt)

➢ Dẫn đến

$$\omega_r = \omega_s - p\omega_m = s\omega_s$$

➢ Hai trường hợp đặc biệt: $s = 0$ ở tốc độ đồng bộ, và $s = 1$ ở điều kiện đứng yên (mở máy).

Máy điện không đồng bộ

12

Phân tích máy 2 cực

➢ Bằng các phương pháp năng lượng, có thể thấy mômen cho bởi

$$T^e = -\frac{9}{4} I_{ms} I_{mr} M \sin(\beta + \gamma)$$

với I_{ms} và I_{mr} tương ứng là các giá trị đỉnh của dòng điện stato và rôto.

➢ Sẽ có ích hơn nếu mômen có thể được biểu diễn bằng các tham số điện của máy. Điều này có thể được thực hiện với một mạch tương đương, rất giống với mạch tương đương của máy biến áp.

Máy điện không đồng bộ

Phân tích máy 1 cặp cực (tt)

➢ Thực tế, động cơ không đồng bộ có thể được xem như một máy biến áp tổng quát với thứ cấp quay tròn.

➢ Giả sử số vòng dây hiệu dụng trên stato bằng a lần số vòng dây của rôto, tất cả các đại lượng rôto được quy đổi về phía stato như sau

$$a v_{ar} = v'_{ar} \quad \hat{i}_{ar}/a = \hat{i}'_{ar}$$

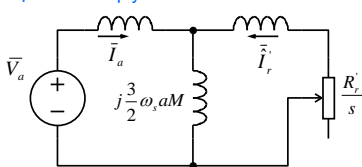
$$a^2 R_r = R'_r \quad a^2 L_r = L'_r \quad a^2 L_{mr} = L'_{mr}$$

Máy điện không đồng bộ

Mạch tương đương một pha

➢ Để nối hai mạch stato và rôto với nhau, cả hai mạch phải ở cùng tần số và mức điện áp. Nếu bỏ qua điện trở stato, mạch tương đương cho một pha của máy với các trở kháng quy đổi về stato có dạng như hình dưới đây.

➢ L_{is} là điện cảm tản stato, và L'_{ir} là điện cảm tản rôto quy đổi về stato. R'_r là điện trở rôto quy đổi về stato.

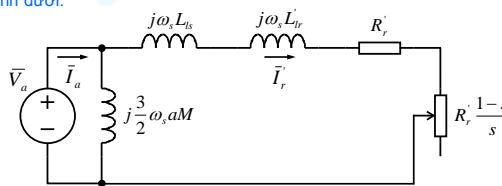


Máy điện không đồng bộ

Mạch tương đương gần đúng

➢ Điện trở rôto có thể coi là tổ hợp của R'_r và $R'_r(1-s)/s$. Phần tử thứ nhất biểu diễn tổn hao đồng rôto, còn phần tử thứ hai biểu diễn tổng công suất cơ học tạo ra bởi động cơ.

➢ Có thể rút ra được một phiên bản đơn giản hóa bằng cách chuyển điện cảm tản hóa aM sang bên trái, tạo thành mạch tương đương gần đúng như hình dưới.

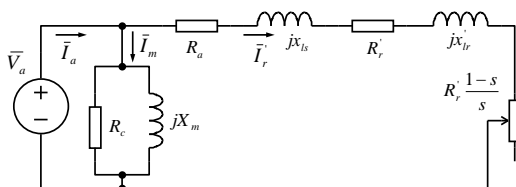


Máy điện không đồng bộ

Quan hệ công suất

➢ Các tổn hao lõi thép và stato có thể được kể đến bằng R_c và R_a trong mạch tương đương gần đúng. Tổng công suất ngõ vào thỏa mãn

$$P_T = 3V_a I_a \cos(\phi) = 3I_r'^2 \frac{R'_r}{s} + 3(I_r')^2 R_a + 3\frac{V_a^2}{R_c} = P_{ag} + P_{scl} + P_c$$



Máy điện không đồng bộ

Quan hệ công suất (tt)

với P_{ag} , P_{scl} , và P_c tương ứng là công suất truyền qua khe hở, tổn hao đồng stato, và tổn hao lõi thép.

