

CAPÍTULO 2

MÁQUINAS SÍNCRONAS

1. Descrição das Máquinas Síncronas

Descrição sumária

Os alternadores e motores síncronos são constituídos pelo rotor e pelo estator (fig. 2.1). No rotor está montado o enrolamento indutor que é percorrido por corrente contínua e tem como função a criação de um campo magnético intenso. No estator estão montados os enrolamentos induzidos nos quais se efectua a conversão electromecânica de energia.

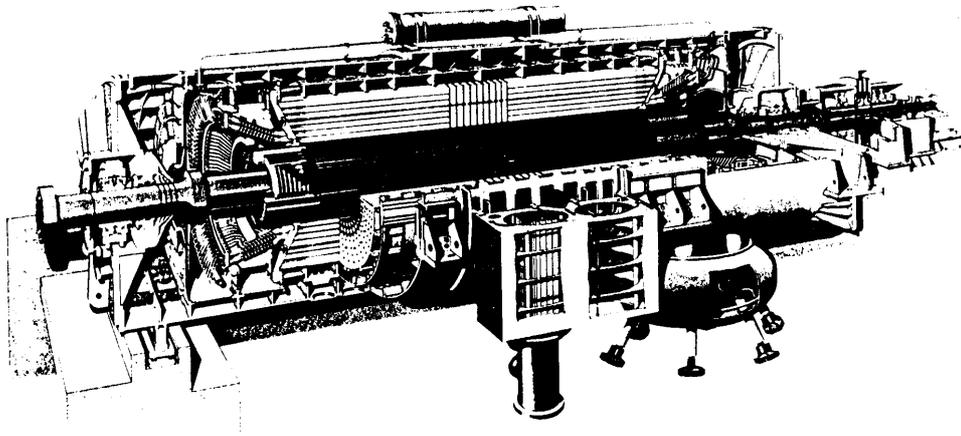


Fig 2.1 Vista de um turbogerador.

As correntes e tensões, em regime permanente, são alternadas no estator e contínuas no rotor.

A ligação eléctrica entre a parte móvel, o rotor, e o exterior pode fazer-se através de vários processos como se verá, sendo um dos mais vulgares, a utilização de anéis contínuos e escovas fixas.

O estator é constituído basicamente por uma "carcaça" com funções essencialmente mecânicas. Esta carcaça suporta um núcleo de material ferromagnético sob o qual, em cavas, se encontram distribuídos os enrolamentos do induzido.

O rotor pode ser de dois tipos consoante a existência ou não de saliência. O rotor de pólos salientes (fig. 2.2a) é constituído por um número mais ou menos elevado de pólos sob os quais se encontra instalado o enrolamento indutor. Este enrolamento é normalmente do tipo concentrado. O rotor de pólos lisos contém um enrolamento indutor distribuído em cavas e realiza-se com um número reduzido de pólos. Este enrolamento indutor é designado também por enrolamento de campo ou por enrolamento de excitação.

Descrição detalhada das máquinas síncronas

1. Carcaça

A carcaça tem essencialmente uma função de suporte mecânico do estator. Normalmente não é atravessada por um fluxo magnético apreciável.

2. Núcleo do induzido

Tem por função permitir uma indução magnética intensa. Como é atravessado por um campo magnético variável no tempo, tem que ser constituído por um material com pequenas perdas no ferro, ou seja com pequena área do ciclo de histerese e com resistividade eléctrica elevada.

3. Enrolamento do induzido

Os enrolamentos do induzido são constituídos por condutores, em geral de cobre, isolados e colocados em cavas.

Estes enrolamentos são do mesmo tipo dos enrolamentos do estator das máquinas assíncronas. São normalmente distribuídos ao longo da periferia podendo o número de cavas por pólo e fase atingir um número elevado.

Nas máquinas trifásicas, os três enrolamentos estão desfasados de um terço de período uns em relação aos outros.

4. Rotor

Os rotores são normalmente de dois tipos: rotores de pólos salientes e rotores de pólos lisos ou bobinados. Nas máquinas de pequena potência usam-se também rotores constituídos por ímanes permanentes.

Nos rotores de pólos salientes há um núcleo central montado no veio, ao qual se ligam pólos onde são enrolados os enrolamentos do indutor. Esta solução é utilizada normalmente em máquinas de elevado número de pólos (baixa velocidade de rotação) sendo relativamente reduzida a força centrífuga a que os pólos estão sujeitos.

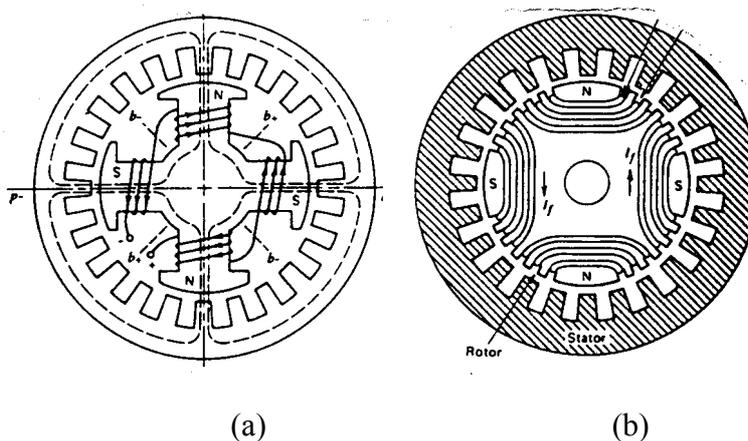


Fig. 2.2 Máquinas de pólos salientes e pólos lisos

Nas máquinas de pólos lisos os condutores estão montados em cavas e distribuídos ao longo da periferia. O número de pólos é reduzido (velocidade elevada) sendo o diâmetro destas máquinas relativamente pequeno ($D < 1,10\text{m}$).

Apesar de, normalmente, esta máquina ter um comprimento bastante grande (5 a 6 m) o seu momento de inercia é muito menor do que o de uma máquina de pólos salientes equivalente que é mais curta mas tem um diâmetro muito maior.

Ao contrário das máquinas assíncronas, neste caso, como em regime permanente o campo no rotor é constante, não há necessidade das

precauções usuais no que respeita às perdas por correntes de Foucault. Assim o rotor não tem que ser necessariamente constituído por chapas empilhadas, podendo ser de aço maciço.

Por vezes há vantagem que o material do rotor tenha pequena resistividade eléctrica. Assim, qualquer variação do fluxo através do rotor origina correntes no núcleo relativamente intensas que têm como efeito atenuar as variações de fluxo através do rotor. Com o mesmo fim montam-se, por vezes, no rotor, condutores de cobre ou bronze, paralelos ao eixo e que são ligados uns aos outros através de barras ou anéis tal como as gaiolas das máquinas de indução. Estes condutores constituem os enrolamentos amortecedores. Em regime permanente, as f.e.m. induzidas nestes enrolamentos são nulas e por consequência são nulas as correntes neles induzidas. Assim, os enrolamentos amortecedores funcionarão apenas em regimes desequilibrados ou em regimes transitórios.

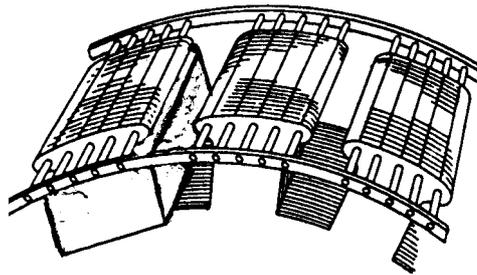


Fig. 2.3 Enrolamentos amortecedores e pólos indutores

5. Anéis e escovas e Sistema "Brushless"

Os anéis e escovas constituem o processo mais vulgar de fazer a ligação eléctrica com o rotor. Uma fonte de tensão contínua exterior é ligada ao enrolamento de excitação através dos anéis e escovas. A regulação da corrente de excitação pode ser feita variando o valor da tensão de alimentação ou através de resistências exteriores.

Por vezes, em vez de uma fonte de tensão contínua exterior ligada directamente ao enrolamento de excitação, usam-se enrolamentos auxiliares que se deslocam num campo magnético. O movimento relativo destes enrolamentos em relação ao campo provoca uma f.e.m. induzida alternada.

Por meio de rectificadores esta tensão alternada é transformada numa tensão contínua e aplicada directamente ao enrolamento de excitação. Estes rectificadores estão colocados no rotor. Com este dispositivo, normalmente designado por "Sistema Brushless", consegue-se impor uma corrente de excitação no rotor controlável sem a utilização de anéis e escovas ou seja sem ligação galvânica do rotor ao exterior.

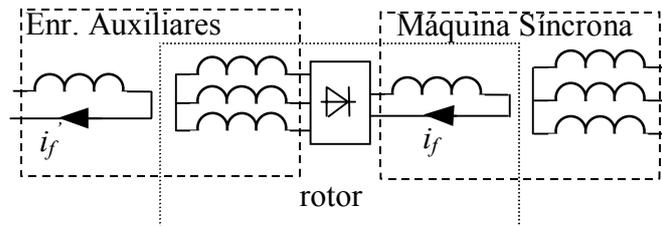


Fig. 2.4 Sistema de excitação sem anéis e escovas. Sistema "Brushless"

6. Máquinas Síncronas com ímanes permanentes no rotor.

Em máquinas de pequena potência é possível substituir os enrolamentos de excitação por ímanes permanentes. Perde-se assim um grau de liberdade (a possibilidade de controlar a corrente de campo) mas ganha-se em compacticidade e simplicidade. Tornam-se desnecessários os sistemas de excitação que encarecem bastante estas máquinas.

Este tipo de máquinas encontra-se hoje em fase de grande desenvolvimento devido aos contínuos melhoramentos que se têm verificado nos ímanes permanentes.

Apesar destas máquinas poderem funcionar como motores e como geradores, é como motores que têm tido maior aplicação. O número de aplicações tem crescido muito rapidamente sendo hoje uma máquina que se está a impor nos sistemas de automatismos industriais e robótica.

7. As máquinas com enrolamentos de excitação supercondutores

Os geradores supercondutores encontram-se numa fase de estudo e desenvolvimento. Alguns autores consideram-nos como os geradores do futuro. Comparados com os geradores tradicionais, estas máquinas permitem:

- 1) Uma redução de cerca de 50% no tamanho e peso
- 2) Cerca de 0.5% de melhoria no rendimento
- 3) Melhorias muito significativas na estabilidade

Infelizmente os geradores supercondutores, também designados por máquinas criogénicas, têm estruturas complexas e requerem materiais diferentes dos usados nas máquinas tradicionais.

As diferenças mais marcantes face às máquinas tradicionais consistem no uso de um rotor com um enrolamento de campo supercondutor e do uso de um entreferro bastante mais elevado. Usam-se rotores de corpo não magnético devido aos campos de indução extremamente elevados que são largamente superiores ao campo de indução correspondente à saturação do ferro (são usados campos de indução magnética da ordem de 5 a 6 T).

As bobinas de excitação tem de ser convenientemente protegidas das vibrações mecânicas e de variações de campo. Para isso utilizam-se blindagens que são normalmente duplas. Os enrolamentos são arrefecidos através de Hélio líquido que é introduzido continuamente no rotor através de um equipamento especial.

2. Modelo da Máquina Síncrona

O esquema equivalente da máquina síncrona pode tomar as formas indicadas na figura 2.5.

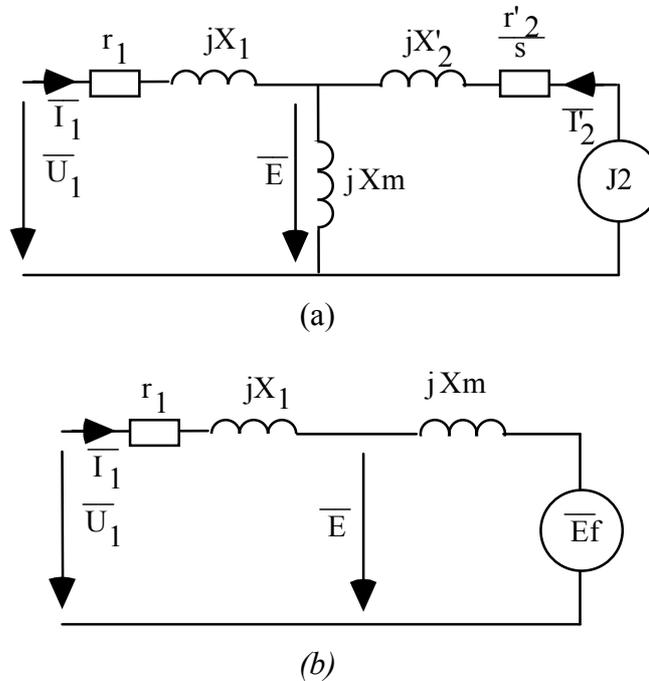


Fig. 2.5. Esquemas equivalentes da máquina síncrona

Apesar de ambos os modelos serem equivalentes, o esquema equivalente da figura 2.5b é o mais utilizado.

Como a máquina síncrona funciona como gerador nas suas aplicações mais importantes vamos, neste capítulo, adotar a convenção gerador. A diferença entre a convenção motor e a convenção gerador encontra-se ilustrada na figura 2.6. Nos esquemas equivalentes representados nestas figuras estão representadas as resistências dos enrolamentos do estator. Como se verá mais à frente, o desprezo destas resistências é válido em máquinas de média e de grande potência quando se pretender calcular os valores das correntes. Para a determinação do rendimento é sempre necessário entrar com as respectivas perdas.

