TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN
BỘ MÔN: ĐIỆN CÔNG NGHIỆP

MÁY ĐIỆN II

MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ
MÁY ĐIỆN MỘT CHIỀU
MÁY ĐIỆN XOAY CHIỀU CÓ VÀNH GÓP

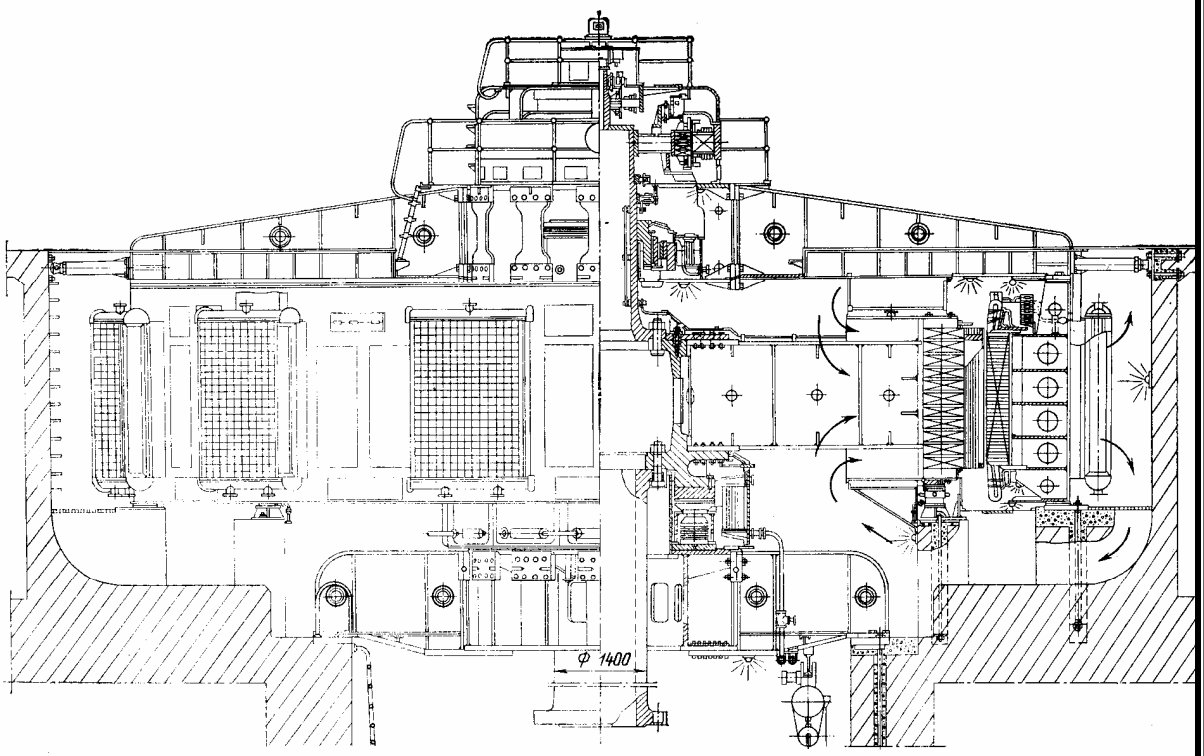


Fig. 62-12. Hydro-alternateur de 150 MW, 15,75 kV, 100tr/mn du type parapluie.

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Phần thứ tư

MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ

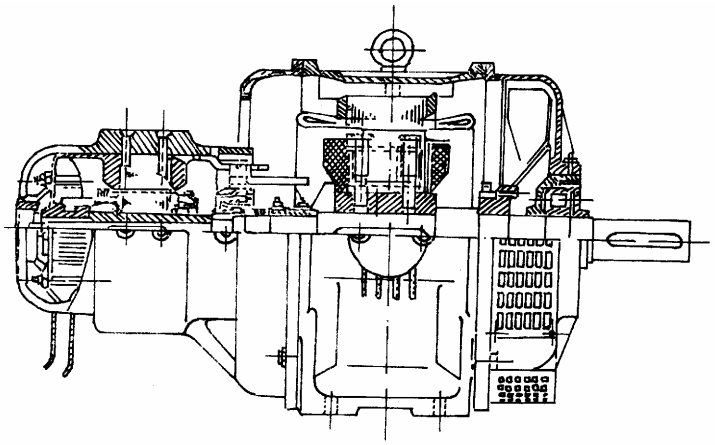
Chương 1. ĐẠI CƯƠNG VỀ MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ

- Hầu hết các nguồn điện xoay chiều công nghiệp và dân dụng đều được sãn xuất từ máy phát điện đồng bộ.
- Động cơ đồng bộ được dùng trong các tải lớn và có thể phát ra công suất phản kháng
- Máy bù đồng bộ để nâng cao hệ số công suất

1.1 Phân loại và kết cấu m.đ.đ.b

1. Phân loại

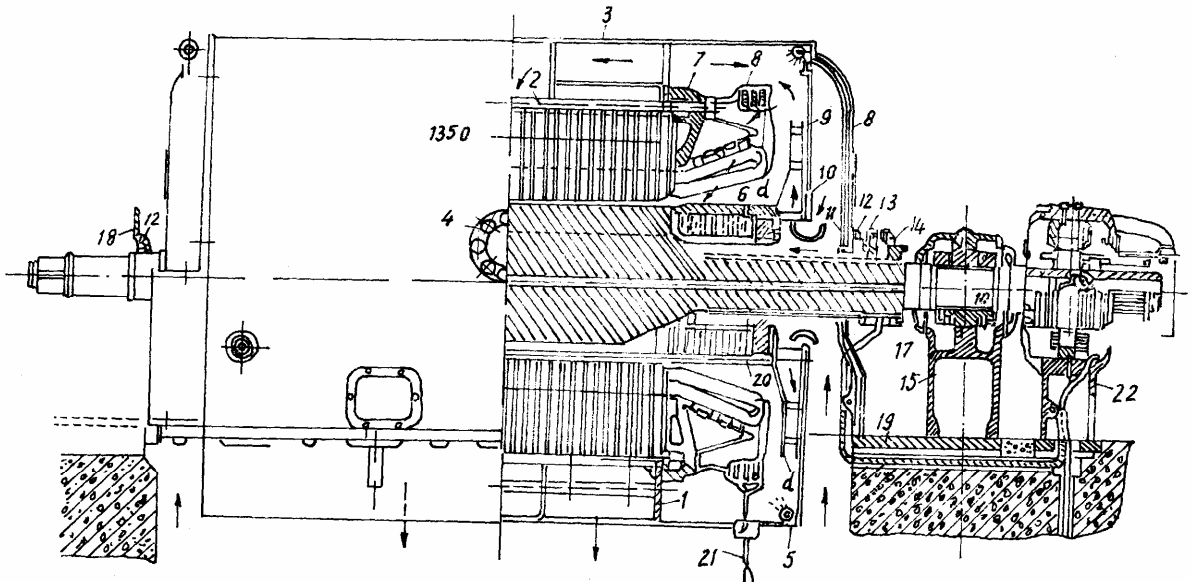
Theo kết cấu cực từ: Máy cực ẩn (2p = 2); Máy cực lồi (2p ≥ 4)
Dựa theo chức năng: Máy phát (Tuabin nước; tuabin hơi; diêzen);
Động cơ (P ≥ 200 KW); máy bù đồng bộ



Hình 1-1. Máy phát điện đồng bộ cực lồi

*2. **Kết cấu**.*

Hình 1-1 mô tả máy phát đồng bộ cực lồi công suất vừa và hình 1-2 là máy phát tuabin hơi (máy cực ẩn).



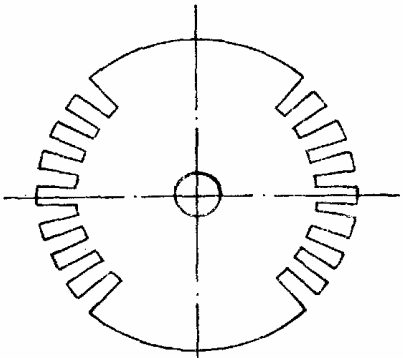
Hình 1-2 Máy phát đồng bộ cực ẩn:
1. bệ máy; 2. lỏi thép stato; 3. Vỏ máy; 4. Giá đở stato; 5. ống dẫn chống cháy; 6. Dây quấn stato; 7. Vành ép stato; 8. Lá chắn ngoài; 9. Lá chắn trong; 10. Lá chắn thông gió; 11. Che lá chắn; 12. Cán chổi; 13. Tay giữ chổi; 14. Chổi; 15. ổ trục; 16. Miếng lót; 17. ống phun dầu; 18. Giá đở ống phun; 19. Tấm mỏng; 20. Rôto; 21. Cực; 22. Máy kích thích

Kết cấu của stato của máy điện đồng bộ hoàn toàn giống như stato của m.đ.k.đ.b, nên ở đây chỉ giới thiệu phần kết cấu của rôto.

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

a) Kết cấu máy đồng bộ cực ẩn

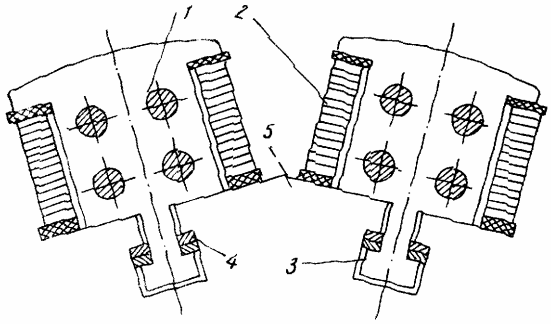
Rô to máy đồng bộ cực ẩn được làm bằng thép hợp kim, gia công thành hình trụ và phay rãnh để bố trí dây quấn kích thích. Phần không phay rãnh tạo nên mặt cực của máy. Mặt cắt ngang của lỏi thep rôto như hình 1-3.



Hình 1-3 Mặt cắt ngang lỏi thép

Vì máy cực ẩn có *2p = 2, (n = 3000 vg/ph)* nên để hạn chế lực ly tâm *D ≤1,1 - 1,15 m*, để tăng công suất ta tăng chiều dài rôto *l đến 6,5m*.