➢ P_{ag} bao gồm tổn hao đồng P_r và công suất cơ học sinh ra P_m . Có thể dễ dàng thấy được

$$P_m = 3I_r'^2 R'_r \frac{1-s}{s} = P_{ag} (1-s)$$

➢ Ngoài ra, tổn hao đồng rôto P_r có thể được biểu diễn theo P_{ag} như sau

$$P_r = 3I_r'^2 R'_r = sP_{ag}$$

Máy điện không đồng bộ

Quan hệ công suất (tt.)

> Xét toàn bộ các tổn hao nêu trên, hiệu suất của máy là

$$\eta = \frac{P_m}{P_T} = \frac{P_T - (P_{scl} + P_c + P_{rel})}{P_T}$$

> Nếu tổn hao quay P_{rot_loss} được xét đến, hiệu suất cho bởi

$$\eta = \frac{P_{shaft}}{P_T} = \frac{P_T - (P_{scl} + P_c + P_{rel} + P_{rot_loss})}{P_T}$$

Máy điện không đồng bộ

19

Biểu thức mômen

> Dùng mạch tương đương gần đúng, có thể tính được dòng điện rôto quy đổi về stato như sau

$$\bar{I}'_r = \frac{\bar{V}_a}{(R_a + R'_r/s) + j(x_{ls} + x'_{lr})}$$

> Công suất cơ sinh ra

$$P_m = 3(I'_r)^2 R'_r \frac{1-s}{s} = \frac{3V_a^2 R'_r (1-s)/s}{(R_a + R'_r/s)^2 + (x_{ls} + x'_{lr})^2}$$

> Với máy 2 cực $\omega_m = \omega_s(1 - s)$, mômen do đó cho bởi

$$T^e = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_a^2 R'_r/s}{(R_a + R'_r/s)^2 + (x_{ls} + x'_{lr})^2}$$

Máy điện không đồng bộ

20

Ví dụ 7.2

♦ Một động cơ không đồng bộ 3 pha 866 V, nối Y, 60 Hz, 2-cực có $\omega_s L_{ls} = 0,5 \Omega$, $3\omega_s aM/2 = 50 \Omega$, $\omega_s L'_{lr} = 0,5 \Omega$, và $R'_r = 0,1 \Omega$. Tìm mômen tại độ trượt $s = 0,05$ và công suất phức ngõ vào 3 pha. Bỏ qua R_a và R_c . Dùng mạch tương đương gần đúng và chính xác.

> Điện áp pha stato sẽ là $866/\sqrt{3} = 500$ V

> Áp dụng công thức cho mạch gần đúng, mômen có giá trị

$$T^e = \frac{1}{120\pi} \frac{3(500)^2 (0,1/0,05)}{(0,1/0,05)^2 + (0,5 + 0,5)^2} = 795,8 \text{ N.m}$$

Máy điện không đồng bộ

21

Ví dụ 7.2 (tt)

> Chọn điện áp pha A làm vectơ tham chiếu, với mạch gần đúng, vectơ pha dòng điện pha ngõ vào sẽ là

$$\bar{I}'_a = \frac{500\angle 0}{j50} + \frac{500\angle 0}{(0,1/0,05) + j1} = 228,3\angle -28,81^\circ \text{ A}$$

> Do đó, công suất phức ngõ vào sẽ là

$$\bar{S}_T = 3\bar{V}'_a(\bar{I}'_a)^* = 3(500)(228,3\angle 28,81^\circ) = 300 + j165 \text{ kVA}$$

> Với mạch chính xác, cần tính dòng điện rôto để tính mômen. Tương tự như với MBA, chúng ta tính nguồn tương đương Thevenin.