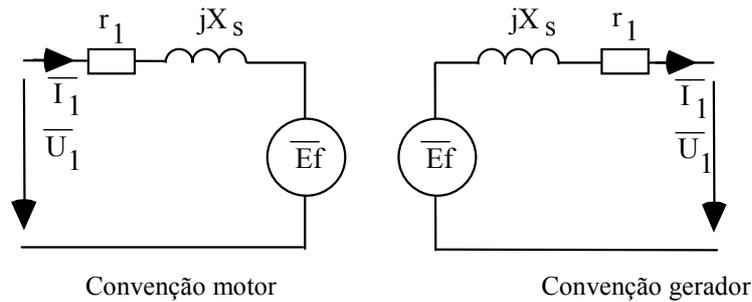


Fig. 2.6 Convenções utilizadas no estudo das máquinas síncronas.

Sendo

$$X_s = X_m + x_l \tag{2.1}$$

Em convenção motor, tem-se:

$$\bar{U} = (r_l + jX_s) \bar{I} + \bar{E}_f \tag{2.2}$$

Em convenção gerador, tem-se:

$$\bar{E}_f = (r_l + jX_s) \bar{I} + \bar{U} \tag{2.3}$$

Em funcionamento gerador, à equação vectorial 2.3 corresponde o diagrama vectorial da figura 2.7. Neste diagrama estão representados os vectores espaço tempo correspondentes às forças magnetomotrizes referentes ao induzido, ao indutor e a força magnetomotriz total.

O vector espaço-tempo correspondente à força magnetomotriz provocada pelo indutor \bar{F}_{mf} está colocado em quadratura e avanço face ao vector tempo \bar{E}_f correspondente à força electromotriz provocada pelo mesmo enrolamento. A mesma relação (quadratura e avanço) existe entre os vectores \bar{F}_m e \bar{E} correspondentes à força magnetomotriz total e à força electromotriz correspondente ao campo de indução magnética total. Esta força electromotriz é designada por *força electromotriz de entreferro* ou por *força electromotriz em carga*.

O vector espaço-tempo correspondente à força magnetomotriz provocada pela corrente do induzido encontra-se em fase com o vector tempo correspondente à mesma corrente.

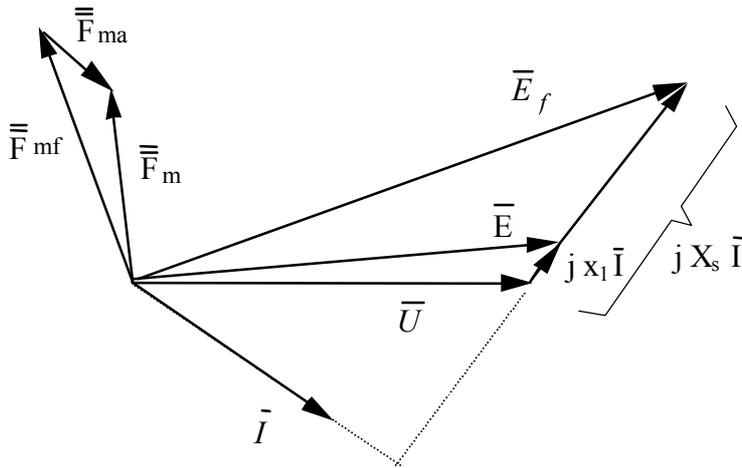


Fig. 2.7 Diagrama vectorial da máquina síncrona em regime não saturado.

A colocação destes vectores está relacionada com as seguintes convenções:

1. A localização da fase correspondente ao diagrama vectorial em jogo é tal que o ângulo Δ do enrolamento é nulo.
2. Para a obtenção das forças electromotrizes utilizou-se o sentido de circulação oposto ao do capítulo 5.
3. A convenção para a força magnetomotriz é tal que se consideram positivos os pólos norte.

TABELA

	$\frac{rI}{U}$	$\frac{X_s I}{U}$	$\frac{x_1 I}{U}$
Alternadores Hidráulicos	.5%	70 a 180%	20%
Turbo Alternadores	2%	200 a 250%	25%

E_f é a força electromotriz em vazio. A força electromotriz E está relacionada com o fluxo total no entreferro. As quedas de tensão rI , $X_s I$ e $x_1 I$ têm os valores típicos apresentados na tabela.

3. Máquina síncrona isolada da rede.

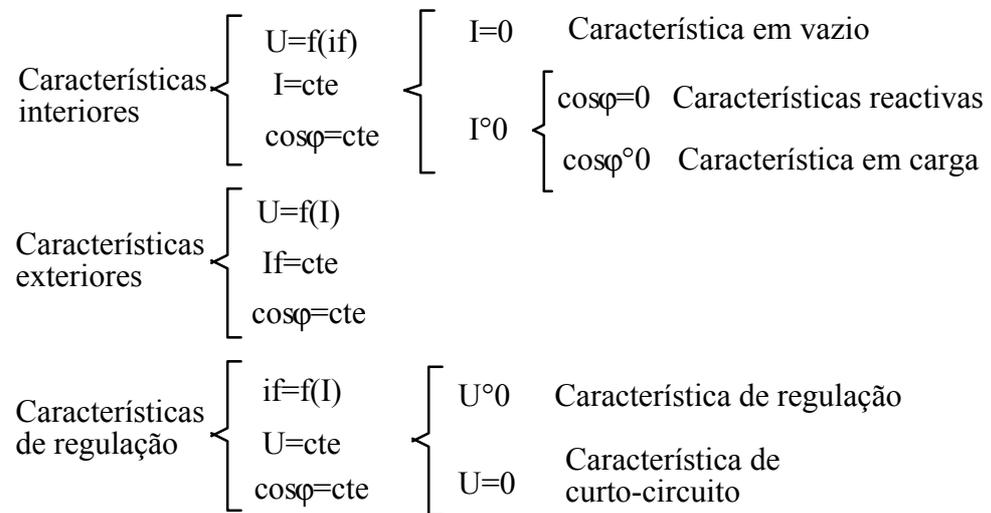
Introdução

As grandezas que caracterizam o funcionamento dos alternadores são: a f.e.m. E_f , a tensão aos terminais U , a intensidade de corrente de excitação i_f , a intensidade de corrente no induzido I e o número de rotações ou a frequência. Normalmente, os alternadores são utilizados em velocidade constante para se obter uma frequência constante. Assim interessa especialmente as cinco grandezas:

$$E_f, U, i_f, I, \cos \varphi$$

em que o $\cos \varphi$ é o factor de potência da carga. Destas 5 grandezas só 4 são independentes, pois E_f , U e I estão relacionadas pela queda de tensão interna do alternador provocada pela passagem da corrente no enrolamento do estator.

Normalmente, estudam-se as seguintes características:



Nas características reactivas $\cos\varphi=0$, ao que corresponde $\varphi=\pm \pi/2$. Tem maior interesse o caso em que a corrente está atrasada de 90° sobre a tensão, isto é, o caso indutivo. O mesmo sucede nas curvas de regulação e nas características exteriores.

Nas características em vazio, nas características reactivas e nas características em curto-circuito a potência fornecida pelo alternador é nula, porque é expressa por:

$$P = 3 UI \cos \varphi \quad (2.4)$$

Nestes ensaios são nulas as grandezas I , $\cos \varphi$ ou U respectivamente.

Nesta secção estudar-se-à apenas as características da máquina síncrona funcionando como gerador (alternador) - Uma máquina eléctrica não pode funcionar como motor sem receber energia eléctrica (da rede ou de um outro gerador). Considerar-se-ão apenas grandezas eléctricas sem fazer qualquer referência à máquina de accionamento (turbina, motor etc). Supor-se-à que esta mantém a velocidade sempre constante, qualquer que seja o regime de funcionamento.

Admitir-se-à que se está em regime permanente e que a carga é simétrica e equilibrada.

O estudo que se fará é válido para a máquina de pólos lisos, mas poderá ser estendido à máquina de pólos salientes.

Características interiores

Características em vazio

Nesta situação ($I=0$) e portanto tem-se

$$E_f = U \quad (2.5)$$

e a característica em vazio será definida por

$$E_f = E(i_f) \quad (2.6)$$

Esta característica está directamente relacionada com a característica magnética. A força electromotriz E_f é proporcional ao fluxo e portanto a característica em vazio traduz, numa outra escala, a característica magnética. Devido à histerese do material que constitui o circuito magnético da máquina, não existe uma correspondência biunívoca entre i_f e ϕ ou E_f .

Assim, se se fizer variar a corrente de excitação entre zero e i_m no sentido sempre crescente e depois de i_m a zero no sentido sempre decrescente, sendo i_m um valor elevado da excitação, obtém-se as curvas de magnetização representadas na figura 2.8.

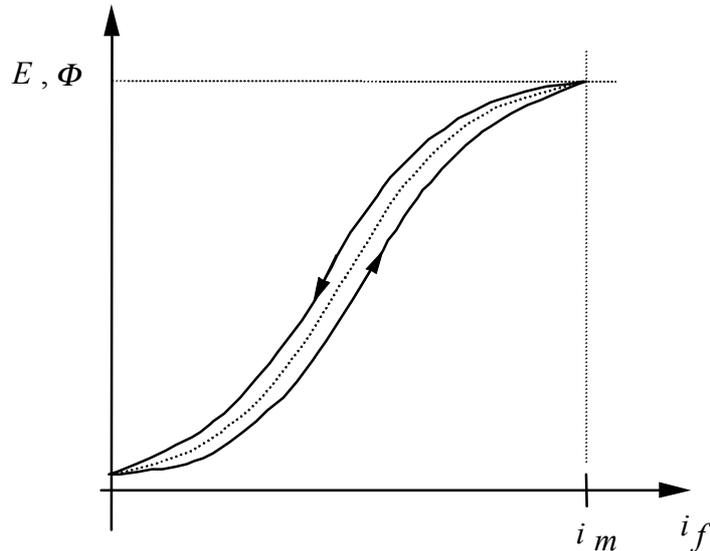


Fig. 2.8 Característica em vazio

Na realidade, as curvas limite das características em vazio estão próximas uma da outra. Assim usualmente, considera-se uma única curva para a característica em vazio. Será naturalmente a curva média, que passa pela origem como se indica na figura 2.8.

Características reactivas

As impedâncias a colocar no estator são agora reactâncias ou capacidades puras ($\cos \varphi = 0$).

Lançado o alternador à velocidade síncrona, varia-se i_f e, para cada um dos seus valores, regula-se a impedância da carga de modo a manter-se I constante.

O traçado das características reactivas é mais difícil do que o da característica em vazio, pois obriga a dispor de bobinas ou condensadores puros, que suportem a intensidade nominal do alternador. É para esse valor da intensidade I que a característica tem, em geral, maior interesse.

Como se verá adiante, em geral, basta conhecer um ponto da característica para se poder completar indirectamente o traçado da curva com o rigor suficiente. Além disso não é necessário ser rigorosamente $\cos\phi = 0$.

Os esquemas equivalentes por fase, para esta situação, tomam as formas representadas na figura 2.9.

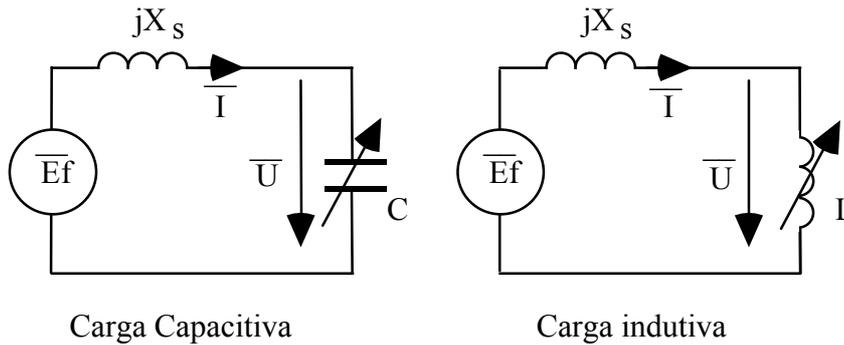


Fig 2.9 Esquemas equivalentes

a que corresponderão respectivamente os diagramas vectoriais da figura 2.10.

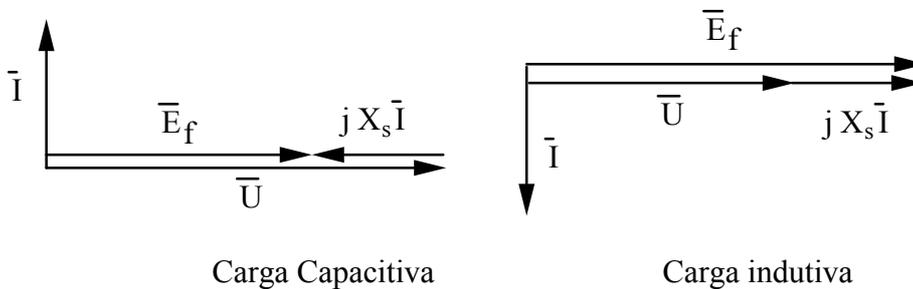


Fig 2.10 Diagramas vectoriais

Da figura 2.10 pode-se concluir:

Com carga capacitiva, tem-se:

$$U = E_f + X_s I \quad (2.7)$$

Com carga indutiva, tem-se:

$$U = E_f - X_s I \quad (2.8)$$

Estas equações permitem concluir que as características reactivas podem ser obtidas da característica em vazio fazendo uma translação no

sentido vertical de $X_s I$. Esta translação terá o sentido positivo ou negativo consoante a carga for capacitiva ou indutiva. Como o valor da corrente I é constante ao longo do ensaio, a translação também deveria ser constante se X_s se mantivesse constante.