Dây quấn kích thích thường là dây đồng trần tiết diện hình chử nhật, quấn theo chiều dẹt thành từng bối, giữa các vòng dây có một lớp cách điện bằng mica mỏng. Các bối dây được ép chặt trong các rãnh rôto sau đó miệng rãnh được kín bằng thanh thép không từ tính. Hai đâud ra của dây quấn kích thích được nối với 2 vành trược gắn trên trục. Máy phát kích thích thường được nối cùn trục với rôto.



Hình 1-4. Cực từ của máy đồng bộ cực lồi
1. Lá thép cực từ; 2. Dây quấn kích thích;
3. Đuôi cực từ; 4. Nêm; 5. Lỏi thép rôto

b) Kết cấu máy cực lồi.

Máy cực lồi thường quay với tốc độ thấp nên đường kính rôto có thể lớn tới 15m, trong khi chiều dài lại bé. Thường *l/D = 0,15 - 0,2*.

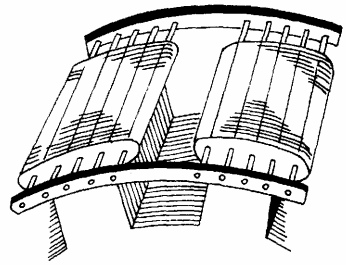
Với các máy nhỏ và vừa rôto được làm bằng thép đúc, gia công thành khối lăng trụ trên có các cực từ, hình 1-4.

Với các máy công suất lớn rôto được ghép từ các lá thép dày từ 1-6 mm, dập định hình và ghép trên giá đở rôto. Cực từ đặt trên rôto ghép bằng các lá thép dày từ 1-1,5 mm.

Dây quấn kích thích được quấn định hình và lồng vào thân cực từ, hình 1.4

Trên bề mặt cực từ có một bộ dây quấn ngắn mạch, như dây quấn lồng sóc của m.đ.k.đ.b. Với máy phát điệnđây là dây quấn còn với động cơ là dây quấn mở máy, như hình 1.5

Dây quấn mở máy có điện trở lớn hơn dây quấn cản.

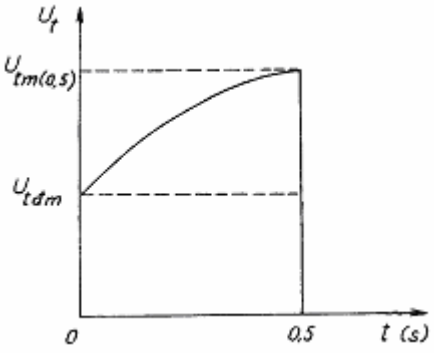


Hình 1-5. Dây quấn cản hoặc dây quấn mở máy

1.2 Hệ thống kích từ.

1. Yêu cầu đối với hệ kích từ.

- Khi làm việc bình thường có khả năng điều chỉnh được dòng điện kích từ $I_t = U_t/r_t$ để duy trì điện áp định mức.
- Có khả năng cưỡng bức dòng kích từ tăng nhanh khi điện áp lưới giảm thấp do có ngắn mạch ở xa. Thường trong khoảng 0,5 giây phải đạt $\frac{U_{tm(0,5)} - U_{tdm}}{U_{tdm}} \approx 2$, như hình 1-6.
- Triệt từ kích thích khi có sự cố bằng điện trở triệt từ R_T



Hình 1-6. Cưỡng bức kích thích

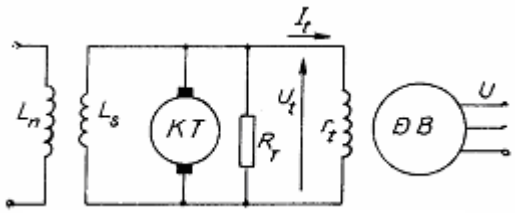
Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

2. Các hệ thống kích từ của máy điện đồng bộ.

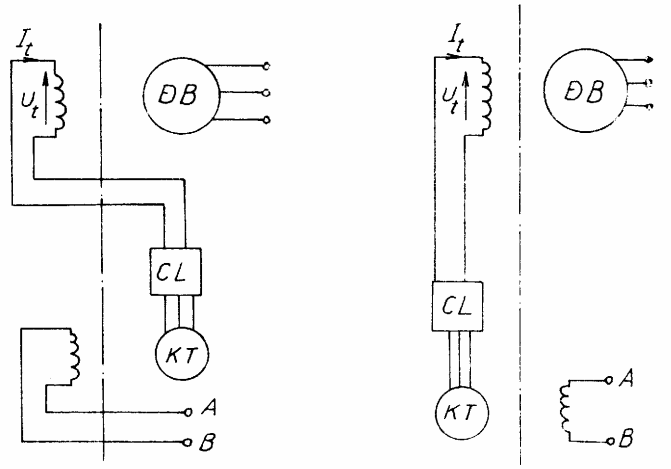
a) Kích từ bằng máy phát điện một chiều gắn cùng trục với máy đồng bộ. Máy phát điện 1 chiều kích thích thường có 2 cuôn dây kích thích: 1 cuộn song song L_s dùng để tự kích thích và 1 cuộn độc lập L_n, hình 1.7.

b) Kích từ bằng máy phát kích từ xoay chiều có chỉnh lưu, hình 1.8a là máy kích từ có phần cảm quay và phần ứng tĩnh và hình 1-8b là máy phát kích từ có phần cảm tĩnh và phần ứng quay

c) Hệ thống tự kích thích hổn hợp, hình 1-9, theo sơ đồ này điện áp và dòng điện kích từ sẽ tỷ lệ với U_T và U_I của biến điện áp *TU* và biến dòng điện *TI*.

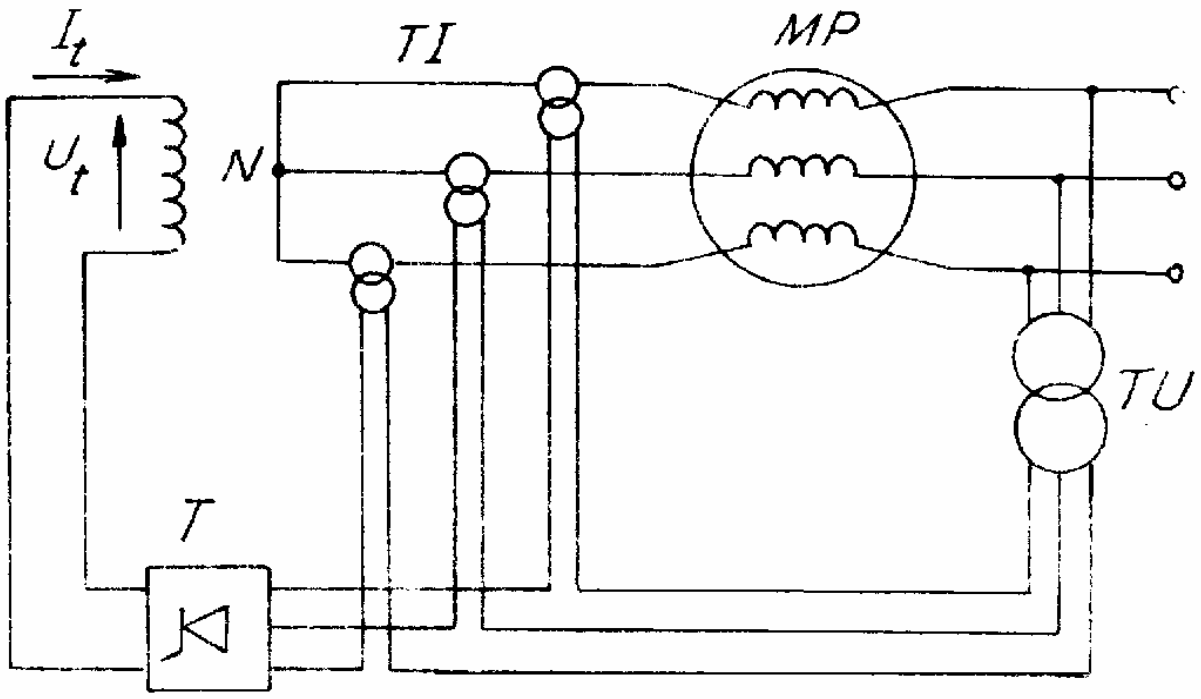


Hình 1-7 Kích từ bằng máy phát kích từ một chiều



Phần quay ***Phần tĩnh*** ***Phần quay*** ***Phần tĩnh***

Hình 1-8 Máy kích từ xoay chiều có chỉnh lưu

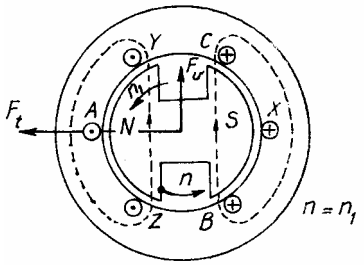


Hình 1-9 Hệ thống tự kích thích hổn hợp của máy điện đồng bộ

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

1.3 Nguyên lý làm việc cơ bản của máy điện đồng bộ

Khi ta đưa dòng điện kích thích một chiều i_t vào dây quấn kích thích đặt trên cực từ, dòng điện i_t sẽ tạo nên một từ thông ϕ_t. Nếu ta quay rôto lên đến tốc độ n (vg/ph), thì từ trường kích thích ϕ_t sẽ quét qua dây quấn phần ứng và cảm ứng nên trong dây quấn đó S.Đ.Đ và dòng điện phần ứng biến thiên với tần số $f_1 = p.n/60$. Trong đó p là số đôi cực của máy.



Hình 1-10 Nguyên lý LVCB

Với máy điện đồng bộ 3 pha, dây quấn phần ứng nối sao (Y) hoặc nối tam giác (Δ) như hình 1.10.

Khi máy làm việc dòng điện phần ứng I_u chạy trong dây quấn 3 pha sẽ tạo nên một từ trường quay (đã biết ở phần 2 MĐ). Từ trường này quay với tốc độ đồng bộ $n_1 = 60.f_1/p$.

Như vậy ở máy điện đồng bộ ta thấy: $n = n_1$ chính vì vậy mà ta gọi nó là máy điện đồng bộ.