Máy điện không đồng bộ

22

Ví dụ 7.2 (tt)

$$\bar{V}'_{th} = \frac{500\angle 0 \times j50}{j(50+0,5)} = 495\angle 0 \text{ V}, Z_{th} = \frac{(j50)(j0,5)}{j(50+0,5)} = j0,495 \Omega$$

> Dòng điện rôto sẽ có giá trị

$$I'_r = \frac{500}{\sqrt{(0,1/0,05)^2 + (0,495 + 0,5)^2}} = 223,83 \text{ A}$$

> Và mômen sẽ có giá trị (sai lệch khoảng 0,2% so với giá trị tính theo mạch gần đúng)

$$T^e = \frac{1}{120\pi} 3(0,1/0,05)(223,83)^2 = 797,4 \text{ N.m}$$

Máy điện không đồng bộ

23

Ví dụ 7.2 (tt)

> Tổng trở của nhánh từ hóa song song với nhánh rôto

$$Z_{ab} = \frac{(j50)(0,1/0,05 + j0,5)}{0,1/0,05 + j50,5} = 1,9575 + j0,5726 \Omega$$

> Vec tơ pha dòng điện ngõ vào

$$\bar{I}'_a = \frac{500\angle 0}{1,9575 + j1,0726} = 224\angle -28,72^\circ \text{ A}$$

> Công suất phức ngõ vào (sai lệch khoảng 1,87% so với kết quả tính bằng mạch gần đúng)

$$S = 3(500\angle 0)(224\angle 28,72^\circ) = 294,67 + j161,46 \text{ kVA}$$

Máy điện không đồng bộ

24

Ví dụ 7.3

◊ Dùng mạch tương đương gần đúng cho ví dụ 7.2, tính I_r' , P_{ag} , P_m , P_r và mômen.

> Dòng điện rôto trong mạch tương đương gần đúng

$$\vec{I}_r' = \frac{500 \angle 0}{(0,1/0,05) + j(0,5 + 0,5)} = 223,6 \angle -26,57^\circ \text{ A}$$

> Công suất điện từ (bằng công suất thực tính ở ví dụ 7.2)

$$P_{ag} = 3 \frac{0,1}{0,05} (223,6)^2 = 300 \text{ kW}$$

Máy điện không đồng bộ

25

Ví dụ 7.3 (tt)

> Công suất cơ sinh ra

$$P_m = (1-s)P_{ag} = (0,95)300 = 285 \text{ kW}$$

> Tổn hao đồng rôto

$$P_r = sP_{ag} = (0,05)300 = 15 \text{ kW}$$

> Mômen đã được tính trong ví dụ 7.2

Máy điện không đồng bộ

26

Đặc tính cơ (đặc tính mômen-tốc độ)

> Biểu thức mômen đã được rút ra

$$T^e = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_a^2 R_r' / s}{(R_a + R_r' / s)^2 + (x_{ls} + x_{lr}')^2}$$

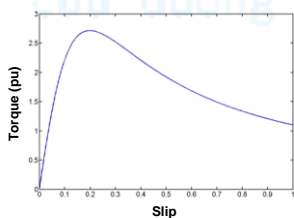
> Với điện áp đặt vào và tần số là hằng số, ở các giá trị độ trượt s nhỏ

$$T^e \approx \frac{3V_a^2}{\omega_s} \frac{s}{R_r'} \text{ hay } T^e \sim s$$

> Ở các giá trị s lớn (xấp xỉ 1)

$$T^e \approx \frac{3V_a^2}{\omega_s} \frac{R_r'}{(x_{ls} + x_{lr}')^2} \frac{1}{s}$$

$$\text{hay } T^e \sim \frac{1}{s}$$



Máy điện không đồng bộ

27

Biểu thức mômen cực đại

> Từ đặc tính cơ, có thể thấy tồn tại một giá trị độ trượt mà ở đó mômen đạt cực đại. Có thể tìm độ trượt này bằng cách đặt $dT^e/ds = 0$, dẫn đến

$$\frac{R_r'}{s} = \sqrt{R_a^2 + (x_{ls} + x_{lr}')^2}$$

> Như vậy, độ trượt mà ở đó mômen đạt giá trị cực đại là

$$s_{mT} = \frac{R_r'}{\sqrt{R_a^2 + (x_{ls} + x_{lr}')^2}}$$

Máy điện không đồng bộ

28

Biểu thức mômen cực đại (tt)

> Mômen tương ứng (khi $R_a = 0$) là

$$T_{max}^e = \frac{3V_a^2}{2\omega_s} \frac{1}{R_a + \sqrt{R_a^2 + (x_{ls} + x_{lr}')^2}} \approx \frac{3V_a^2}{2\omega_s (x_{ls} + x_{lr}')^2}$$

> Như vậy, mômen cực đại không phụ thuộc vào điện trở mạch rôto.