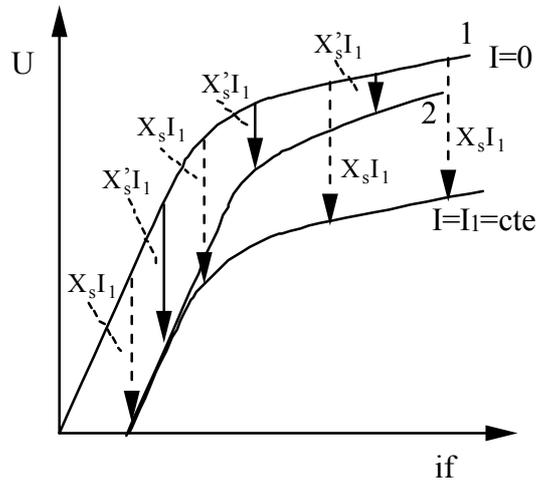


Fig. 2.11

A reactância síncrona X_s só é constante quando o circuito magnético não estiver saturado. No caso em que esta reactância fosse constante obter-se-ia a curva indicada na figura 2.11. As curvas que se obtêm na realidade não são uma mera translação segundo o eixo dos Y da característica em vazio, pois a reactância X_s vai diminuindo à medida que a saturação vai aumentando.

Pode demonstrar-se que de facto há uma translação da característica em vazio, mas essa translação não é segundo a direcção definida pelo eixo dos Y mas segundo uma outra direcção - a direcção PR definida na figura 2.12. Este assunto será visto mais à frente com maior pormenor.

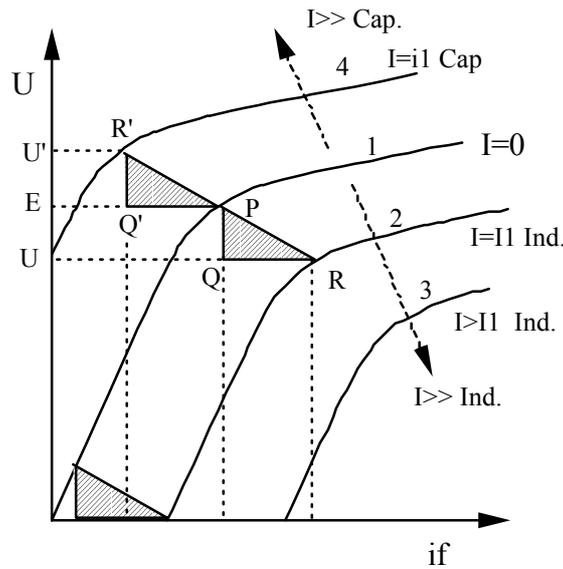


Fig. 2.12

As características em carga.

Estas características diferem das características reactivas no que respeita à potência posta em jogo que agora é diferente de zero. Os valores do factor de potência da carga poderão ser variáveis, mas normalmente estas características são traçadas com factor de potência constante.

Na figura 2.13 as curvas 2, 4 e 5 mostram o andamento que normalmente têm as características em carga. Desenham-se também, para servirem de referência, as características em vazio (curva 3) e as características reactivas (curvas 1 e 6) para a mesma intensidade de corrente que caracteriza as características interiores.

Deve-se notar que o afastamento entre as características em carga é mais acentuado para $\cos\phi$ elevados do que para $\cos\phi$ baixos. A curva correspondente a $\cos\phi=0.5$ encontra-se muito mais afastada da do factor de potência unitário do que da que corresponde ao factor de potência nulo. Daqui resulta que as características em carga, para determinado valor de I , quase se confundem para $\cos\phi=0.2, 0.1$ ou 0 . Assim, para traçar as características reactivas não é necessário exigir bobinas perfeitas, isto é, ser $\phi=\pm\pi/2$.

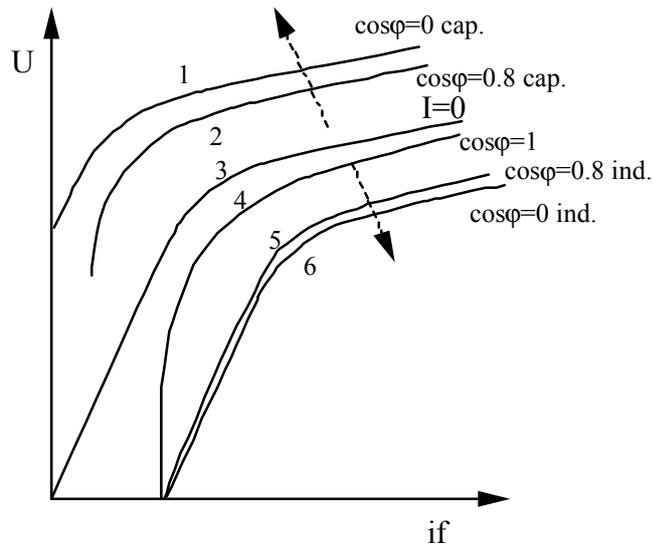


Fig 2.13. Características interiores.

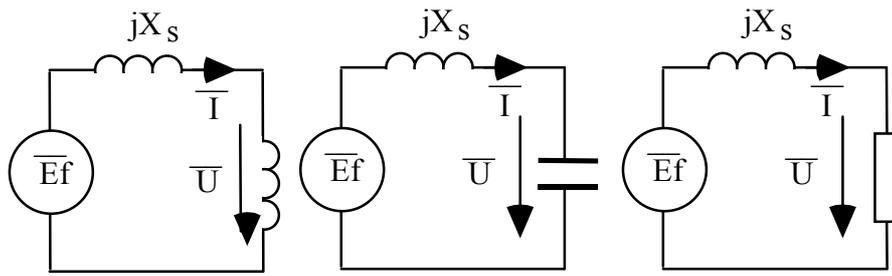
Todas as características em carga, para o mesmo valor de I cortam o eixo das abcissas no mesmo ponto. Este ponto corresponde ao funcionamento em curto-circuito.

As características exteriores

Nas características exteriores determina-se a variação da tensão aos terminais com a corrente do induzido quando a corrente de excitação se mantém constante. Considerando o circuito magnético linear, como a força electromotriz E_f é proporcional à corrente de excitação, pode-se afirmar que estas características são determinadas com uma força electromotriz E_f praticamente constante.

Analise-se os casos em que a carga é indutiva pura, capacitiva pura e ôhmica pura. Para simplificar o estudo considere-se as resistências dos enrolamentos do induzido nulas.

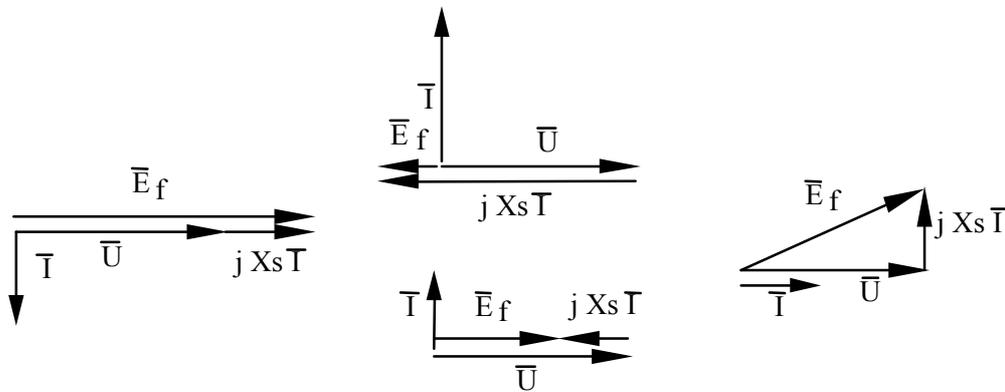
Os esquemas equivalentes para os 3 casos considerados estão representados na figura 2.14.



a) Carga indutiva pura b) Carga capacitiva pura c) Carga resistiva pura.

Fig. 2.14. Esquemas Equivalentes

Aos esquemas equivalentes da figura 2.14 correspondem os diagramas vectoriais da figura 2.15.



a) Carga indutiva pura b) Carga capacitiva pura c) Carga resistiva pura.

Fig. 2.15 Diagramas vectoriais

A equação vectorial $\vec{E}_f = jX_s \vec{I} + \vec{U}$, válida para os 3 casos, toma as formas algébricas:

Carga indutiva
$$U = E_f - X_s I \tag{2.9}$$

Carga capacitiva
$$U = E_f + X_s I \quad \text{ou} \quad U = X_s I - E_f \tag{2.10}$$

Carga resistiva
$$U^2 = E_f^2 - (X_s I)^2 \tag{2.11}$$

Como $E_f = cte$ ($i_f = cte$), às equações 2.9, 2.10 e 2.11 correspondem as características exteriores representadas na figura 2.16.

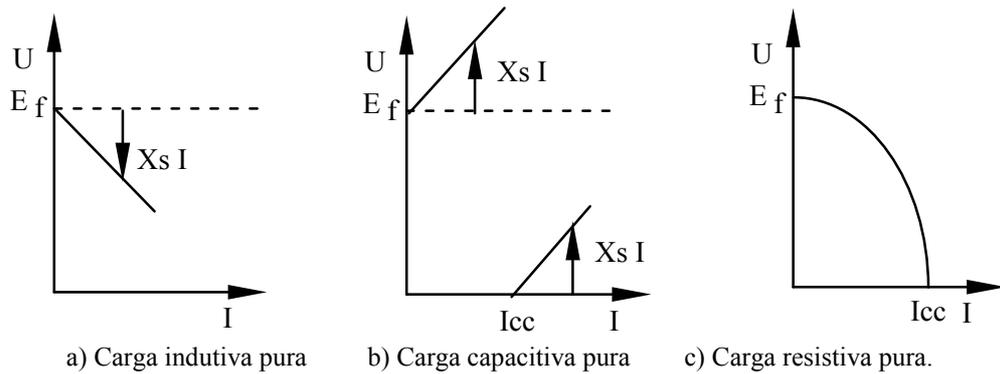


Fig. 2.16 Características exteriores

Para uma carga com factor de potência qualquer, obter-se-iam as características representadas na figura 2.17.

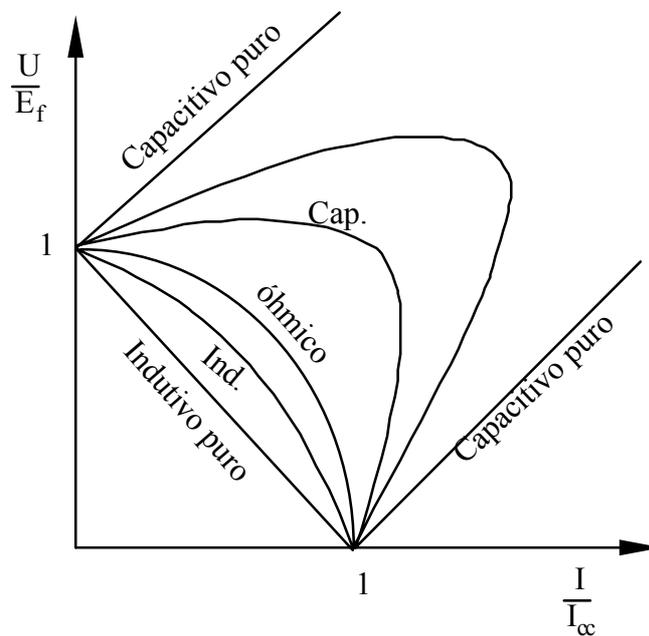
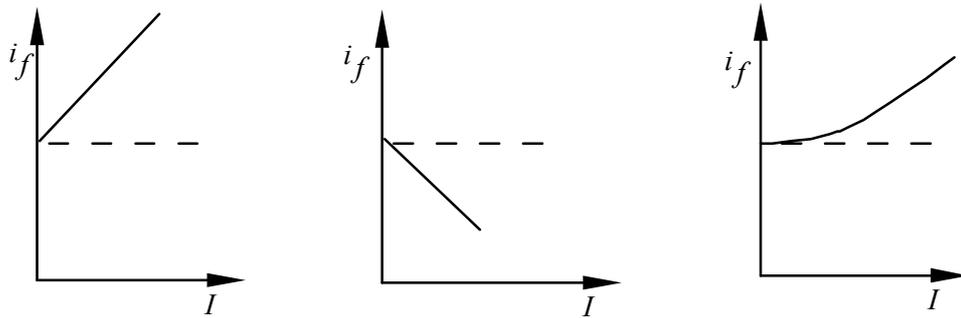


Fig. 2.17 Características exteriores, (elipses)

As características de Regulação

As características de regulação determinam a corrente de excitação em função da corrente do induzido de modo a manter a tensão aos terminais constante. Estas curvas podem ser explicadas recorrendo aos raciocínios que se seguiram no caso das características exteriores. Os esquemas equivalentes da figura 2.14 bem como os diagramas vectoriais da figura 2.15 e as equações algébricas 2.9, 2.10 e 2.11 são válidos também para a determinação das características de regulação. A determinação destas

últimas características faz-se agora $U = \text{cte}$ e não $E_f = \text{cte}$. Obtêm-se as características da figura 2.18.



a) Carga indutiva pura b) Carga capacitiva pura c) Carga resistiva pura.

Fig. 2.18 Características de regulação

Estas curvas são traçadas, normalmente, sob tensão nominal. Para uma carga com um factor de potência qualquer obtêm-se as curvas representadas na figura 2.19.