1.4 Các trị số định mức.

Kiểu máy; số pha; tần số (Hz); công suất định mức (kW hay KVA); điện áp dây (v); Sơ đồ dấu dây stato; Các dòng điện stato và rôto; Hệ số công suất; Tốc độ quay (vg/ph); Cấp cách điện.

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Chương 2.

TỪ TRƯỜNG TRONG MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ

2.1 Đại cương.

Từ trường trong m.đ.đ.b bao gồm: Từ trường cực từ F_t do dòng điện kích thích i_t và từ trường phần ứng F_u dòng điện phần ứng I_u tạo nên.

Khi không tải ($I = 0$), trong máy chỉ có từ trường F_t. Nếu roto quay F_t quét qua dây quấn stato và cảm ứng nên trong đó S.đ.đ không tải E_0

Khi có tải ($I \neq 0$) , trong máy ngoài F_t còn có F_u. Với máy 3 pha F_u là từ trường quay, từ trường này bao gồm từ trường cơ bản và từ trường bậc cao. Trong đó từ trường cơ bản là quan trọng nhất.

Tác dụng của từ trường phần ứng F_u lên từ trường cực từ F_t gọi là phản ứng phần ứng.

Khi mạch từ không bảo hoà ta xét riêng F_t và F_u rồi xếp chồng để được F_δ.

Trong chương này ta cũng xác định các điện kháng do các từ trường trên sinh ra.

2.2 Từ trường của dây quấn kích thích (F_t).

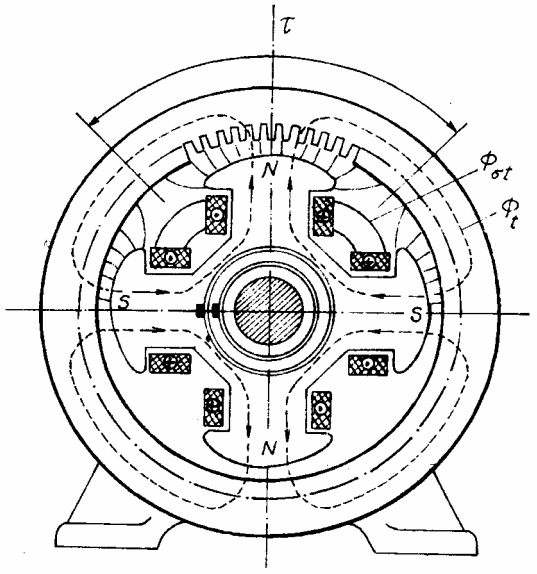
1. Máy cực lồi.

Sức từ động của một cực từ:

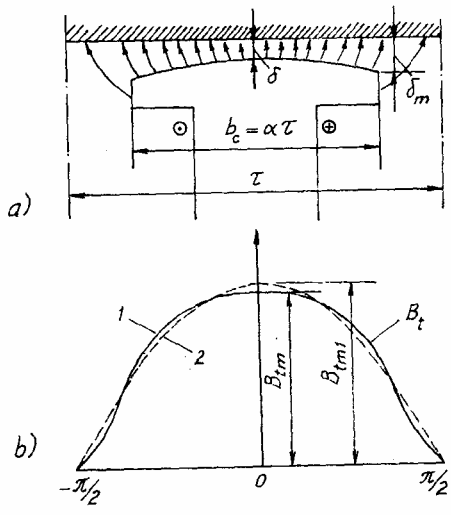
$$F_t = \frac{w_t i_t}{2p} \qquad 2\text{-}1$$

Từ thông do F_t sinh ra khi $p = 2$ như hình 2.1. Trong đó: ϕ_t là từ thông chính, nó đi qua khe hở không khí và móc vòng với dây quấn Stato; $\phi_{\sigma t}$ là từ thông tản của cực từ.

Sự phân bố của từ trường và từ cảm trong khe hở như hình 2.1 và 2.2.



Hình 2.1 Sự phân bố của từ trường kích thích



Hình 2.2 Phân bố của từ cảm trong khe hở

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Trên hình 2.2 sự khác nhau giữa từ cảm cơ bản và từ cảm kích từ B_t được biểu thị qua hệ số dạng sóng.

$$k_t = \frac{B_{tm1}}{B_{tm}} \qquad (2\text{-}2)$$

Trong đó: B_{tm1} là biên độ của sóng từ cảm cơ bản; B_{tm} là trị số cực đại của từ cảm

$k_t \in \delta_m/\delta$; $\alpha = b_c / \tau$. Thường $\delta_m/\delta = 1\text{-}2,5$; $\alpha = 0,67\text{-}0,75$ và $k_t = 0.95\text{-}1,15$

Từ 2.2 ta có:

$$B_{tm1} = k_t.B_{tm} = \frac{\mu_0 F_t}{k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.k_t = \frac{\mu_0}{k_\delta.k_{\mu d}.\delta}\frac{w_t.i_t}{2p}.k_t \qquad (2\text{-}3)$$

k_δ là hệ số khe hở ; $k_{\mu d}$ là hệ số bão hoà dọc trục cực từ.

Từ thông ứng với sóng cơ bản

$$\phi_{t1} = \frac{2}{\pi}B_{tm1}.\tau.l_\delta = \frac{\mu_0}{2}.\frac{\tau.l_\delta}{k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.\frac{w_t.i_t}{p}k_t \qquad (2\text{-}4)$$

Từ thông móc vòng $\Psi_{tud} = w.k_{dq}.\Phi_{t1}.cos\omega t$ và sức điện động hổ cảm trong dây quấn stato

$$e_0 = -\frac{d\Psi_{tud}}{dt} = \omega.w.k_{dq}\Phi_{t1}sin\omega t = E_{0m}sin\omega t$$

Khi rô to quay với tốc độ góc $\omega = 2.\pi.f$ thì từ thông móc vòng với dây quấn phần ứng sẽ là: $\psi_{tud} = W.k_{dq}.\phi_{t1}.cos\omega t$

Sức điện động hổ cảm trong dây quấn sẽ là:

$$e_0 = -\frac{d\Psi_{tud}}{dt} = \omega.W.k_{dq}\phi_{t1}.sin\omega.t = E_{0m}.sin\omega.t$$

Trong đó: $E_{0m} = \omega.W.k_{dq}\frac{\mu_0\tau.l_\delta}{\pi k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.\frac{W_t.k_t}{p}.i_t = \omega.M_{ud}.i_t = x_{ud}.i_t$ 2-5

Vậy hệ số hổ cảm của dq kích thích và dq phần ứng là

$$M_{ud} = \frac{\mu_0\tau.l_\delta}{\pi k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.\frac{W_t.k_t}{p} \qquad 2\text{-}6$$

và điện kháng hổ cảm $x_{ud} = \omega.M_{ud}$ 2-7

Hệ số tự cảm của dây quấn kích thích.

$$L_t = L_{t\delta} + L_{\sigma t} \qquad 2\text{-}8$$

Với: $L_{\sigma t}$ là hệ số tự cảm do từ trường tản gây ra (tra tài liệu TK); $L_{t\delta}$ là hệ số tự cảm do từ trường khe hở $\phi_{t\delta}$ gây ra.

Nếu gọi k_ϕ là tỷ số giữa diện tích giới hạn bởi đường 1 và đường 2 hình 2.2 thì.

$$\phi_{t\delta} = k_\phi.\phi_{t1} \Rightarrow L_{t\delta} = \frac{W_t.\phi_{t\delta}}{i_t} = \frac{\mu_0\tau.l_\delta}{\pi k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.\frac{W_t^2}{p}.k_t.k_\varphi \qquad 2\text{-}9$$

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

2. Máy cực ẩn.

Hình 2.3 biểu diễn sự phân bố của từ cảm cực từ và sóng cơ bản. Lấy trục cực từ làm gốc ta tính được.

$$B_{tm1} = \frac{2}{\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B_t \cos\alpha d\alpha\alpha = \frac{4}{\pi}\int_{0}^{\frac{(1-\gamma).\pi}{2}} B_{tm}\cos\alpha\, d\alpha + \frac{4}{\pi}.\int_{\frac{(1-\gamma)\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2}{\gamma.\pi} B_{tm}\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right).\cos\alpha.d\alpha = \frac{4}{\pi}\frac{\sin\frac{\gamma\pi}{2}}{\frac{\gamma\pi}{2}} B_{tm}$$

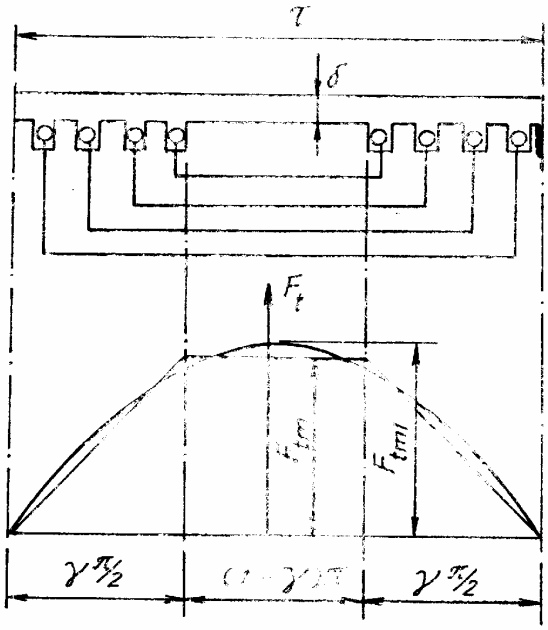
Vậy với máy cực ẩn:

$$k_t = \frac{B_{tm1}}{B_{tm}} = \frac{4}{\pi}.\frac{\sin\frac{\gamma\pi}{2}}{\frac{\gamma\pi}{2}} \qquad 2\text{-}10$$

Thường $\gamma = 0{,}6 - 0{,}85$, nên $k_t = 1{,}065 - 0{,}965$.

Hệ số hình dáng $k_\phi = \frac{\pi}{2}.\frac{1-\frac{2}{3}.\gamma}{k_t}$ 2-11

Hệ số hổ cảm và tự cảm của máy cực ẩn cũng được xác định theo biểu thức 2.6 và 2.9.