> Điều này được ứng dụng để thay đổi đặc tính cơ của động cơ rôto dây quấn: thay đổi điện trở rôto làm độ trượt tới hạn thay đổi, nhưng mômen cực đại vẫn không đổi.

Máy điện không đồng bộ

29

Máy không đồng bộ nhiều cặp cực

> Với một máy có P đôi cực, việc phân tích có thể được lặp lại với góc cơ học θ được thay thế bởi $P\theta$. Mạch tương đương một pha không có gì thay đổi.

> Công suất cơ cho bởi

$$P_m = T^e \omega_m = T^e \frac{\omega_s (1-s)}{p}$$

> Mômen tương ứng là

$$T^e = \frac{P}{\omega_s} \frac{3V_a^2 R_r' / s}{(R_a + R_r' / s)^2 + (x_{ls} + x_{lr}')^2}$$

Máy điện không đồng bộ

30

Máy không đồng bộ nhiều cực (tt)

> Việc thay đổi số cực của máy hoàn toàn không ảnh hưởng đến mạch điện tương đương. Do đó, độ trượt ứng với mômen cực đại vẫn không đổi. Tuy nhiên, mômen cực đại sẽ có giá trị

$$T_{max}^c = P \times \frac{3V_a^2}{2\omega_s(x_{ls} + x_{lr})}$$

Máy điện không đồng bộ

31

Ví dụ 7.5

◊ Cho động cơ KĐB 3 pha, nối Y, 60 Hz 400 V, 4 cực với các thông số: $x_m = 20 \Omega$, $x_{ls} = 0,5 \Omega$, $x_{lr} = 0,2 \Omega$, $R_r' = 0,1 \Omega$. Tính mômen tại tốc độ 1755 vòng/phút bằng mạch gần đúng, và tính s_{mT} và T_{max}^e bằng mạch chính xác. Bỏ qua R_a và R_c .

> Để áp dụng công thức, cần tính độ trượt

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{60 \times 60 / 2 - 1755}{60 \times 60 / 2} = \frac{1800 - 1755}{1800} = 0,025$$

> Mômen điện từ:

$$T^e = \frac{2}{120\pi} \frac{3(400/\sqrt{3})^2(0,1/0,025)}{(0,1/0,025)^2 + (0,5+0,2)^2} = 205,9 \text{ N.m}$$

Máy điện không đồng bộ

32

Ví dụ 7.5 (tt)

> Cũng có thể tính độ trượt tới hạn và mômen cực đại theo các công thức đã rút ra trước

$$s_{mT} = \frac{R_r'}{\sqrt{R_a^2 + (x_{ls} + x_{lr})^2}} = \frac{0,1}{(0,5+0,2)} = 0,1429$$

$$T_{max}^e = P \times \frac{3V_a^2}{2\omega_s(x_{ls} + x_{lr})} = 2 \times \frac{3(400/\sqrt{3})^2}{2(120\pi)(0,5+0,2)} = 606,3 \text{ N.m}$$

> Với mạch chính xác, tính nguồn Thevenin tương đương:

$$\bar{V}_{th} = 400/\sqrt{3} \angle 0 = \frac{j20}{j(20+0,5)} = 225,3 \angle 0 \text{ V}$$

Máy điện không đồng bộ

33

Ví dụ 7.5 (tt)

$$Z_{th} = \frac{(j20)(j0,5)}{j(20+0,5)} = j0,4878 \Omega$$

> Điều kiện để truyền công suất cực đại (mômen cực đại)

$$\frac{R_r'}{s} = |j(0,4878+0,2)| \Rightarrow s'_{mT} = \frac{0,1}{0,6878} = 0,1454$$

> Mô men cực đại tương ứng

$$T_{max}^e = \frac{2}{120\pi} \frac{3(225,3)^2(0,1/0,1454)}{(0,1/0,1454)^2 + (0,4878+0,2)^2} = 587,3 \text{ N.m}$$