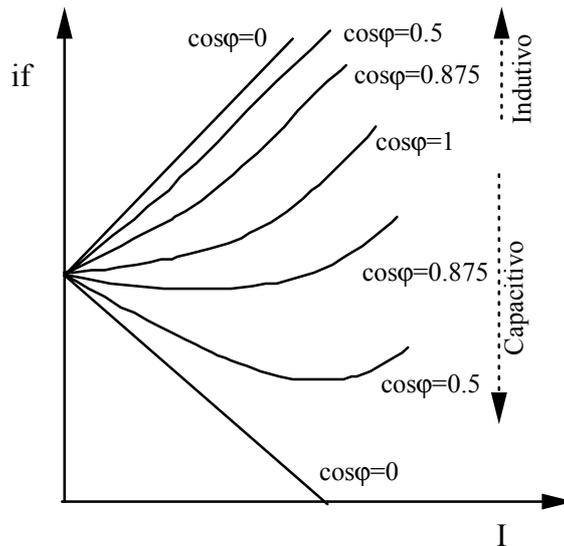


Fig. 2.19 Características de regulação em função do factor de potência

Comentários

1. Para manter a tensão constante, sendo as cargas indutivas ou capacitivas é necessário uma gama de variação de corrente de excitação i_f muito grande.

2. O factor de potência de carga tem uma importância grande. Assim, para uma carga indutiva ou resistiva é necessário aumentar a corrente de

excitação quando se aumentar a carga. Para uma carga capacitiva deve-se diminuir a corrente de excitação quando se aumentar a carga.

Características de curto-circuito

A característica de curto circuito pode ser considerada um caso particular das características de regulação quando $U=0$. Contudo, no seu traçado é realizado com inversão de eixos. Assim em vez de $i_f = f(i_{cc})$ faz-se $i_{cc} = f(i_f)$.

A corrente que percorre o enrolamento é praticamente indutiva pois pode desprezar-se a resistência do enrolamento r_l em face da sua reactância X_s . Assim, do esquema equivalente pode tirar-se:

$$E_f = X_s I_{cc} \quad (2.12)$$

Em regime de curto-circuito correspondem campos magnéticos de fraca intensidade. A máquina funciona na sua zona linear e por consequência a reactância síncrona X_s é constante. Como X_s é constante e E_f é proporcional à corrente de excitação i_f , tem-se que I_{cc} e i_f são proporcionais e a característica de curto-circuito é uma recta.

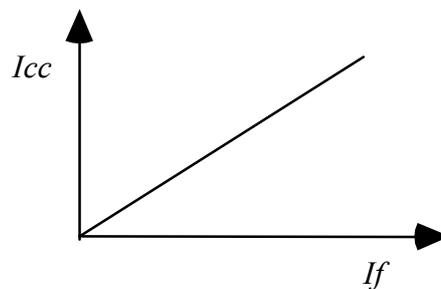


Fig. 2.20 Característica de curto-circuito.

A intensidade de curto-circuito é praticamente independente da velocidade do alternador. De facto, ao variar-se a velocidade varia-se simultaneamente a f.e.m. E_f e a reactância síncrona X_s . A figura 2.21 traduz a variação de I_{cc} com o número de rotação do rotor ou a frequência do alternador. Só para velocidades (frequências) muito pequenas é que a resistência toma um valor comparável com o da reactância X_s e I_{cc} deixa de

ser constante e tende para zero com a velocidade, pois E_f tende igualmente para zero com N e a impedância síncrona Z_s tende para r_l .

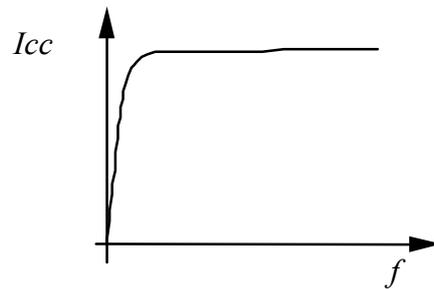


Fig. 2.21 Corrente de curto-circuito em função da frequência

Deve-se notar que, com exceção das máquinas criogénicas, as correntes de curto-circuito em **regime permanente**, para valores da corrente de excitação próximos dos valores nominais, são da ordem de grandeza das correntes nominais das máquinas a que se referem. Isto resulta da reactância síncrona tomar valores elevados pois depende essencialmente da indutância própria dos enrolamentos do induzido.

Determinação da reactância síncrona

A impedância síncrona pode ser determinada por

$$Z_s = \frac{E_f}{I_{cc}} \quad (2.13)$$

A partir da característica em vazio e da característica de curto-circuito traçadas no mesmo gráfico, como se representa na figura 2.22, traça-se a curva $Z_s = E_f / I_{cc}$

Em regime não saturado, a reactância síncrona é constante e pode definir-se uma impedância síncrona não saturada. Já o mesmo não se pode dizer da impedância síncrona em regime saturado pois a saturação praticamente só influi na característica de vazio e não interfere na característica de curto-circuito.

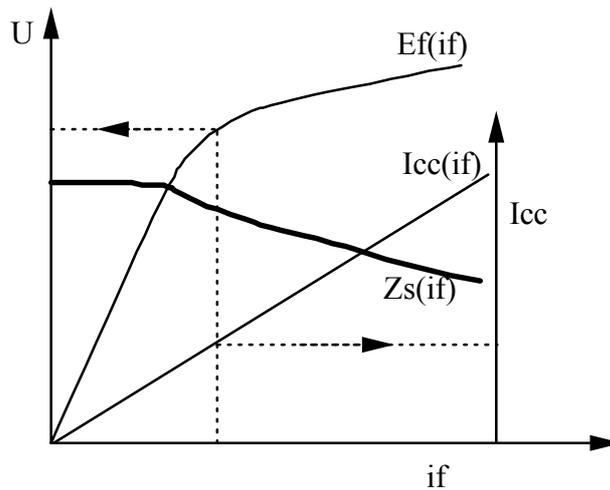


Fig. 2.22. Determinação da impedância síncrona

Convém notar que as duas grandezas E_f e I que figuram nestas duas curvas são valores não coerentes por não corresponderem a estados de saturação magnética equivalentes. De facto, a f.e.m. é determinada com o circuito magnético saturado e I_{cc} é determinado sob um circuito magnético não saturado. Assim, na zona saturada, o seu coeficiente tem um significado muito discutível.

Valores por unidade

É preferível, nos estudos de sistemas relacionados com redes de energia eléctrica, exprimir impedâncias, correntes, tensões e potências em valores *por unidade* em vez de em ohm, ampère, kilovolt, megawatt ou megavar. Pode-se ganhar algumas vantagens com esta prática:

1. A representação em valores por unidade tem mais significado pois relaciona as grandezas com os valores nominais do sistema em estudo.
2. Há menos hipóteses de confusões entre tensões simples e compostas, potências por fase e totais, e no caso de transformadores, entre as grandezas do primário do secundário.

Para um sistema trifásico, estando definidos dois valores de base S_b e U_b tem-se:

$$S_b = \sqrt{3} U_b I_b \quad e \quad I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} U_b} \quad (2.14)$$

donde

$$Z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} I_b} = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (2.15)$$

Para o estudo de uma máquina eléctrica, normalmente os valores de base fazem-se coincidir com os valores nominais.

Os valores por unidade são obtidos:

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b} \quad , \quad Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} \quad (2.16a)$$

$$U_{pu} = \frac{U}{U_b} \quad , \quad S_{pu} = \frac{S}{S_b} \quad (2.16b)$$

Relação de curto-circuito

É uma grandeza importante para avaliar o comportamento do alternador. Define-se como:

$$K_{cc} = \frac{i_{fno}}{i_{fncc}} \quad (2.17)$$

em que:

i_{fno} - Corrente de excitação correspondente ao alternador funcionando em vazio com tensão nominal.

i_{fncc} - Corrente de excitação a que corresponde uma corrente de curto-circuito permanente, trifásico e simétrico, igual à corrente nominal do alternador.

Atendendo à equação 2.12 e considerando que E_f é proporcional a i_f , tem-se:

$$K_{cc} = \frac{i_{fno}}{i_{fncc}} = \frac{E_{f0}}{Z_s I_N} = \frac{U_{sN}}{I_N} \frac{I}{Z_s} = \frac{Z_b}{Z_s} = \frac{I}{Z_{pu}} \quad (2.18)$$

O valor da relação de curto-circuito é assim igual ao inverso da impedância síncrona expresso em valores por unidade.

Naturalmente que esta relação de curto-circuito depende do estado de saturação da máquina.

Alternadores com baixo K_{cc} têm:

a) Uma maior variação de tensão nos terminais com a carga, porque sendo elevada a impedância síncrona, a queda de tensão é também elevada. Implicam portanto uma grande variação da corrente de excitação para manter constante a tensão aos terminais.

b) São menos estáveis quando funcionam em paralelo com uma rede, como se verá mais à frente.

c) São mais baratos e correspondem a uma melhor utilização do material activo da máquina.

Um aumento do entreferro corresponde a uma diminuição de X_s e portanto um aumento de K_{cc} . Assim, um aumento do entreferro melhora a estabilidade de funcionamento em paralelo com a rede.

Os valores de K_{cc} dependem muito do tipo de construção e variam de uns construtores para os outros. Genericamente pode dizer-se que os seus valores mais usuais são:

$$0.5 < K_{cc} < 1.5$$

e mais em pormenor:

- Turbogeneradores de rotor cilíndrico $0.5 < K_{cc} < 0.7$

- Alternadores de pólos salientes $1.0 < K_{cc} < 1.4$

Assim, nas máquinas rápidas K_{cc} é normalmente muito menor do que nas máquinas lentas.

Nas máquinas criogénicas, os valores de K_{cc} são da ordem de 2 ou 3.

4. Máquina Síncrona ligada a uma rede de potência infinita

Equações Gerais

Uma rede de potência infinita é caracterizada por uma frequência e tensão constantes. A máquina síncrona quando está ligada a uma rede de potência infinita é caracterizada por ter uma velocidade constante e igual à sua velocidade de sincronismo e por a tensão de alimentação U ser constante e independente da carga.

O esquema equivalente será o representado na figura 2.23.

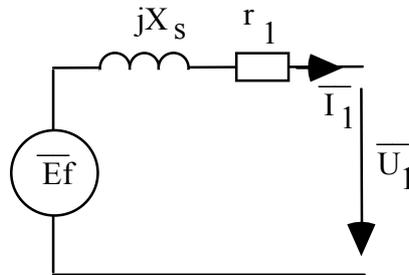


Fig. 2.23

Na convenção gerador, tem-se

$$\bar{E}_f = (r_s + jX_s) \bar{I} + \bar{U} \quad (2.19)$$

Como $X_s \gg r_l$ para o cálculo das correntes é válido desprezar a resistência dos enrolamentos r_l . Contudo esta aproximação não é válida para o cálculo das perdas na máquina ou do rendimento. O esquema equivalente correspondente encontra-se na figura 2.24.

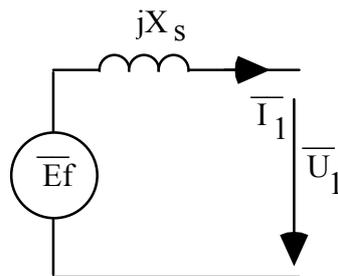


Fig. 2.24

Assim, tem-se aproximadamente

$$\bar{E}_f = jX_s \bar{I} + \bar{U} \quad (2.20)$$

À equação 2.20 corresponde o diagrama vectorial por fase da figura 2.25.

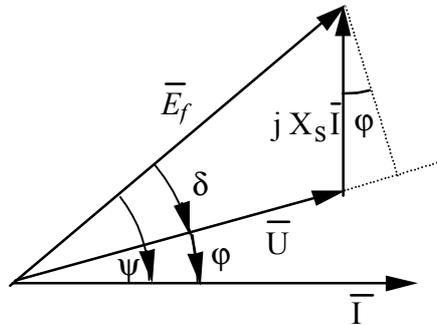


Fig. 2.25

Nesta figura estão definidos os ângulos φ , ψ e δ respectivamente como:

φ - ângulo entre \bar{U} e \bar{I}

ψ - ângulo entre \bar{E}_f e \bar{I} (Ângulo interno de defasagem)

δ - ângulo de potência ou de carga \bar{E}_f e \bar{U}

Tem-se:

$$\psi = \varphi + \delta \quad (2.21)$$

e pode-se escrever

$$P = 3 UI \cos \varphi \quad (2.22)$$

$$Q = 3 UI \sin \varphi \quad (2.23)$$

notando que

$$U \cos \varphi = E_f \cos \psi \quad (2.24)$$

e

$$U \operatorname{sen} \varphi + X_S I = E_f \operatorname{sen} \psi \quad (2.25)$$

Tem-se

$$P = 3 E_f I \cos \psi$$

$$Q = 3 E_f I \operatorname{sen} \psi - 3 X_S I^2 \quad (2.26)$$

Notando também que

$$X_S I \cos \varphi = E_f \operatorname{sen} \delta \quad (2.27)$$

e

$$X_S I \operatorname{sen} \varphi = E_f \cos \delta - U \quad (2.28)$$

Tem-se

$$Q = \frac{3 E_f U}{X_S} \cos \delta - \frac{3 U^2}{X_S} \quad (2.29)$$

Admitindo desprezáveis as perdas na máquina

$$M_{em} = \frac{P}{\omega_{syn}} = \frac{p}{\omega} P \quad (2.30)$$

Assim,

$$P = \frac{E_f U}{X_S} \operatorname{sen} \delta \quad (2.31)$$

$$M_{em} = \frac{3p E_f U}{\omega X_S} \operatorname{sen} \delta \quad (2.32)$$

Estando a máquina a excitação constante, $E_f = \text{cte}$, a potência bem como o binário são funções sinusoidais do ângulo δ , designado por ângulo de potência ou ângulo de carga. Esta variação encontra-se representada na figura 2.26.