Hình 2.3 Sự phân bố của từ cảm cực từ

2.3 Từ trường phần ứng.

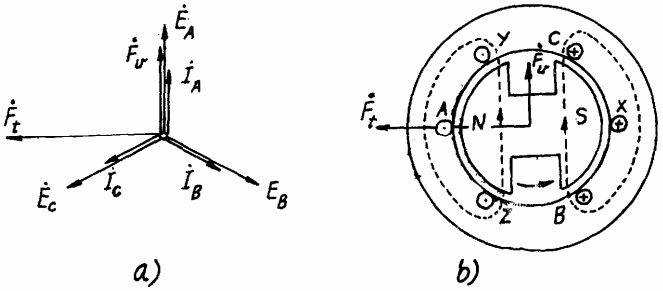
Khi máy điện đồng bộ làm việc từ trường do dòng điện I_u chạy trong dây quấn Stato sinh ra gọi là từ trường phần ứng F_u. Tác dụng của F_u lên F_t gọi là phản ứng phần ứng. *Tuỳ thuộc vào tính chất của tải và dạng cực từ mà phản ứng phần ứng có các dạng khác nhau.*

1. Phản ứng phần ứng ngang trục và dọc trục

Xét một máy đồng bộ 3 pha *(m = 3), 2p = 2*, mỗi pha được tượng trưng bằng một vòng dây, thời điểm xét $\dot{I}_A = I_m$; $\dot{I}_B = \dot{I}_C = -I_m/2$

a/ Khi tải thuần trở.

Khi tải đối xứng và thuần trở, $\dot{I}$ và $\dot{E}$ trùng pha nhau *($\psi = 0$)*. Tại thời điểm xét $i_A = I_m$ nên $F_u \equiv \dot{I}_A \equiv \dot{E}_A$ còn s.t.đ $\dot{F}_A$ sinh ra $e_A = \dot{E}_{Am}$ sẽ vượt pha trước $\dot{E}_A$ một góc $\pi/2$. Như vậy trong trường hợp này $\dot{F}_u \perp \dot{F}_t$, ***phản ứng phần ứng là ngang trục.*** Đồ thị véc tơ thời gian $\dot{I}$, $\dot{E}$ và không gian $\dot{F}_u$, $\dot{F}_t$ như hình 2.4

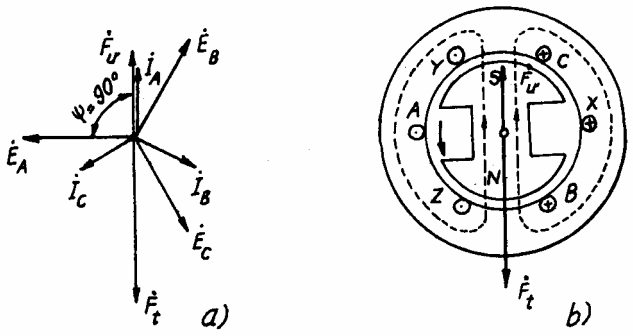


Hình 2. 4 Phản ứng phần ứng khi tải thuần trở

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

b/ Khi tải thuần cảm.

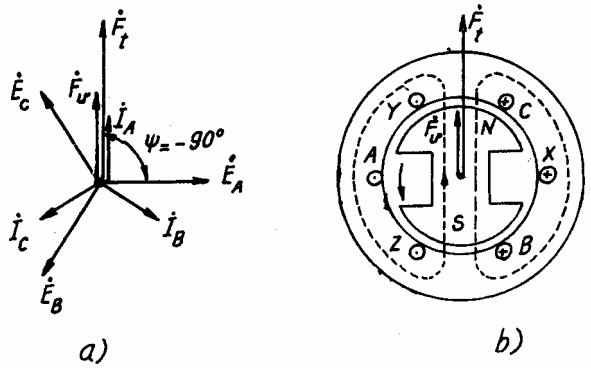
$\dot{E}_A$ vượt pha trước $\dot{I}_A$ một góc $\pi/2$ và $\dot{F}_t$ vượt pha trước $\dot{E}_A$ một góc $\pi/2$, nên $\dot{F}_u$ và $\dot{F}_t$ trùng phương nhưng ngược chiều, ***phản ứng phần ứng là dọc trục khử từ.*** Đồ thị véc tơ thời gian $\dot{I}$, $\dot{E}$ và không gian $\dot{F}_u$, $\dot{F}_t$ như hình 2.5



Hình 2.5 Phản ứng phần ứng khi tải thuần cảm

c/ Khi tải thuần dung.

$\dot{E}_A$ chậm pha so với $\dot{I}_A$ một góc $\pi/2$ và $\dot{F}_t$ vượt pha trước $\dot{E}_A$ một góc $\pi/2$, nên $\dot{F}_u$ và $\dot{F}_t$ trùng phương, chiều với nhau nên, ***phản ứng phần ứng là dọc trục khử từ.*** Đồ thị véc tơ thời gian $\dot{I}$, $\dot{E}$ và không gian $\dot{F}_u$, $\dot{F}_t$ như hình 2.6



Hình 2.6 Phản ứng phần ứng khi tải thuần dung

d/ Khi tải hỗn hợp.

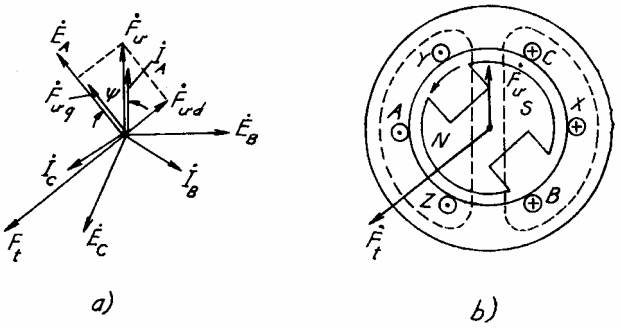
$\dot{E}_A$ lệch so với $\dot{I}_A$ một góc ψ, ta phân $\dot{F}_u$ thành 2 thành phần:

$F_{ud} = F_u.\sin\psi$ - dọc trục

$F_{uq} = F_u.\cos\psi$ - ngang trục

Vậy khi $0 < \psi < \pi/2$, ***phản ứng phần ứng là ngang trục và khử từ***

Vậy khi $-\pi/2 < \psi < 0$, ***phản ứng phần ứng là ngang trục và trợ từ***



Hình 2.7 Phản ứng phần ứng khi tải có tính

2. Từ cảm do từ trường phần ứng và các điện kháng tương ứng.

a/ Máy đồng bộ cực ẩn.

Với máy đồng bộ cực ẩn δ đều, nếu mạch từ không bảo hoà thì từ trở là hằng số, như vậy nếu F_u là sin thì B_u cũng sin.

$$B_{um} = \frac{\mu_0}{k_\delta.k_\mu.\delta}.F_u = \frac{\mu_0}{k_\delta.k_\mu.\delta}\frac{m.\sqrt{2}}{\pi}\frac{W.k_{dq}}{p}.I \qquad 2\text{-}12$$

và

$$\phi_u = \frac{2}{\pi}.B_{um}.\tau.l_\delta = \frac{2.\mu_0.\tau.l_\delta}{k_\delta.k_\mu.\delta}\frac{m.\sqrt{2}}{\pi^2}\frac{W.k_{dq}}{p}.I \qquad 2\text{-}13$$

Sức điện động phần ứng do từ thông ϕ_u cảm ứng nên có trị số:

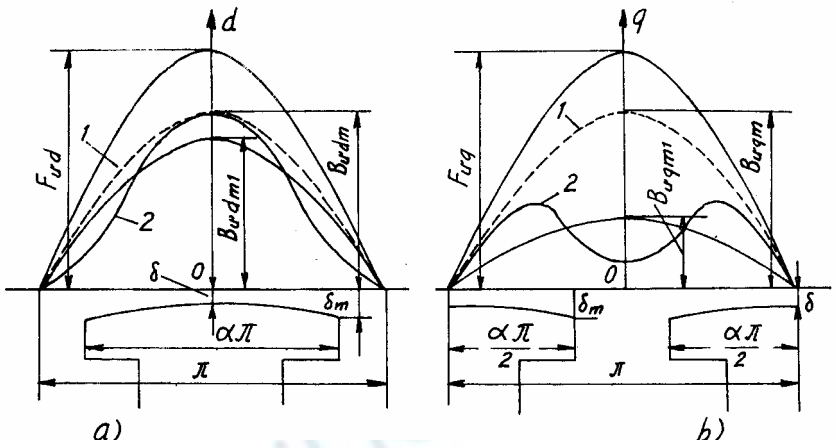
$$E_u = \frac{\omega}{2}W.k_{dq}.\phi_u = \pi.\sqrt{2}.f.W.k_{dq}.\phi_u \quad \text{và} \quad x_u = \frac{E_u}{I_u} = 4.m.f.\frac{\mu_0.\tau.l_\delta}{\pi.k_\delta.k_\mu.\delta}\frac{W^2.k_{dq}^2}{p} \qquad 2\text{-}14$$

Thường $x_u = 1{,}1 - 2{,}3$

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

b/ Máy đồng bộ cực lồi.