Máy điện không đồng bộ

34

Ví dụ 7.6

◊ Cho động cơ KĐB 3 pha, 60 Hz, 866 V, 6 cực, nối Y với các thông số: $x_{ls} = 1,5 \Omega$, $x_{lr} = 1,15 \Omega$, $x_m = 13,5 \Omega$, và $R_r' = 0,6 \Omega$. Bỏ qua R_a và R_c . Động cơ làm việc ở điện áp định mức và có mômen điện từ bằng 160 N.m. Dùng mạch chính xác, tính độ trượt, tốc độ động cơ (vòng/phút), tần số rôto, mômen cực đại, mômen mở máy. Lập lại các tính toán với mạch gần đúng.

> Điện áp pha và tốc độ đồng bộ

$$V_a = \frac{866}{\sqrt{3}} = 500 \text{ V} \quad n_s = \frac{60 \times 60}{3} = 1200 \text{ v/p}$$

Máy điện không đồng bộ

35

Ví dụ 7.6 (tt)

> Cần tính mômen là một hàm theo s, từ đó tìm ra s. Vậy cần tìm nguồn Thevenin tương đương:

$$\bar{V}_{th} = 500 \angle 0 = \frac{j13,5}{j(13,5+1,5)} = 450 \angle 0 \text{ V}$$

$$Z_{th} = \frac{(j13,5)(j1,5)}{j(13,5+1,5)} = j1,35 \Omega$$

> Mômen điện từ:

$$T^e = \frac{3}{120\pi} \frac{3(450)^2(0,6/s)}{(0,6/s)^2 + (1,35+1,15)^2} = 160 \text{ N.m}$$

Máy điện không đồng bộ

36

Ví dụ 7.6 (tt)

➤ Đặt biến phụ $y = 0,6/s$ sẽ giúp việc giải dễ dàng hơn:

$$T^e = \frac{3}{120\pi} \frac{3(450)^2 (y)}{(y)^2 + (1,35 + 1,15)^2} = 160 \text{ N.m}$$

➤ Dẫn đến phương trình bậc 2:

$$60318y^2 - 1822500y + 376991 = 0$$

➤ Giải ra được 2 nghiệm: $y_1 = 30, y_2 = 0,2083$

➤ Loại nghiệm y_2 vì dẫn đến giá trị $s > 1$. Vậy:

$$0,6/s = 30 \Rightarrow s = 0,02$$

Máy điện không đồng bộ

37

Ví dụ 7.6 (tt)

➤ Tốc độ động cơ: $n = (1-s)n_s = (1-0,02)1200 = 1176 \text{ v/p}$

➤ Tần số rôto: $f_r = sf = 0,02 \times 60 = 1,2 \text{ Hz}$

➤ Độ trượt tới hạn: $s_{mT} = \frac{R'_r}{|Z_{th} + jX'_{lr}|} = \frac{0,6}{1,35 + 1,15} = 0,24$

➤ Mômen cực đại: $T_{max}^e = \frac{3}{120\pi} \frac{3(450)^2 (0,6/0,24)}{(0,6/0,24)^2 + (1,35 + 1,15)^2} = 966,9 \text{ N.m}$

➤ Mômen mở máy: $T_{start}^e = \frac{3}{120\pi} \frac{3(450)^2 (0,6/1)}{(0,6/1)^2 + (1,35 + 1,15)^2} = 438,8 \text{ N.m}$

Máy điện không đồng bộ

38

Ví dụ 7.6 (tt)

➤ Với mạch gần đúng, thực hiện tương tự, ta có

➤ Độ trượt: $s = 0,016$

➤ Tần số rôto: $f_r = 0,96 \text{ Hz}$

➤ Tốc độ động cơ: $n = 1180,8 \text{ v/p}$

➤ Độ trượt tới hạn: $s_{mT} = 0,2264$

➤ Mômen cực đại: $T_{max}^e = 1126 \text{ N.m}$

➤ Mômen mở máy: $T_{start}^e = 485 \text{ N.m}$

Máy điện không đồng bộ

39