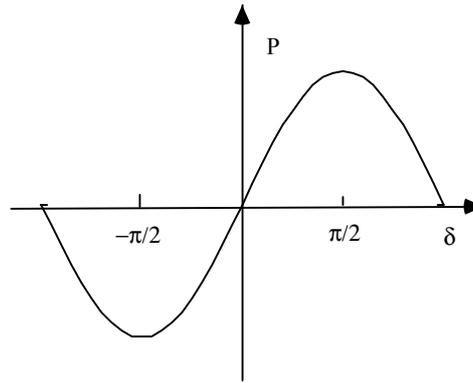


Fig. 2.26

Como se verá mais à frente, para que a máquina tenha um funcionamento estável, deverá ter-se:

$$-\frac{\pi}{2} < \delta < \frac{\pi}{2} \quad (2.33)$$

Além disso pode concluir-se

$$0 < \delta < \frac{\pi}{2} \quad \text{Funcionamento gerador, pois } \text{sen}\delta > 0 \quad P > 0$$

$$-\frac{\pi}{2} < \delta < 0 \quad \text{Funcionamento motor, pois } \text{sen}\delta < 0 \quad P < 0$$

O diagrama vectorial, tendo em conta as resistências da máquina, encontra-se representado na figura 2.27.

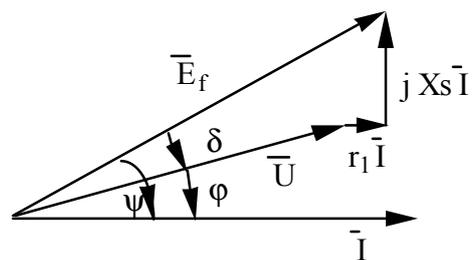


Fig. 2.27: Diagrama vectorial

Neste caso, tem-se

$$E_f \cos \psi = U \cos \varphi + r_1 I$$

multiplicando ambos os termos da equação 2.34 por I, obtém-se:

$$E_f I \cos \psi = U I \cos \phi + r_l I^2 \quad (2.34)$$

Como:

$r_l I^2$ são as perdas de Joule por fase

$U I \cos \phi$ é a potência entregue à rede por fase, então

$E_f I \cos \psi$ será a potência mecânica que se converte em eléctrica por fase. Donde:

$$P_e = 3 E_f I \cos \psi \quad (2.35)$$

$$M_{em} = 3 \frac{P}{\omega} E_f I \cos \psi \quad (2.36)$$

O diagrama de potência, em funcionamento gerador, encontra-se representado na figura 2.28.

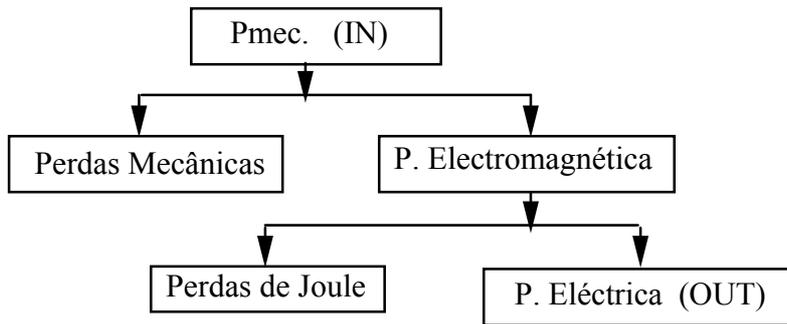


Fig. 2.28. Diagrama de potências em funcionamento gerador.

Em funcionamento motor, o diagrama de Potência será o representado na figura 2.29.

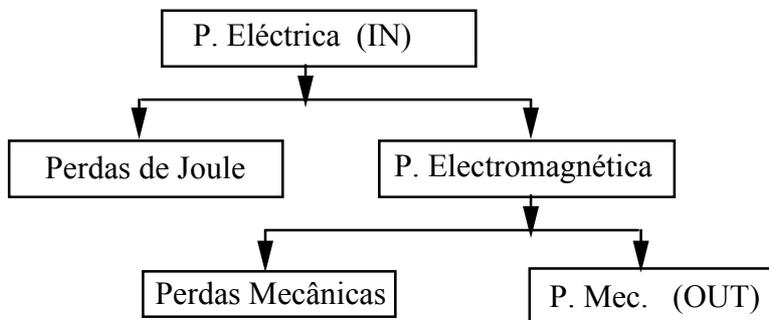


Fig. 2.29. Diagrama de potências em funcionamento motor.

Diagramas vectoriais em carga

As figuras 2.30 a 2.33 representam os diagramas vectoriais da máquina síncrona funcionando em paralelo com uma rede.

Estas figuras cobrem as 4 situações possíveis correspondentes aos 4 quadrantes do plano P,Q. Admite-se que a máquina se encontra em regime não saturado.

1. Gerador

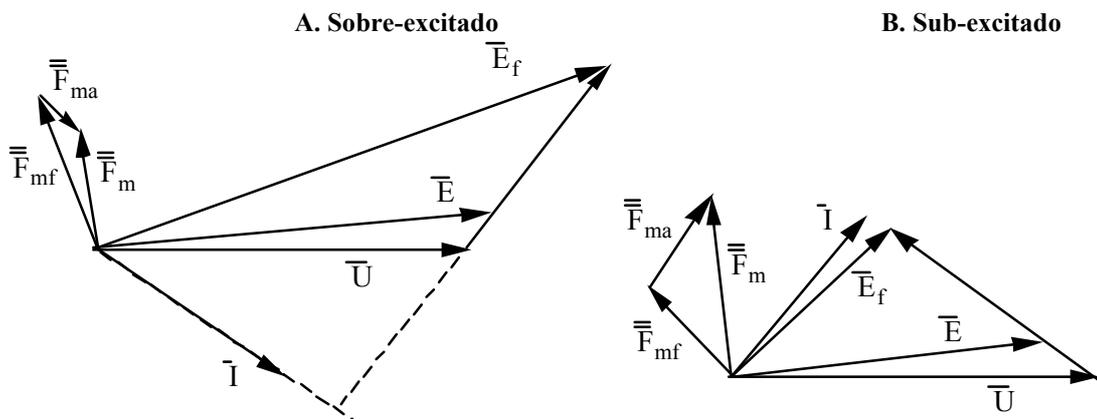


Fig. 2.30 ($P > 0, Q > 0$) Fig. 2.31 ($P > 0, Q < 0$)

2. Motor

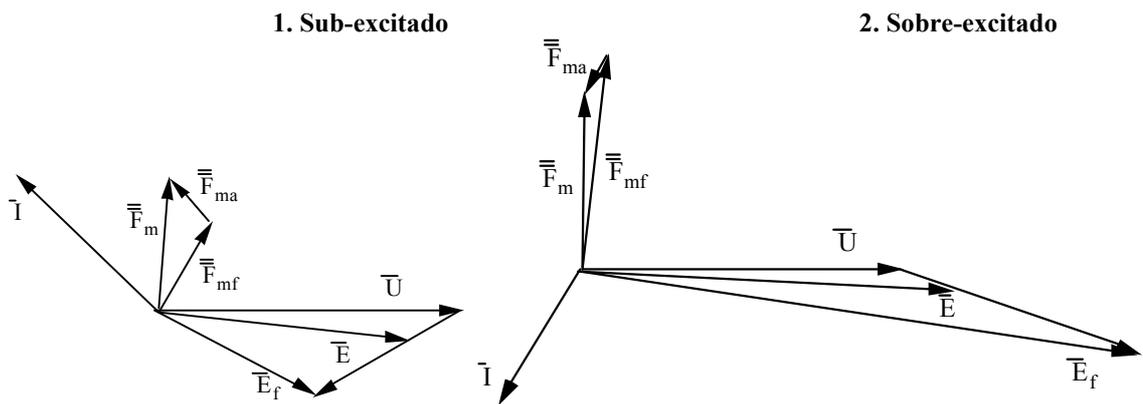


Fig. 2.32 ($P < 0, Q < 0$) Fig. 2.33 ($P < 0, Q > 0$)

Regulação de um Gerador Síncrono

A regulação de um gerador síncrono é definida pela relação:

$$Reg = \frac{E_f - U}{U} \times 100\% \tag{2.37}$$

Dos diagramas vectoriais das figuras 2.30 a 2.33 pode-se concluir que a regulação de um gerador síncrono depende fundamentalmente de:

- a) Do valor da reactância síncrona da máquina
- b) Do factor de potência da carga.

Os mesmos diagramas vectoriais permitem concluir que a regulação é um número positivo quando a carga é de natureza indutiva; esse número diminui à medida que o factor de potência se aproxima da unidade podendo anular-se para um valor particular de factor de potência. Normalmente a relação torna-se negativa para factores de potência capacitivos.

EXEMPLO 2.1

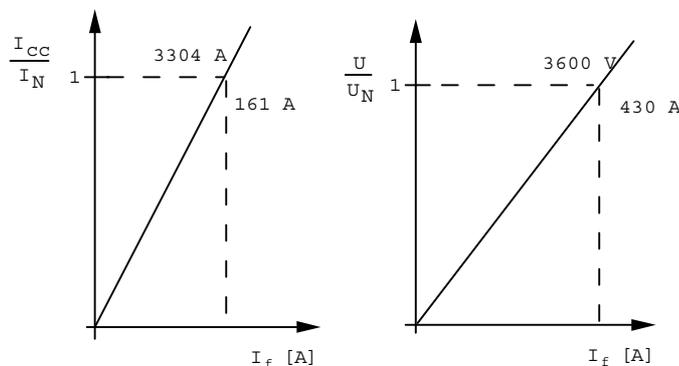
Um alternador trifásico tem as seguintes características nominais:

$S_N = 20.6 \text{ MVA}$, $\cos \phi_N = 0,9$ (sobre-excitado), $U_N = 3,6 \text{ kV}$

$I_N = 3304 \text{ A}$, $i_{fN} = 514 \text{ A}$, $I_{CC}/I_N = 2.6$ $N = 3600 \text{ rpm.}$, $p = 1$

O enrolamento de excitação é constituído por uma bobina supercondutora. O valor do entreferro é de tal modo elevado que a máquina funciona sempre em regime não saturado.

Os ensaios em vazio e em curto-circuito conduziram aos gráficos da figura representada abaixo.



- a) Calcule a reactância síncrona em Ohm e em pu.
- b) Calcule o valor da corrente de excitação de modo a que, com a tensão nominal aos terminais e a corrente nominal nos enrolamentos do estator se tenha:

$$\cos\phi = 0.9 \text{ ind} / 1 / 0.9 \text{ cap}$$

- c) Com a corrente de excitação de 500A, calcule a tensão aos terminais da máquina quando alimenta:

c.1) Uma carga constituída por 3 impedâncias de valor de base unitário e factor de potência $\cos\phi = 0,8 \text{ ind}$

c.2) Uma carga tal que a corrente no estator seja de 3000A com $\cos\phi = 0,9 \text{ ind}$.

c.3) Determine o regime para o qual $\Delta U = 0$ quando a corrente do induzido e do circuito de excitação forem iguais aos valores nominais.

Resolução

a) As características em vazio e em curto-circuito podem ser escritas na forma:

$$U = \frac{3600}{430} \quad i_f = \frac{U_b}{430} \quad i_f \quad I = \frac{3304}{161} \quad i_f = \frac{I_b}{161} \quad i_f$$

O valor de base da impedância será:

$$Z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} I_b} = \frac{3600}{\sqrt{3} 3304} = 0.629 \Omega$$

A impedância síncrona será calculada a partir das características em vazio e em curto-circuito. Assim, sendo U_S o valor da tensão simples, para o mesmo valor da corrente de excitação, tem-se:

$$Z_S = \frac{U_S}{I} = \frac{\frac{U_{sb}}{430} i_f}{\frac{I_b}{161} i_f} = \frac{161}{430} \frac{U_{sb}}{I_b} = 0.37 \frac{U_{sb}}{I_b}$$

O valor da impedância síncrona será:

$$Z_S = 0.37 \text{ pu}$$

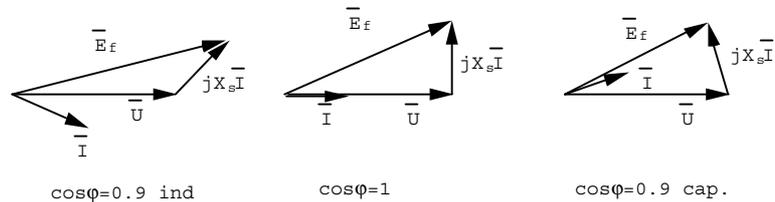
$$Z_S = 0.37 \cdot 0.629 = 0.236 \Omega$$

Nota:

1. A impedância síncrona nas máquinas de potência elevada é aproximadamente igual à sua reactância síncrona visto que os valores das resistências dos enrolamentos são desprezáveis.