Máy đồng bộ cực lồi δ dọc trục và ngang trục không giống nhau, nên mặc dầu s.t.đ là sin nhưng từ cảm sẽ không sin. Sự không sin của B_u còn phụ thuộc vào tính chất của tải. Để thuận lợi ta phân F_u ứng với một tải bất kỳ thành hai thành phần dọc trục và ngang trục như hình 2.8



Hình 2.8 Sự phân bố của s.t.đ và từ cảm dọc trục và ngang trục

Ta có:

$$F_{ud} = F_u.sin\psi = \frac{m.\sqrt{2}}{\pi}\frac{W.k_{dq}}{p} I.sin\psi = \frac{m.\sqrt{2}}{\pi}\frac{W.k_{dq}}{p} I_d \qquad 2\text{-}15$$

$$F_{uq} = F_u.cos\psi = \frac{m.\sqrt{2}}{\pi}\frac{W.k_{dq}}{p} I.cos\psi = \frac{m.\sqrt{2}}{\pi}\frac{W.k_{dq}}{p} I_q \qquad 2\text{-}16$$

và từ cảm tương ứng.

$$B_{udm} = \frac{\mu_0}{k_\delta.k_{\mu d}.\delta} F_{ud} \qquad \text{và} \qquad B_{uqm} = \frac{\mu_0}{k_\delta.k_{\mu q}.\delta} F_{uq} \qquad 2\text{-}17$$

Thực tế B_{ud} và B_{uq} phân bố không sin, phân tích thành sóng cơ bản và sóng bậc cao. Với các sóng cơ bản ta có hệ số dạng sóng:

$$k_{ud} = \frac{B_{udm1}}{B_{udm}} \qquad \text{và} \qquad k_{uq} = \frac{B_{uqm1}}{B_{uqm}} \qquad 2\text{-}18$$

Các hệ số k_{ud} và k_{uq} phụ thuộc vào α, δ_m/δ, δ/τ được tính sẵn trong tài liệu thiết kế
Các điện kháng tương ứng xác định như máy cực ẩn:

$$x_{ud} = \frac{E_{ud}}{I_d} = 4.m.f.\frac{\mu_0.\tau.l_\delta}{\pi.k_\delta.k_{\mu d}.\delta}\frac{W^2.k_{dq}^2}{p} k_{ud} \qquad 2\text{-}19$$

$$x_{uq} = \frac{E_{uq}}{I_q} = 4.m.f.\frac{\mu_0.\tau.l_\delta}{\pi.k_\delta.k_{\mu q}.\delta}\frac{W^2.k_{dq}^2}{p} k_{uq} \qquad 2\text{-}20$$

Thường: $x_{ud} = 0,5 - 1,5;\ x_{uq} = 0,3 - 0,9$

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

2.4 Quy đổi các S.T.Đ trong máy điện đồng bộ

Chế độ làm việc xác lập, tải đối xứng tác dụng của $F_{ư}$ lên F_t là trợ từ hoặc khử từ. Để đánh giá được mức độ ảnh hưởng đó ta phải quy đổi $F_{ư}$ về F_t và như vậy khi xét các đặc tính làm việc của máy ta có thể biểu thị chúng trên cùng một hệ trục toạ độ và đường cong không tải $E = f(i_t)$.

Chế độ quá độ ta phải quy đổi ngược lại F_t về $F_{ư}$.

Việc quy đổi phải đảm bảo điều kiện:

$$B_{tm1} = B_{ưm1} \qquad 2\text{-}21$$

Chế độ xác lập, máy cực ẩn ta có:

$$B_{tm1} = k_t.B_{tm} = k_t.\frac{\mu_0}{k_\delta.k_\mu.\delta}.F_t \quad \text{và} \quad B_{um1} = B_{tm} = \frac{\mu_0}{k_\delta.k_\mu.\delta}.F_t \qquad 2\text{-}22$$

Vậy $F'_u = \frac{F_u}{k_t} = k_u.F_u$ hay $k_u = \frac{1}{k_t}$

Với máy cực lồi theo hướng dọc trục:

$$B_{tm1} = k_t.B_{tm} = k_t.\frac{\mu_0}{k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.F_t \text{ và } B_{udm1} = k_{ud}.B_{udm} = k_{ud}.\frac{\mu_0}{k_\delta.k_{\mu d}.\delta}.F_{ud} \qquad 2\text{-}23$$

Sức từ động phần ứng dọc trục đã quy đổi về s.t.đ cực từ:

$$F'_{ud} = F_{ud}\frac{k_{ud}}{k_t} = F_{ud}.k_d \quad \text{với} \quad k_d = k_{ưd} / k_t$$

Cũng vậy, theo hướng ngang trục:

$$F'_{uq} = F_{uq}\frac{k_{uq}}{k_t} = F_{uq}.k_q \quad \text{với} \quad k_q = k_{ưq} / k_t$$

Các hệ số k_d và k_q phụ thuộc vào α, δ_m/δ, δ/τ được tính sẵn trong tài liệu thiết kế.

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Chương 3.

QUAN HỆ ĐIỆN TỪ TRONG MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ

3.1 Đại cương.

Quan hệ điện từ trong m.đ.đ.b bao gồm các phương trình điện áp, đồ thị véc tơ, giản đồ năng lượng và công suất điện từ của máy điện đồng bộ.

3.2 Phương trình điện áp và đồ thị véc tơ.

Chế độ tải đối xứng ta chỉ cần xét cho một pha.
Đối với máy phát điện:

$$\dot{U} = \dot{E}_\delta - \dot{I}(r_u + jx_{\sigma u}) \qquad 3\text{-}1$$

Đối với động cơ và máy bù đồng bộ:

$$\dot{U} = \dot{E}_\delta + \dot{I}(r_u + jx_{\sigma u}) \qquad 3\text{-}2$$

Trong đó: U là điện áp đầu cực của máy, $r_{ư}$ và $x_{\sigma ư}$ là điện trở và điện kháng tản của dây quấn phần ứng;

E_δ là s.đ.đ cảm ứng trong dây quấn do từ trường khe hở.

Khi mạch từ không bảo hoà, áp dụng nguyên lý xếp chồng ta có:

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_u \qquad 3\text{-}3$$

Khi mạch từ bảo hoà ta phải xác định $\dot{F}_\delta = \dot{F}_0 + \dot{F}_u$ rồi suy ra $\dot{E}_\delta$

1. Trường hợp máy phát điện.

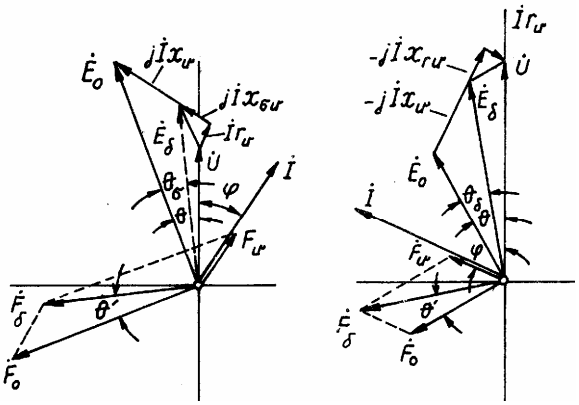
a/ Khi mạch từ không bảo hoà.

Giả sử tải đối xứng và có tính cảm $(0 < \psi < 90^0)$

-/ Máy cực ẩn:

Phương trình cân bằng điện áp là:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_u - \dot{I}(r_u + jx_{\sigma u}) \qquad 3\text{-}4$$



Hình 3.1 Đồ thị s.đ.đ máy phát đồng bộ cực ẩn

Chương 2 ta đã xác định được $\dot{E}_u = -j\dot{I}x_u$ nên

$$\dot{U} = \dot{E} - j.\dot{I}(x_u + jx_{\sigma u}) - \dot{I}.r_u = \dot{E} - j\dot{I}.x_{db} - \dot{I}.r_u \qquad 3.5$$

trong đó $x_{đb} = x_{ư} + x_{\sigma ư}$ là điện kháng đồng bộ, thường $x_{đb} = 0,7 - 1,6$

Đồ thị véc tơ như hình 3.1

- / Máy cực lồi.

Ta phân s.t.đ phần ứng $F_{ư}$ thành $F_{ưd}$ và $F_{ưq}$, từ thông tương ứng với các s.t.đ đó sẽ cảm nên các s.đ.đ: $\dot{E}_{ud} = -j\dot{I}_d x_{ud}$ và $\dot{E}_{uq} = -j\dot{I}_q x_{uq}$ Phương trình cân bằng điện áp có dạng.

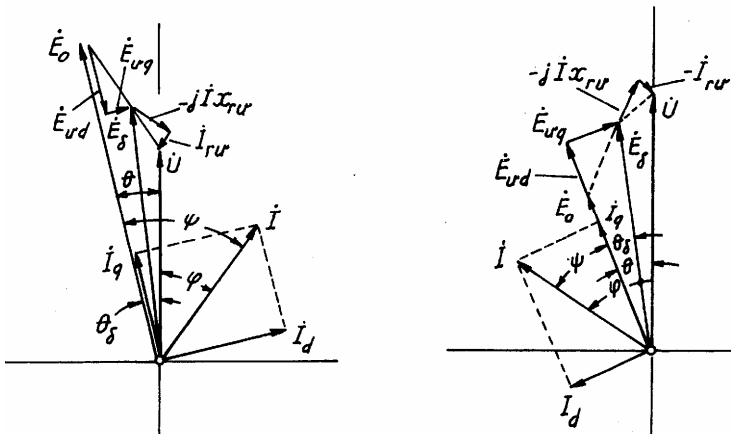
Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ud} + \dot{E}_{uq} - \dot{I}(r_u + x_{\sigma u}) = \dot{E} - j\dot{I}x_{ud} - j\dot{I}x_{uq} - j\dot{I}x_{\sigma u} - \dot{I}r_u \qquad 3.6$$

Đồ thị véc tơ như hình 3.2 có tên gọi là đồ thị Blondel

Véc tơ $-j\dot{I}x_{\sigma u}$ do từ thông tản của từ trường phần ứng sinh ra không phụ thuộc vào từ dẫn hướng dọc và ngang trục, tuy nhiên ta cũng có thể phân tích chúng theo 2 hướng dọc và ngang trục:

$$-j.\dot{I}x_{\sigma u} = -j(\dot{I}x_{\sigma u}cos\psi - \dot{I}x_{\sigma u}sin\psi) = \\ = -j\dot{I}_q x_{\sigma u} - j\dot{I}_d x_{\sigma u}$$



Hình 3.2 Đồ thị s.đ.đ máy phát điện đồng bộ cực lồi

và phương trình điện áp được viết lại:

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_d(x_{ud} + x_{\sigma u}) - j\dot{I}(x_{uq} + x_{\sigma u}) - \dot{I}r_u = \dot{E} - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I}r_u \qquad 3.7$$

Trong đó:

$x_d = x_{ud} + x_{\sigma u}$ gọi là điện kháng đồng bộ dọc trục, thường $x_d = 0,7 - 1,2$

$x_q = x_{uq} + x_{\sigma u}$ gọi là điện kháng đồng bộ ngang trục, thường $x_q = 0,46 - 0,76$

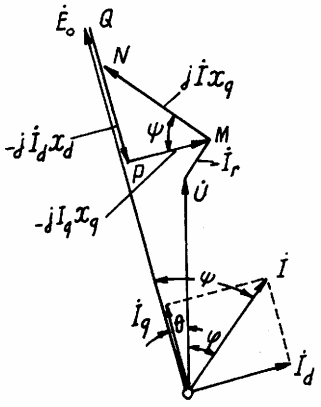
Đồ thị véc tơ ứng với phương trình 3.7 như hình 3.3

b/ Khi mạch từ bảo hoà.