2. Este valor de impedância é bastante baixo quando comparado com valores habitualmente encontradas (cerca de 1.2 pu). É um valor típico das máquinas com excitação por bobinas supercondutoras.

b) Obtém-se os seguintes diagramas vectoriais para os 3 casos referidos



$$\cos \varphi = 0,9 \Rightarrow \varphi = 25.840$$

A equação vectorial será:

$$\vec{E}_f = \vec{U} + j X_s \vec{I}$$

Em valores por unidades tem-se:

$$\cos \varphi = 0,9 \text{ ind} \rightarrow \vec{E}_f = 1 + 0,37 e^{+j(90 - 25,84)} = 1.16 + j 0,333 \rightarrow |E_f| = 1,2$$

$$\cos \varphi = 1 \rightarrow \vec{E}_f = 1 + 0,37 j \Rightarrow |E_f| = 1.066$$

$$\cos \varphi = 0,9 \text{ cap} \rightarrow \vec{E}_f = 1 + 0,37 e^{j(90 + 25.84)} = 0,839 + j 0,333 \rightarrow |E_f| = 0,9$$

Da característica em vazio tiramos os valores das correntes de excitação

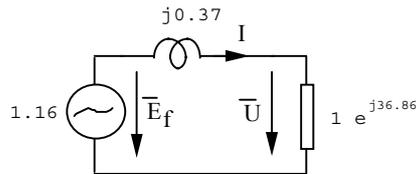
$$\cos \varphi = 0,9 \text{ ind} \rightarrow E_f = 1,2 \text{ pu} \rightarrow i_f = 516 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 1 \rightarrow E_f = 1,066 \text{ pu} \rightarrow i_f = 458.38 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 0,9 \text{ cap} \rightarrow E_f = 0,9 \text{ pu} \rightarrow i_f = 387 \text{ A}$$

c) Quando a corrente de excitação for 500A, $E_f = 1.16 \text{ pu}$

c.1) O esquema equivalente será:
 $\cos \varphi = 0,8 \Rightarrow \varphi = 36.87^\circ$



A impedância total será:

$$Z_t = 0,8 + j0,6 + j0,37 = 0,8 + j0,97 = 1,257 e^{j50.480} \text{ pu}$$

A corrente será:

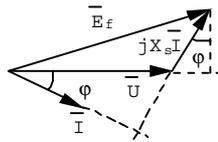
$$I = \frac{1.16}{1.257 e^{j50.48}} = 0.923 e^{-j50.48} \text{ pu}$$

o valor da tensão aos terminais será:

$$\bar{U} = \bar{Z} \bar{I} = 0,923 e^{-j50.48} 1 e^{j36.87} = 0,923 e^{-j13,61} \text{ pu}$$

ou seja $U_c = 0,923.3600 = 3.32 \text{ KV}$

c.2) Neste caso $I=3000 \text{ A} \Rightarrow I=0,908 \text{ pu}$. O diagrama vectorial será:



Baseando-nos no triângulo representado na figura, tiramos a equação:

$$X_s I = 0,37.0,908 \text{ pu} = 0,336 \text{ pu}$$

$$(\bar{U} + X_s I \text{ sen}\varphi)^2 + (X_s I \text{ cos}\varphi)^2 = E_f^2$$

$$(\bar{U} + 0,336 \times 0,436)^2 + (0,336 \times 0,9)^2 = 1.16^2$$

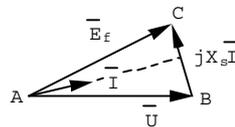
$$(\bar{U} + 0,146)^2 = 1.254 \quad \bar{U} = 0,974 \text{ pu} \rightarrow \bar{U} = 3.5 \text{ KV}$$

c.3)

$$\text{Como } i_f = i_{fN} \rightarrow E_f = \frac{514}{480} = 1.195 \text{ pu}$$

Como se impõe $\Delta U = 0$, tem-se $E_f = U = 1.195 \text{ pu}$

Em funcionamento gerador obtém-se o diagrama vectorial.



$$X_s I = 0,37$$

Conhecemos o valor 3 lados do triângulo ABC. O ângulo δ será dado por:

$$\text{sen} \left(\frac{\delta}{2} \right) = \frac{X_s I}{2 E_f} \rightarrow \delta = 17.8^\circ$$

O ângulo φ será igual a $\delta/2$ ou seja 8.9° capacitivo.

Funcionamento como gerador (ou alternador)

Suponha-se a máquina síncrona em paralelo com uma rede infinita numa condição tal que a máquina motora forneça exactamente as perdas totais da máquina síncrona. Considere-se também que a corrente de excitação da máquina é tal que o vector que representa a força electromotriz em vazio tem o mesmo módulo que o vector que representa a tensão aos terminais da máquina. Atendendo a que a potência é nula, os dois vectores atrás referidos encontram-se em fase como se representa na figura 2.34.

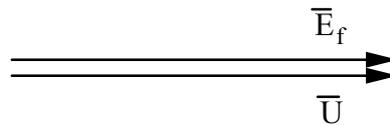


Fig. 2.34

Nestas condições, a máquina não troca energia com o exterior através dos terminais do induzido. Dado o esquema equivalente da máquina, pode-se concluir que a corrente que atravessa os enrolamentos do induzido é nula.

Suponha-se que, muito lentamente, se aumenta a potência mecânica fornecida pela máquina motora. Este "excesso" de potência traduz-se por um binário acelerador que vai fazer girar o rotor a uma velocidade ligeiramente superior fazendo avançar o vector E_f em relação a U e portanto, fazer aumentar o ângulo δ . Nestas condições circulará uma corrente no induzido cujo valor pode ser calculado pela expressão 2.38.

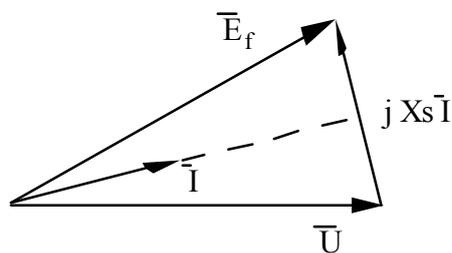


Fig. 2.35

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_f - \bar{U}}{j X_s} \tag{2.38}$$

e a máquina entregará uma potência P à rede dada por:

$$P = \frac{3 U E_f}{X_s} \operatorname{sen} \delta \quad (2.39)$$

Obtém-se um ângulo de equilíbrio tal que a potência mecânica que recebeu P seja igual à potência que entrega à rede.

Desde que as modificações sejam suficientemente lentas, o alternador poderá fornecer qualquer potência eléctrica à rede (excluindo as perdas) até ao limite correspondente a $\delta=90^\circ$, ou seja

$$P_{\max} = \frac{3 U E_f}{X_s} \quad (2.40)$$

Note-se que este valor máximo depende de E_f e portanto da corrente de excitação.

Do que ficou dito pode-se concluir que para regular a potência numa máquina síncrona em paralelo com uma rede infinita basta actuar na máquina motora que lhe fornece potência mecânica. Como exemplo, esta operação faz-se nas centrais hidroeléctricas abrindo ou fechando uma peça, o distribuidor, que vai fazer aumentar ou diminuir o caudal que atravessa a turbina e portanto o binário fornecido à máquina eléctrica.

Mantendo-se inalterada a característica da máquina motriz, ou seja, mantendo-se inalterada a potência recebida pelo alternador, à parte as perdas mecânicas, no ferro e no cobre, mantém-se inalterada a potência entregue à rede.

As curvas em V em funcionamento gerador

Estas curvas são traçadas mantendo constante a potência fornecida à rede e fazendo variar a corrente de excitação. A figura 2.36 ilustra a variação dos diagramas vectoriais quando se varia a força electromotriz E_f . Para que a potência fornecida à rede seja constante é necessário que para os 3 casos se tenha

$$E_f \operatorname{sen} \delta = cte$$

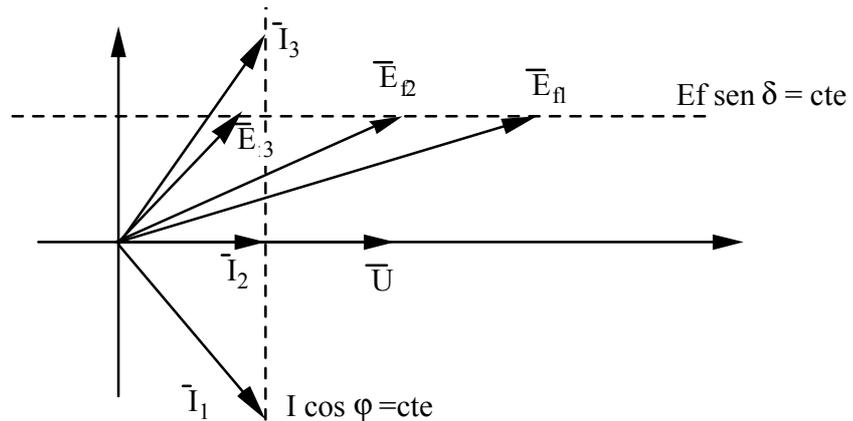


Fig. 2.36

Além disso, tem-se também:

$$I \cos \varphi = cte$$

O facto da potência se manter constante tem como consequência que o vector E_f se encontrar sobre uma recta. Também a corrente se encontra sobre uma recta pois $I \cos \varphi = cte$.

Da figura 2.36 pode-se verificar que à medida que se varia a corrente de excitação de um valor baixo até a um valor elevado, a corrente no induzido começa por ser elevada, vai baixando, atinge um mínimo e depois volta a subir, ou seja descreverá a letra V. A figura 2.37 representa as curvas em V.

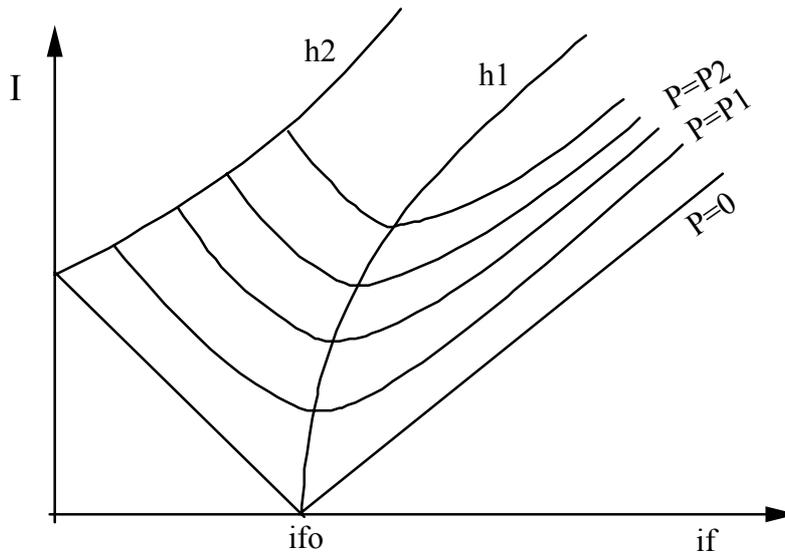


Fig. 2.37 Curvas em V

A variação da corrente trocada com a rede traduz-se por uma variação de potência reactiva. Assim, actuando na excitação faz-se variar a força electromotriz induzida e portanto a potência reactiva.

Conclusão:

Para regular a potência activa - actua-se na máquina motora

Potência reactiva - actua-se na corrente de excitação

Funcionamento como motor

Suponhamos uma máquina síncrona de pólos lisos em paralelo com uma rede de potência infinita num estado semelhante ao estado de partida que se considerou no raciocínio da alínea anterior.

$$\bar{U} = \bar{E}_f$$

Nestas condições a corrente trocada com a rede é nula e portanto são nulas também a potência activa e reactiva. Por sua vez, a potência entregue à máquina pelo veio (potência mecânica) vai contrabalançar as perdas no ferro e as perdas mecânicas.

Suponhamos agora que vamos diminuindo a potência mecânica lentamente de modo o que esta se torne negativa isto é se vai pedir potência

mecânica ao veio. A diminuição de potência entregue ao veio traduz-se por uma aceleração negativa e o rotor diminui ligeiramente de velocidade fazendo com que o vector \bar{E}_f se atrase ligeiramente em relação a \bar{U} . O facto do vector \bar{E}_f se atrasar em relação a \bar{U} traduz-se por uma diferença vectorial $\bar{U} - \bar{E}_f$ não nula e portanto vai aparecer uma corrente trocada com a rede. Esta situação está ilustrada na figura 2.38.

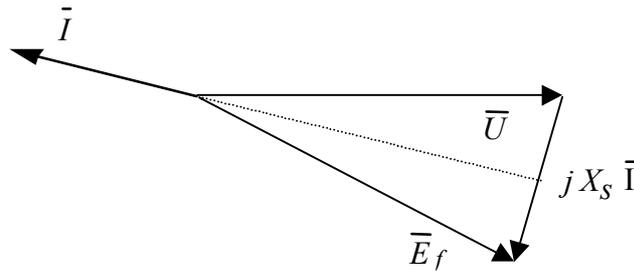


Fig. 2.38

Ao ângulo δ negativo corresponde um a potência eléctrica pedida à rede (eq. 2.39) negativa.

O estado de equilíbrio é atingido quando a potência que a máquina pedir à rede for igual à potência mecânica no veio subtraídas as perdas que agora são mecânicas, magnéticas e por efeito de Joule no induzido. Quanto maior for a potência mecânica pedida maior será o ângulo δ até um limite de $\delta = 90^\circ$ a que corresponde

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{3 U E_f}{X_s}$$

Também nesta situação a potência máxima depende da força electromotriz em vazio.

Tal como no funcionamento gerador também no funcionamento motor a potência activa trocada com a rede não depende o estado de excitação da máquina. Assim, se se pretender pedir mais energia à rede é necessário actuar na carga. Isto resulta do funcionamento síncrono da máquina. Sendo a velocidade constante, para se actuar na potência mecânica tem-se por força que actuar no binário.

A variação da corrente de excitação vai traduzir-se apenas por uma variação de potência reactiva.

Curvas em V em funcionamento motor

Também é possível traçar as curvas em V em funcionamento motor. Quando um motor síncrono alimentado sob uma tensão constante funciona a potência constante, isto é, a binário de carga constante, é possível modificar a potência reactiva trocada com a rede actuando sobre a corrente de excitação i_f .

A figura 2.39 mostra na convenção gerador os vários diagramas vectoriais que se obtêm quando se varia a corrente de excitação e se mantém a potência constante.

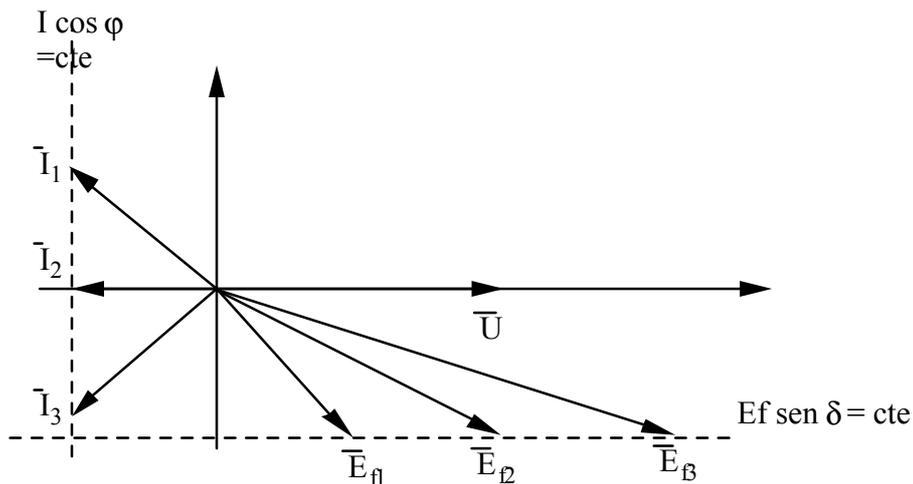


Fig. 2.39

Como a potência P é constante, e sendo U e X_s constantes, $E \text{ sen } \delta$ é constante e por consequência o lugar das extremidades do vector \bar{E} é uma recta paralela a U .

Como a potência activa é constante, também a componente activa de corrente será constante. Assim, o lugar geométrico da corrente também será uma recta e neste caso é perpendicular ao vector \bar{U} .

Na situação 1 (fig. 2.39) a corrente $-I_1$ está em atraso em relação a U . A máquina absorve potência reactiva e encontra-se sub-excitada.

Se se aumentar a excitação, E_f aumenta e a corrente começa a diminuir. No ponto 2 obtém-se o menor valor da corrente. A este valor corresponde um factor de potência unitário. A corrente está em fase com a tensão e a potência reactiva é nula.

Se se continuar a aumentar a excitação, a força electromotriz E_f aumenta e toma valores semelhantes a 3. A corrente ($-\bar{I}_3$) está agora em avanço em relação a \bar{U} . Nesta situação o motor fornece potência reactiva à rede apesar de continuar a absorver a mesma potência activa.

Se se representar num gráfico a corrente no induzido em função da corrente de excitação para vários valores de potência (constante) obtém-se curvas em V semelhantes às representadas na figura 2.37.

a) Em cada curva, um ponto situado à direita do mínimo corresponde a uma corrente em atraso em relação à tensão ($\text{sen}\varphi > 0$) e um ponto situado à esquerda do mínimo corresponde a uma corrente em avanço em relação ($\text{sen}\varphi < 0$) à tensão.

b) Os mínimos de cada curva ($\cos\varphi = 1$) estão colocados sob uma hipérbole que representa o lugar geométrico dos mínimos da corrente absorvida para diferentes valores de potência de carga P_0 .

Com efeito, quando o factor de potência é unitário temos o diagrama vectorial representado na figura 2.40.

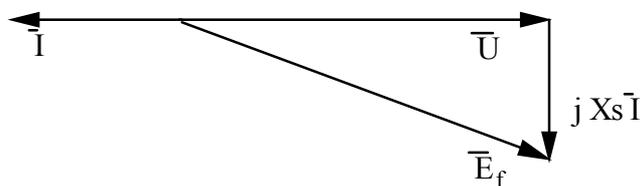


Fig. 2.40

e tem-se:

$$E_f^2 = U^2 + (X_s I)^2$$

o que é o mesmo que

$$\frac{E_f^2}{U^2} - \frac{(X_s I)^2}{U^2} = 1 \quad (\text{hipérbole } h_1) \quad (2.41)$$

c) Existe um limite de estabilidade do lado esquerdo das curvas devido ao facto do ângulo δ não poder ser superior a 90° . Este limite de estabilidade está representado pela hipérbole h_2 . Com efeito nesta situação tem-se o diagrama vectorial da figura 2.41.

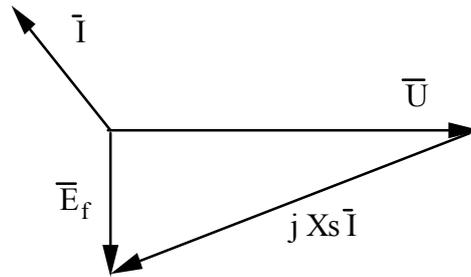


Fig. 2.41

donde

$$E_f^2 + U^2 = (X_s I)^2$$

ou

$$\frac{(X_s I)^2}{U^2} - \frac{E_f^2}{U^2} = 1 \quad (\text{hipérbole } h_2) \quad (2.42)$$

Funcionamento como compensador síncrono

Suponhamos que é nula a potência trocada entre a máquina e o exterior no veio, ou seja é nula a potência mecânica útil em jogo. Nestas condições, a máquina recebe através da rede uma potência que equilibra as perdas mecânicas, magnéticas e por efeito de Joule no induzido. Actuando na corrente de excitação pode regular-se, tal como em funcionamento gerador ou motor, a potência reactiva trocada com a rede. A máquina funcionará como compensador síncrono (fig. 2.42)

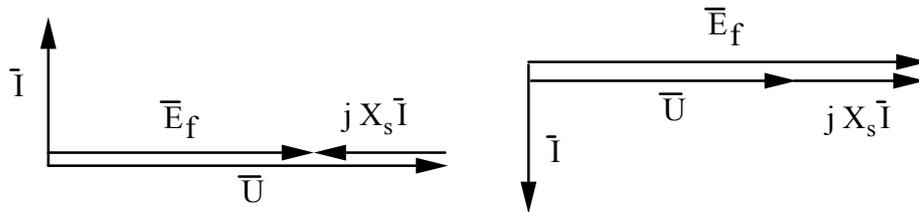


Fig. 2.42 Funcionamento como compensador síncrono

EXEMPLO 2.2

Um motor síncrono tem as seguintes características:

"1.6 MW - 3ø - Δ - 2300 V - 60 Hz - 20 pólos lisos"

Tem uma resistência de induzido desprezável e uma "reactância síncrona" por fase $X_s = 4 \Omega$. Debita uma potência mecânica constante e igual sua potência nominal.

a) Ajusta-se a corrente de excitação i_f do rotor de modo que a corrente consumida pelo motor seja mínima. Calcular:

1. O valor desta corrente mínima I por fase.
2. O valor da f.e.m. E_f por fase.

b) Modifica-se a corrente de excitação i_f do rotor de modo que a corrente consumida esteja desfasada de 30° em avanço em relação à tensão U ($\cos\phi=0,866$). Calcular:

1. O novo valor I' da corrente consumida por fase.
2. O novo valor E'_f da f.e.m. por fase
3. A potência reactiva total Q que o motor fornece à rede.

Resolução:

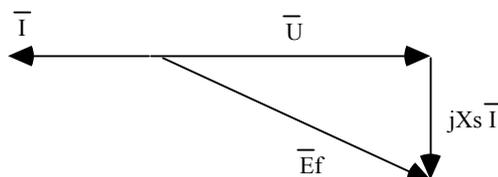
a) Quando a corrente do induzido for mínima, o factor de potência será unitário. Assim:

1.

$$P = \sqrt{3} U_C I_1 \rightarrow I_1 = P / (\sqrt{3} U) = 1.6 \times 10^6 / (\sqrt{3} \cdot 2300) \approx 400$$

o enrolamento será percorrido por $I_1 / \sqrt{3} = 230$ A

2. O diagrama vectorial das tensões toma a forma de um triângulo rectângulo como se pode ver na figura.



Donde

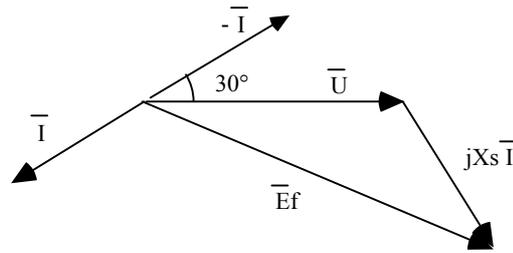
$$E_f^2 = U^2 + (X_s I)^2$$

ou seja

$$E_f^2 = 2300^2 + (4 \times 230)^2 \text{ donde } E_f = 2479 \text{ V}$$

O valor da força electromotriz E_f por fase será 2479 V

b) O novo diagrama vectorial será agora:



1. O novo valor da corrente será:

$$P = \sqrt{3} U_c I \cos\varphi \quad I = \frac{P}{\sqrt{3} U_c \cos\varphi}$$

$$I = 464 \text{ A} \quad I_{\text{fase}} = 268 \text{ A}$$

2. Atendendo ao diagrama vectorial acima, pode escrever-se:

$$\bar{E}_f = \bar{U} + jX_s \bar{I} = 2300 - j 4.268 e^{j 30} = 2300 - j(928 + j 536) =$$

$$= 2300 + 536 - j 928 = 2836 - j 928$$

donde

$$|\bar{E}_f| = 2984 \text{ V}$$

3. A potência reactiva total fornecida pelo motor será:

$$Q = 3 U_c I_{\text{err}} \sin \varnothing = 3.2300 \cdot 268 \sin 30^\circ = 925 \text{ KVar.}$$

Diagrama de Potências

Suponha-se que a máquina se encontra a funcionar em regime equilibrado e que se encontra não saturada. Suponhamos que a resistência dos enrolamentos do induzido é desprezável e que a máquina se encontra em paralelo com uma rede de potência infinita. Nestas condições a frequência e a tensão aos terminais da máquina são mantidas constantes.

Como a potência activa P é proporcional a $I \cos \varphi$ e a potência reactiva a $I \sin \varphi$, obtêm-se na figura 2.43 dois segmentos proporcionais respectivamente à potência activa e reactiva. Tem-se:

$$AB = X_s I \cos \varphi = \frac{X_s}{3U} P \quad (2.43)$$

$$AC = X_s I \sin \varphi = \frac{X_s}{3U} Q \quad (2.44)$$

Como X_s e U são constantes, pode-se concluir que o segmento AB é proporcional à potência activa e que o segmento AC é proporcional à potência reactiva. A corrente I nos enrolamentos é proporcional ao segmento AD e o ângulo φ de defasagem entre a tensão e a corrente é igual ao ângulo entre os segmentos AD e AB.

O funcionamento da máquina pode ser representado por um diagrama do tipo do indicado na figura 2.43 que se refere a uma tensão igual à tensão nominal e as grandezas estão representadas em valores por unidade.

Tem-se:

1) O lugar geométrico dos pontos correspondentes a corrente de excitação constante (força electromotriz constante) é uma circunferência de centro em H.

2) O lugar geométrico dos pontos correspondentes a corrente no induzido constante é uma circunferência de centro em A.

3) O lugar geométrico dos pontos correspondentes a factor de potência constante é uma recta passando por A.

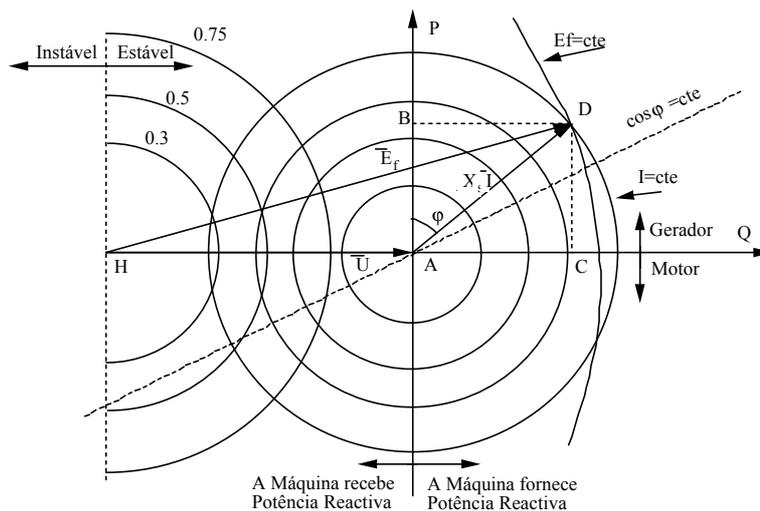


Fig. 2.43 Diagrama de potências.

Neste diagrama está ainda representado o domínio de funcionamento que corresponde a um funcionamento estável para pequenas perturbações, no caso de funcionamento em paralelo com uma rede de potência infinita.

As curvas limite da máquina síncrona.

Para regimes aproximadamente uniformes e de muito longa duração, o domínio de funcionamento da máquina, com frequência e tensão iguais aos valores nominais, é condicionado, em primeira aproximação, nos casos normais pelos seguintes factores:

a) A corrente do induzido (responsável pelas perdas de Joule no estator) não deve exceder os valores nominais.

b) A corrente no enrolamento indutor (responsável pelas perdas de Joule no rotor) não exceder o valor correspondente aos valores nominais.

c) A máquina deve funcionar dentro do domínio de estabilidade.

d) Não devem ser excedidas limitações de carácter mecânico quanto à potência mecânica no veio, por exemplo, no caso do alternador, não deve ser excedida a potência máxima que a máquina motriz pode fornecer.