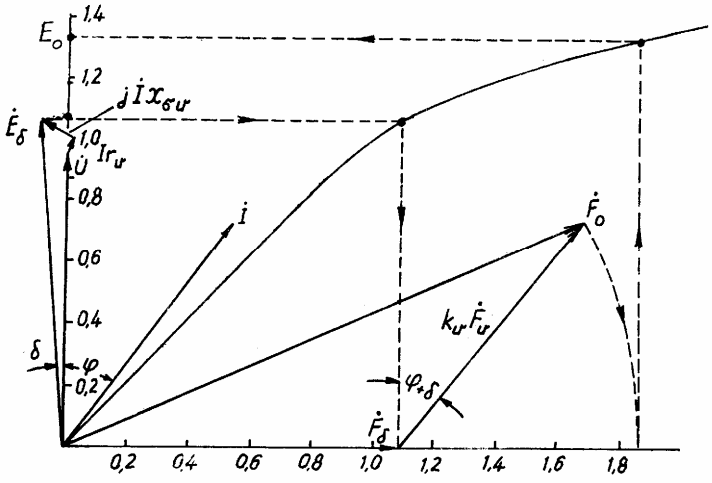
Khi mạch từ bảo hoà vì các hệ số $k_{\mu d}$ và $k_{\mu q}$ rất khó tính chính xác nên ta phải vẽ kết hợp đồ thị s.t.đ và s.đ.đ với đường cong không tải. Đồ thị này được gọi là đồ thị s.t.đ.đ, có tên là đồ thị Pôchiê.

- Máy cực ẩn:

Giả sử *U, I, cosφ, r_u, $x_{\sigma u}$* và đặc tính không tải đã biết, để thành lập đồ thị s.t.đ.đ trên trục tung của đặc tính không tải, ta đặt véc tơ *U* và véc tơ *I* chậm sau *U* một góc *φ*.



Hình 3.3 Đồ thị s.đ.đ máy phát điện đồng bộ cực lồi đã biến đổi

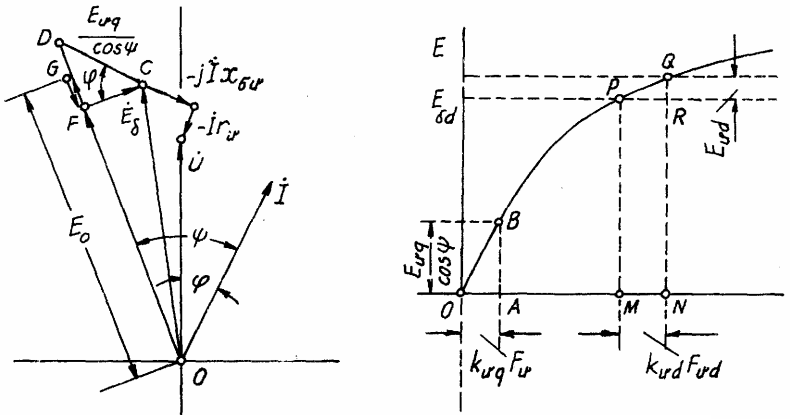


Hình 3.4 Đồ thị S.T.Đ.Đ máy phát điện đồng bộ cực ẩn

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Cộng U với $\dot{I}r_u$ và $j\dot{I}x_u$ được $\dot{E}_\delta$. Trên trục hoành đặt $\dot{F}_\delta$ rồi cộng $\dot{F}_\delta$ với $K_u\dot{F}_u$ hợp với trục hoành một góc $90^0 + (\varphi + \delta)$, tìm được $\dot{F}_0$. Từ đồ thị này xác định được $\Delta U = E - U_{đm}$, thường = (5 - 10)%

- Với máy phát đồng bộ cực lồi, việc thành lập chính xác đồ thị véc tơ là rất khó, vì ϕ_d và ϕ_q hổ cảm với nhau, hơn nữa mức độ bảo hoà theo 2 hướng lại khác nhau. Như vậy $x_{ưd}$ và $x_{ưq}$ phụ thuộc cả vào ϕ_d và ϕ_q. Để đơn giản ta coi $x_{ưd}$ chỉ phụ thuộc vào ϕ_d và $x_{ưq}$ chỉ phụ thuộc vào ϕ_q và $k_{\mu q}$ đã biết. Khi đó sau khi đã vẽ các véc tơ U, $Ir_ư$ và $jI.x_{\sigma ư}$ được $\dot{E}_\delta$, hình 3.5a, theo hướng $jI.x_{\sigma ư}$ vẽ đoạn $CD = \mathrm{I.x_{uq}} = \dfrac{E_{uq}}{\cos\psi}$ và xác định được phương của E. Trị số $x_{ưq}$ có thể tính hoặc lấy bằng *1,1 - 1,15*. Từ hình 3.5b ta cũng xác định được CD qua $OA = F'_{ưq} = k_q.F_{ưq}$, sau đó xác định được $E_{\delta d} = OF = MP$, lấy $MN = F'_{ưd} = k_d.F_{ưd}$ chiếu lên ta được E



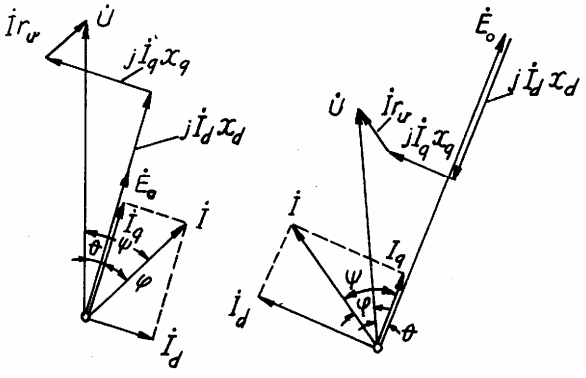
a) b)

Hình 3-6 Cách xây dựng đồ thị véc tơ s.t.đ.đ của máy đồng bộ cực lồi

2. Trường hợp động cơ điện.

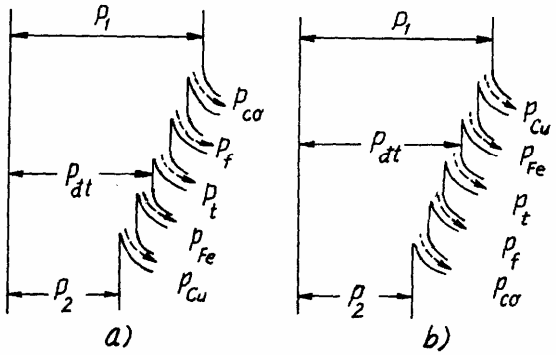
Động cơ điện đồng bộ có cấu tạo cực lồi vì vậy phương trình điện áp sẽ là:

$$\dot{U} = \dot{E}_\delta + \dot{I}(r_u + jx_{\sigma u}) = \dot{E} + \dot{E}_{ud} + \dot{E}_{uq} + \dot{I}(r_u + jx_{\sigma u}) = \dot{E} + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I}r_u \qquad 3.8$$



a) b)

Hình 3-6 Đồ thị véc tơ Động cơ đồng bộ
a) Thiếu kích thích; b) Quá kích thích



Hình 3-7 Giản đồ năng lượng
a) máy phát; b) động cơ

3.3 Giản đồ năng lượng của máy điện đồng bộ

Máy phát: $P_{đt} = P_1 - (p_{cơ} + p_t + p_f)$ và $P_2 = P_{đt} - p_{cu} - p_{fe}$

Động cơ: $P_{đt} = P_1 - p_{cu} - p_{fe}$ và $P_2 = P_{đt} - (p_{cơ} + p_t + p_f)$

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

3.4 Các đặc tính góc của máy điện đồng bộ

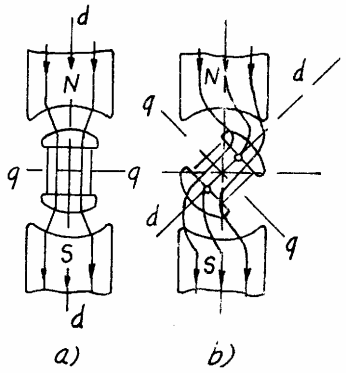
1. Đặc tính góc công suất tác dụng.

$P = f(\theta)$ khi $E = const$, $U = const$, với θ là góc tải giữa véc tơ E và U.

Để đơn giản ta bỏ qua r_u vì nó rất bé so với $(x_{đb}, x_d, x_q)$. Công suất đầu cực của máy đồng bộ bằng: $P = mUI\cos\varphi$

Theo đồ thị véc tơ hình 3.3 ta có:

$$I_d = \frac{E - U\cos\theta}{x_d}, \quad I_q = \frac{U.\sin\theta}{x_q} \quad \text{và} \quad \varphi = \psi - \theta \qquad 3.9$$



Hình 3-8 Sự tạo nên P_U

Do đó: $P = mUI\cos\varphi = mUI\cos(\psi - \theta)$

$= mU(I\cos\psi.\cos\theta + I\sin\psi.\sin\theta)$

$P = mU(I_q.\cos\theta + I_d.\sin\theta)$, thay I_d và I_q vào ta có:

$$P = \frac{mU^2}{x_q}\sin\theta\cos\theta + \frac{mEU}{x_d}\sin\theta - \frac{mU^2}{x_d}\sin\theta\cos\theta$$

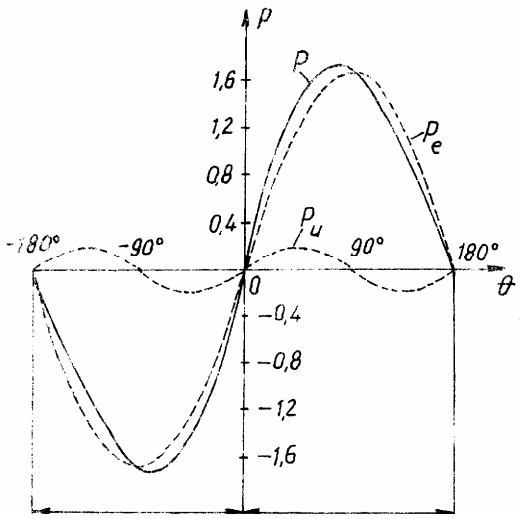
Hay

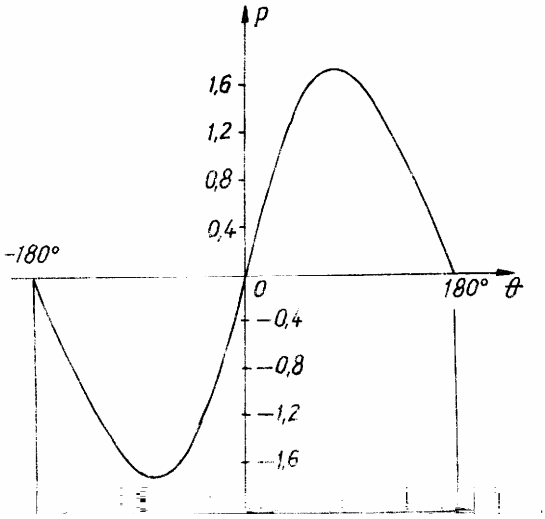
$$P = \frac{mUE}{x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta = P_e + P_u \qquad 3.10$$

Từ biểu thức 3.10 ta thấy công suất tác dụng của máy đồng bộ cực ẩn có hai phần. Một phần P_e tỷ lệ với $\sin\theta$ và phụ thuộc vào kích từ; một phần P_u tỷ lệ với $\sin 2\theta$ không phụ thuộc vào kích từ. Như vậy đối với máy phát đồng bộ cực lồi khi mất kích từ công suất tác dụng vẫn có một lượng nhỏ là P_u. Người ta ứng dụng điều này để chế ra các động cơ điện phản kháng có công suất cơ vài chục oát.

- Với máy đồng bộ cực ẩn vì $x_d = x_q$ nên $P = m\frac{UE}{x_{db}}\sin\theta$ 3.11

Đặc tính góc công suất tác dụng máy điện đồng bộ như hình 3.9





Động cơ ***Máy phát*** ***Động cơ*** ***Máy phát***

Hình 3-9 Đặc tính góc công suất tác dụng. a) máy cực lồi; b) máy cực ẩn

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

2. Đặc tính góc công suất phản kháng.

Công suất phản kháng của máy điện đồng bộ được tính:

$Q = mUI\sin\varphi = mUI\sin(\psi - \theta) = mU(I\sin\psi.\cos\theta + I\cos\psi.\sin\theta)$

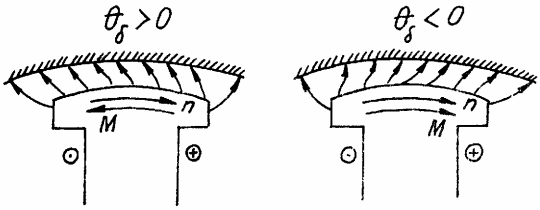
$Q = mU(I_d.\cos\theta - I_q.\sin\theta)$

Thay I_d và I_q vào ta có:

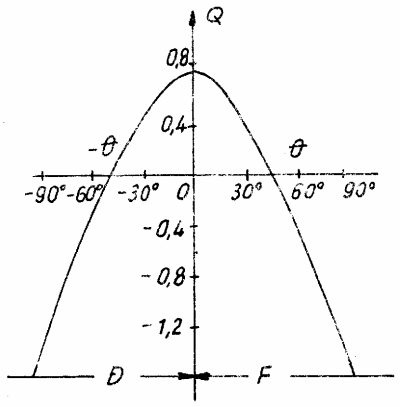
$$Q = \frac{mUE}{x_d}\cos\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\cos 2\theta - \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d}\right)$$

Đặc tính góc công suất phản kháng của máy điện đồng bộ như hình 3.11.

Khi $-\theta' < \theta < +\theta'$ máy phát công suất phản kháng vào lưới, ngoài phạm vi trên máy tiêu thụ công suất phản kháng.



Hình 3-10 Từ trường khe hở
a) máy phát, b) động cơ



Hình 3-11 Đặc tính góc công suất phản kháng máy cực lồi

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Chương 4.

MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ LÀM VIỆC VỚI TẢI ĐỐI XỨNG

4.1 Đại cương.

Chế độ tải đối xứng của máy điện đồng bộ được đặc trưng bởi các đại lượng: U, I, I_t , $cos\varphi$ và tần số f hoặc tốc độ n.

Trong đó $f = f_{đm}$; $cos\varphi$ phụ thuộc vào tải còn lại *3* đại lượng U, I, I_t xác định cho ta các đặc tính.

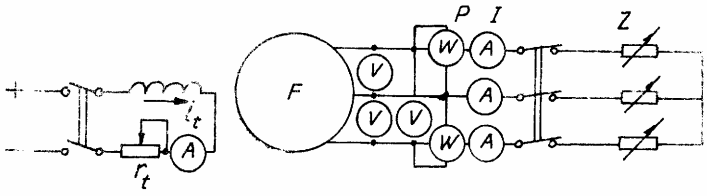
1. Đặc tính không tải $U = f(I_t)$ khi $I = 0; f = f_{đm}$
2. Đặc tính ngắn mạch $I_n = f(I_t)$ khi $U = 0; f = f_{đm}$
3. Đặc tính ngoài $U = f(I)$ khi $I_t = cte; f = f_{đm}; cos\varphi = Cte$
4. Đặc tính điều chỉnh $I_t = f(I)$ khi $U = cte; f = f_{đm}; cos\varphi = Cte$
5. Đặc tính tải $U = f(I_t)$ khi $I = cte; f = f_{đm}; cos\varphi = Cte$

Các đặc tính trên được xác định bằng cách tính toán hoặc thí nghiệm.

Từ các đặc tính trên ta suy ra tỷ số ngắn mạch K; ΔU và các tham số x_d; x_q; $x_{\sigma ư}$

4.2 Các đặc tính của máy phát điện đồng bộ.

Sơ đồ thí nghiệm như hình 4.1



Hình 4.1 Sơ đồ thí nghiệm lấy các đặc tính của máy phát điện đồng bộ

1. Đặc tính không tải.

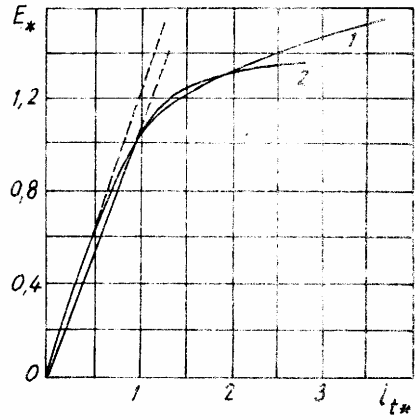
($E = U = f(I_t)$ khi *$I = 0$ và $f = f_{đm}$)*

Hệ đơn vị tương đối $E_* = E/E_{đm}$; $I_{t*} = I_t / I_{tđm0}$

Theo sơ đồ thí nghiệm hình 4.1 Mở cầu dao tải, quay máy phát đến tốc độ định mức, thay đổi dòng điện kích từ ta nhận được đường đặc tính không tải, như hình 4.2

Đường (1) máy phát tourbin hơi, đường (2) máy phát tourbin nước. Ta thấy máy phát tourbin hơi bảo hoà nhiều hơn máy phát tourbin nước.

Khi $E = E_{đm} = 1$ máy phát tourbin hơi có $k_{\mu d} = k_\mu = 1,2$ còn máy phát tourbin nước có $k_\mu = 1,06$



Hình 4.2 Đặc tính không tải,
(1) MF tuabin hơi, (2) MF tuabin nước

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

2. Đặc tính ngắn mạch, $I_n = f(I_t)$ khi $U = 0, f = f_{đm}$ và tỷ số ngắn mạch K

Khi ngắn mạch nếu bỏ qua $r_{ư}$ thì tải của máy phát là dây quấn của phần ứng nên nó được coi là thuần cảm $\psi = 0, I_q = I\cos\psi = 0$ còn $I_d = I\sin\psi = I$

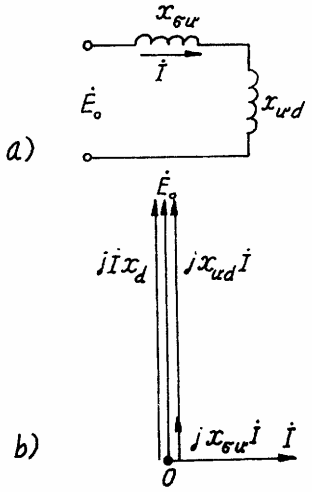
Mạch điện thay thế và đồ thị véc tơ như hình 4.3, ta có

$$\dot{E}_0 = + j\dot{I}x_d \qquad 4.1$$

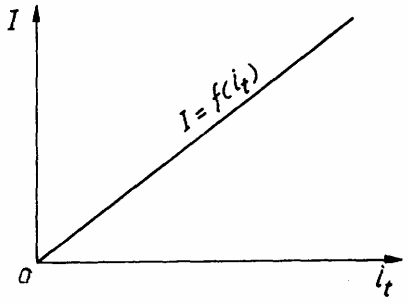
Khi ngắn mạch vì từ thông ϕ_δ cần thiết để sinh ra $E_\delta = E - Ix_{ưd} = Ix_{\sigma ư}$ rất bé nên mạch từ không bảo hoà do đó quan hệ $I = f(I_t)$ là đường thẳng, hình 4.4

Tỷ số ngắn mạch *K*. Đây là tỷ số giữa dòng điện ngắn mạch I_{n0} ứng với dòng điện I_t sinh ra $E = U_{đm}$ lúc không tải và dòng điện định mức $I_{đm}$

$$K = I_{n0} / I_{đm} \qquad 4.2$$



Hình 4.3 (a) mạch điện thay thế; (b) đồ thị véc tơ



Hình 4.4 Đặc tính ngắn mạch của máy phát điện đồng bộ

Từ hình 4.5 ta suy ra:

$$I_{n0} = U_{đm} / x_d \qquad 4.3$$

Với x_d là điện kháng đồng bộ dọc trục ứng với $E = U_{đm}$

Vậy $K = U_{đm} / x_d.I_{đm} = 1/ x_{d*}$

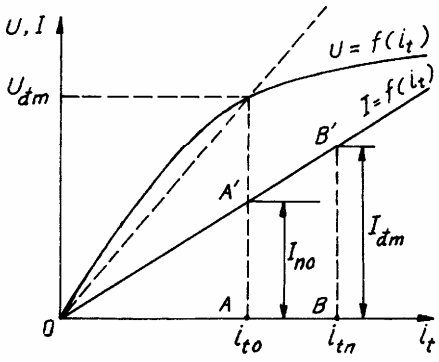
Thường $x_{d*} > 1$ nên $K < 1$, hay $I_{n0} < I_{đm}$ Vậy dòng điện ngắn mạch xác lập của máy phát điện đồng bộ không lớn, đó là do tác dụng khử từ của phản ứng phần ứng.

Qua hai tam giác đồng dạng *OAA′* và *OBB′* ta có:

$$K = \frac{I_{n0}}{I_{đm}} = \frac{I_{t0}}{I_{tn}} \qquad 4.4$$

$I_{t0} \Rightarrow U_0 = U_{đm}$ và $I_{tn} \Rightarrow I_n = I_{đm}$

K là một tham số quan trọng của máy phát điện đồng bộ.



Hình 4-5 Xác định tỷ số ngắn mạch *K*

K lớn $\Rightarrow \Delta U$ bé và $P_{đt}$ lớn $\Rightarrow$ máy làm việc ổn định, muốn *K* lớn thì x_{d*} phải lớn $\Rightarrow \delta$ lớn $\Rightarrow$ kích thước của máy lớn $\Rightarrow$ giá thành tăng.

Thường máy phát tourbin nước K = 0,8 - 1,8; và tourbin hơi K = 0,5 - 1,0

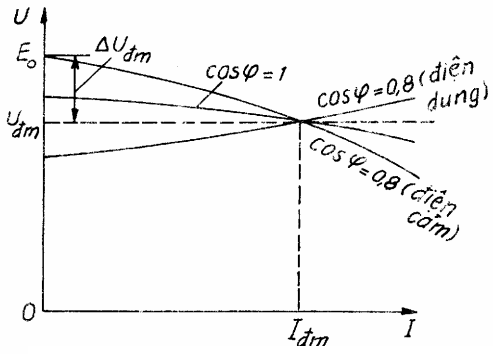
Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

3. Đặc tính ngoài và độ thay đổi điện áp $\Delta U_{đm}$

Đặc tính ngoài: $U = f(I)$ khi $I_t = Cte; \cos\varphi = Cte\ ; f = f_{đm}$

Các đường đặc tính ngoài phụ thuộc vào tính chất tải như hình 4.6

Dòng điện kích từ I_t ứng với $U = U_{đm}$, $I = I_{đm}$, $\cos\varphi = \cos\varphi_{đm}$ và $f = f_{đm}$ được gọi là dòng điện kích từ định mức $I_{tđm}$



Hình 4.6 Đặc tính ngoài của máy phát điện đồng bộ

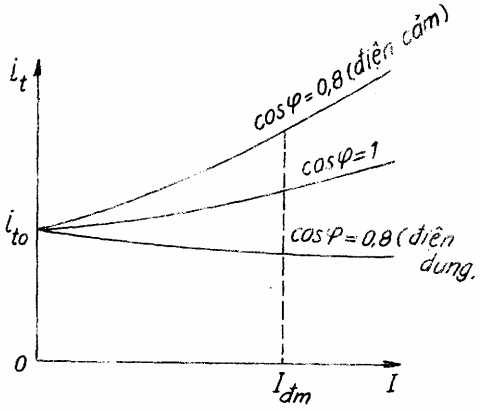
Độ thay đổi điện áp $\Delta U_{đm}$

$$\Delta U_{đm}\% = \frac{E_0 - U_{đm}}{U_{đm}} 100 \qquad 4.5$$

Máy phát tourbin hơi có x_d lớn hơn máy phát tourbin nước nên $\Delta U_{đm}\%$ của nó lớn hơn máy phát tourbin nước. Thường $\Delta U_{đm}\% = (25 - 35)\%$

4. Đặc tính điều chỉnh $I_t = F(I)$ khi $U = U_{đm} = Cte$, $\cos\varphi = Cte$ và $f = f_{đm}$.

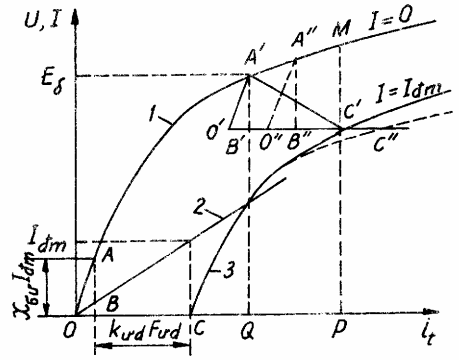
Thường $\cos\varphi_{đm} = 0,8$ (điện cảm), khi I tăng từ 0 đến $I_{đm}$ với $U = U_{đm}$ thì dòng điện kích từ thay đổi $1,7 - 2,2$ lần



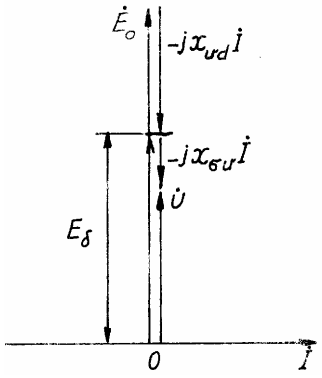
Hình 4.7 Đặc tính điều chỉnh

5. Đặc tính tải $U = f(I_t)$ khi $I = Cte$, $\cos\varphi = Cte$; $f = f_{đm}$

Theo quan hệ trên, với các giá trị khác nhau của I và $\cos\varphi$ ta sẽ có các đường đặc tính tải khác nhau. Trong đó đặc biệt nhất là đường đặc tính tải thuần cảm, khi $\cos\varphi = 0$, $(\varphi = 90^0)$ và $I = I_{đm}$ (đường 3 trên hình 4.8)



Hình 4.8 Đặc tính tải thuần cảm



Hình 4.9 Đồ thị s.đ.đ máy đồng bộ tải thuần cảm

Bỏ qua r_u ta vẽ được đồ thị véc tơ như hình 4.9

Tài liệu chỉ xem được một số trang đầu. Vui lòng download file gốc để xem toàn bộ các trang

Tam giác điện kháng:

Lấy $I_n = I_{đm}$ chiếu qua đặc tính ngắn mạch (2), chiếu xuống trục hoành được điểm C. Thì $OC = I_{tn}$ (dòng điện kích từ), dòng điện I_m gồm 2 phần:

Một phần $BC = k_{ưd}.F_{ưd}$ khắc phục phản ứng phần ứng, vậy $BC \sim I_{đm}$

Một phần $CB = OC - BC$ sinh ra $E_{\sigma ư} = I_{đm}.x_{\sigma ư} = AB$

Như vậy tam giác ABC có 2 cạnh AB và BC tỷ lệ với $I_{đm}$.

Xây dựng đặc tính tải thuần cảm từ đặc tính không tải và tam giác điện kháng. Tịnh tiến ΔABC (hoặc ΔAOC) sao cho đỉnh A năm trên đường (1) thì đỉnh C sẽ vẽ nên đường (3) với $\Delta A'B'C'$

Khi có xét đến bảo hoà đường (3) là đường đứt nét với $\Delta A''B''C''$ (hoặc $O''A''C''$).

4.3 Cách xác định các tham số của máy phát điện đồng bộ

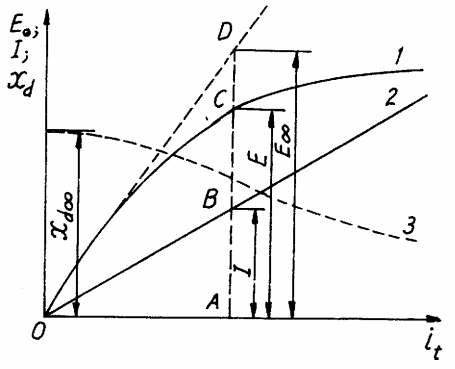
1. x_d và x_q

$$x_d = \frac{E}{I_n} = \frac{AC}{AB} \qquad 4.6$$

Quan hệ $x_d = f(I_t)$ là đường (3) khi mạch từ không bảo hoà, ta có:

$$x_{d\infty} = \frac{E_\infty}{I_n} = \frac{AD}{AB} = const \qquad 4.7$$

vì $\frac{E_\infty}{E} = k_{\mu d}$ nên $x_d = \frac{x_{d\infty}}{k_{\mu d}}$ 4.8



Hình 4.10 Xác định điện kháng đồng bộ dọc trục

Máy cực lồi thường $x_q = 0,6.x_d$;

Máy cực ẩn $x_d = x_q = x_{đb}$

2. Điện kháng tản $x_{\sigma ư}$.

Từ một điểm C' bất kỳ trên đường (3), dựng đoạn $C'O' // = OC$, từ O' vẽ đường // với OA cắt đường (1) tại A', từ A' hạ $A'B' \perp C'O'$ thì $x_{\sigma ư} = A'B'/I$

Khi xét đến bảo hoà $x_p = A''B''/I$ $x_p > x_{\sigma ư}$ là điện kháng Pôchiê

Máy cực ẩn $x_p = (1,05 - 1,1)\, x_{\sigma ư}$

Máy cực lồi $x_p = (1,1 - 1,3)\, x_{\sigma ư}$

4.5 Tổn hao và hiệu suất

Tổn hao đồng: trên điện trở dây quấn phần ứng $p_{cu} = I^2.r_ư$

Tổn hao thép: do dòng điện xoáy và từ trễ

Tổn hao kích từ: trên r_t và tiếp xúc chổi than

Tổn hao phụ: do từ trường tản và sự đập mạch của từ trường bậc cao

Tổn hao cơ: ma sát ổ bị, ổ đỡ, làm mát...

Hiệu suất của máy $\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} =$ thường $\eta = 0,98\ \%$