Estas condições conduzem às curvas limite representadas na figura 2.44.

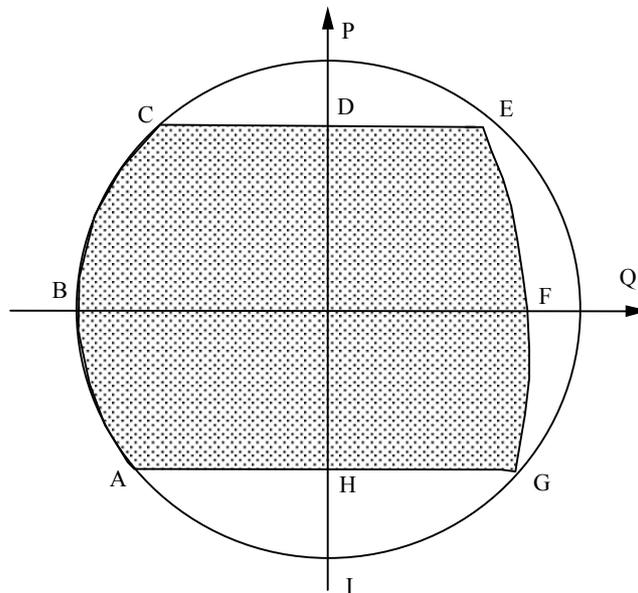


Fig 2.44 Curvas limite da Máquina Síncrona.

A limitação ABC corresponde à condição de não ser excedida a corrente nominal do induzido.

A limitação CDE corresponde a não ser excedida a potência máxima que a máquina motriz pode fornecer. Está-se no caso em que a máquina síncrona funciona como gerador.

A limitação EFG corresponde a não ser excedida a corrente de excitação às condições nominais.

A limitação GHA corresponde ao máximo que a carga eventualmente poderá receber. Está-se no caso em que a máquina síncrona funciona como motor.

Nem sempre as curvas atrás referidas são limitativas. Por exemplo, na hipótese de não existir a limitação da potência da carga e de o veio do rotor estar para isso dimensionado, o domínio de funcionamento será ABCDEFGIA.

Deve notar-se que estas limitações não têm carácter absoluto. Por exemplo, as limitações correspondentes aos troços ABC e EFG correspondem a que as perdas por efeito de Joule em determinadas zonas da máquina não excedam as perdas em condições nominais. No entanto, se as condições de refrigeração forem mais favoráveis que as condições nominais, é possível exceder essas limitações sem que se excedam os limites convenientes de funcionamento. Por outro lado, dada a inércia térmica da máquina, não há inconveniente em que estas limitações sejam excedidas durante períodos não muito longos.

Estudo a estabilidade e oscilações da máquina síncrona.

1. Potência sincronizante e estabilidade estática.

Para uma determinada máquina, caracterizada pela reactância síncrona X_s e funcionando a tensão constante U e excitação fixa I_f , a potência P é dada pela expressão 2.28.

Em regime permanente o binário mecânico no veio é equilibrado exactamente pelo binário electromagnético. Para que o funcionamento seja estável, é necessário que a máquina, em caso de perturbação, responda de modo a restaurar a posição inicial quando desaparecer a perturbação.

O ângulo δ representa em cada instante a desfasagem angular da roda polar entre as posições em vazio e em carga. Para que o regime de funcionamento seja estável, a uma variação $\Delta\delta$ do ângulo de carga deve corresponder uma variação ΔP do mesmo sinal.

Para que o regime seja estável, é necessário então:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0 \quad (2.45)$$

A quantidade $\partial P/\partial \delta$ é designado por potência sincronizante. Numa máquina de pólos lisos, tem-se:

$$P_{sin} = \frac{3 E_f U}{X_s} \cos \delta \quad (2.46)$$

O limite de estabilidade estática é definido como a potência máxima que a máquina pode trocar com a rede sem perder o sincronismo em resposta a uma variação lenta da carga e sem modificação da corrente de excitação.

Para uma máquina de rotor cilíndrico, o limite de estabilidade estática é atingido quando $\delta = \pm \pi/2$. A zona de funcionamento estável corresponde assim a:

$$-\frac{\pi}{2} < \delta < \frac{\pi}{2} \quad (2.47)$$

2. Oscilações electromecânicas da máquina síncrona.

Em regime permanente, o binário electromagnético M_{em} e o binário exterior M_{ext} equilibram-se mutuamente. As perturbações da máquina síncrona aparecem quando o referido equilíbrio for rompido.

Equação do movimento.

Na convenção gerador, a 2ª lei de Newton escreve-se:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_{ext} - M_{em}$$

A posição do rotor da máquina em ângulos eléctricos, escreve-se:

$$p\theta = \omega t + \delta$$

derivando, obtém-se:

$$p \frac{d\theta}{dt} = \omega + \frac{d\delta}{dt} \quad (2.48)$$

Derivando novamente e tomando como variável de estado, em vez de δ , as suas variações ($\Delta\delta$) em torno de um ponto de equilíbrio δ_0 , tem-se:

$$p \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} \quad (2.49)$$

A uma variação do ângulo de carga corresponde um escorregamento e por consequência os enrolamentos do rotor (amortecedores e indutor) serão percorridos por correntes eléctricas induzidas que por sua vez irão provocar um binário electromagnético. O binário em regime transitório será função de δ e do escorregamento de modo que, desenvolvendo em polinómio de Taylor se tem para fracos escorregamentos:

$$M_{em(\delta,s)} = M_{emav} + \frac{\partial M_{em}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial M_{em}}{\partial s} s \quad (2.50)$$

Tem-se:

$$s = \frac{1}{\omega} \frac{d(\Delta\delta)}{dt} \quad (2.51)$$

Para simplificar, faça-se:

$$K_s = \frac{\partial M_{em}}{\partial \delta} \quad \text{e} \quad K_D = \frac{\partial M_{em}}{\omega \partial s} \quad (2.52)$$

a equação do movimento, fica:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + K_D \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + K_s \Delta\delta = M_{ext} - M_{emav} \quad (2.53)$$

Oscilações livres

A equação homogénea de 2.53 tem como solução:

$$\Delta\delta = A e^{-t/\tau_d} \text{sen}(\omega_d t) \quad (2.54)$$

A frequência das oscilações livres é obtida pela equação:

$$f_{\delta} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{pK_s}{J} - \left(\frac{pK_D}{2J}\right)^2} \quad (2.55)$$

A constante de tempo do amortecimento das oscilações livres é dada por:

$$\tau_d = \frac{2J}{pK_D} \quad (2.56)$$

O termo K_D será obtido mais à frente quando se estudar o regime transitório da máquina síncrona. O termo K_s pode ser obtido das equações 2.28 e 2.30 para o caso da máquina síncrona de pólos lisos.

$$K_s = \frac{3}{\omega_{syn}} \frac{E_f U}{X_s} \cos \delta_0 \quad (2.57)$$

Onde δ_0 é o ponto de funcionamento em torno do qual se fez o desenvolvimento de Taylor, isto é o ponto de funcionamento de equilíbrio. Este factor é designado por *coeficiente de binário sincronizante*.

5. Máquina síncrona saturada. Diagrama de Potier

Comportamento em regime saturado

A força electromotriz E_f pode ser calculada através da expressão 5.38, sendo $\phi = \phi_f$. A força electromotriz E pode ser calculada pela mesma expressão sendo ϕ o fluxo total (soma de $\phi_f + \phi_i$ no caso de circuito magnético linear), onde ϕ_f é o fluxo devido ao circuito de excitação e ϕ_i o fluxo devido ao circuito do induzido

Uma vez que o circuito magnético não é linear, ver figura 2.45, e na máquina síncrona o funcionamento é feito em zonas a que correspondem estados de circuito magnético francamente saturados, a soma vectorial de ϕ_i com ϕ_f não é aceitável.

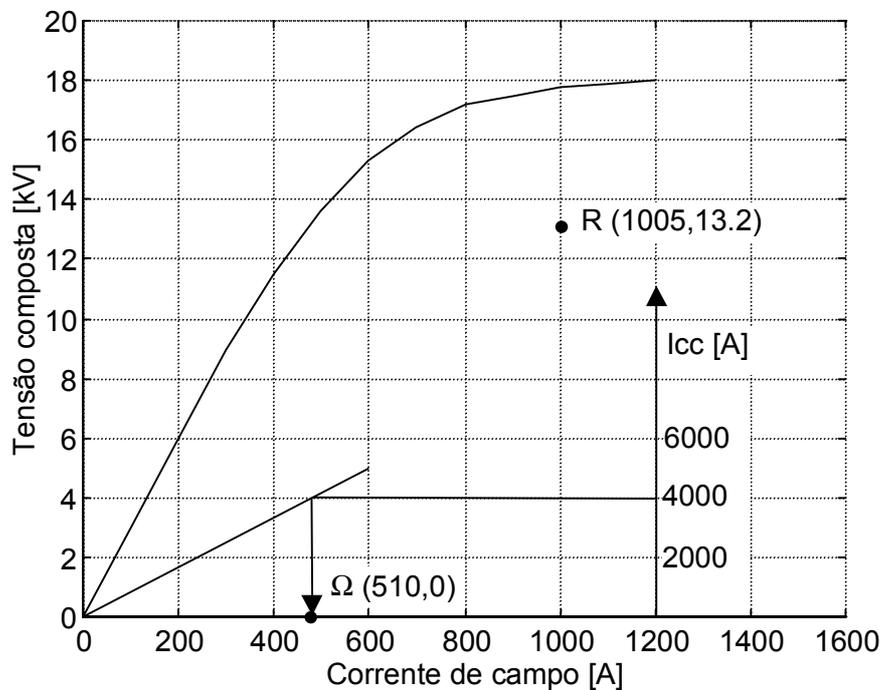


Fig. 2.45 Característica em vazio e curto-circuito de uma máquina síncrona

Em vez de se somarem os fluxos, deverão somar-se as forças magnetomotrizes do induzido e do indutor. Como a distribuição de ambas as

forças magnetomotrizas é sinusoidal no espaço, a força magnetomotriz resultante também será sinusoidal. Conhecida a força magnetomotriz total, pode obter-se o fluxo total e por consequência a força electromotriz no entreferro, recorrendo à característica magnética do circuito. Esta característica é obtida, como se verá, no ensaio em vazio e relaciona E_f com I_f ou E_f com F_{mf} . Como não é possível determinar com facilidade a característica $E=f(F_m)$ admite-se, como se verá mais à frente que é a mesma que $E_f=f(F_{mf})$, isto é a característica determinada no ensaio em vazio.

Em regime saturado, os parâmetros da máquina variam com o estado de saturação. A saturação magnética afecta essencialmente o campo principal, isto é, o parâmetro X'_m . O parâmetro x_l , que representa fluxo de dispersão pode, com um certo grau de aproximação, ser considerado constante. Assim, neste regime de funcionamento, o diagrama da figura 2.7 não é completamente válido. O triângulo dos vectores representantes das forças magnetomotrizas é válido bem como o triângulo constituído pelos vectores que representam a tensão U , a queda de tensão na reactância de dispersão $jx_l I$ e pela força electromotriz em carga E .

EXEMPLO 2.3

Calcular a corrente de excitação requerida pelo enrolamento de campo da máquina dos exemplos 4.6 e 4.7, a fim de mantê-la à plena carga sob tensão nominal a factor de potência indutivo 0,8. A resistência efectiva de seu enrolamento induzido é de 0,00402 Ω por fase e sua reactância de dispersão é de 0,197 Ω por fase. A característica de saturação em vazio do turboalterador, para rotação nominal, está indicada na Fig.2.45.

Solução

Para se obter a corrente de excitação I_f , deve-se, preliminarmente, determinar a correspondente força magnetomotriz F_f que pode ser obtida da soma vectorial:

$$\vec{F}_{mf} = \vec{F}_m - \vec{F}_{ma}$$

Desta soma, já conhecemos o módulo de \vec{F}_{ma} que foi determinada no Probl. 4.1, valendo $F_a = 27497$ ampère-espira por pólo. O módulo de \vec{F}_m (f.m.m. resultante) obtém-se por intermédio da característica de saturação em vazio Oe_0 da máquina, entrando-se com o valor da força electromotriz

resultante E (f.e.m. "no entreferro") em ordenadas para se ler o valor da corrente de excitação que lhe corresponde em abcissas. Como este eixo está graduado em ampère de excitação de campo, a corrente assim obtida estará referida ao enrolamento de campo; a força magnetomotriz resultante \vec{F}_m deverá, portanto ser calculada pela adopção do valor dessa corrente na expressão da força magnetomotriz do enrolamento de campo.

A força electromotriz "de entreferro" será:

$$\vec{E} = \vec{U} + \vec{I}(r_a + jx_1) = \left(\frac{13200}{\sqrt{3}} + j0 \right) + 4100(0.8 - 0.6j)(0.004 + j0.197) = 8.14 \text{ kV} \angle 48^\circ.$$

Como o eixo de ordenadas na Fig. 2.8 está graduado em volt entre terminais do enrolamento ligado em estrela, para obtermos a corrente de excitação desejada, devemos entrar nesse eixo com:

$$E = \sqrt{3} \times 8.144 = 14.105 \text{ kV}$$

ao que corresponde uma corrente de 520 A em abcissas.

A força magnetomotriz correspondente será:

$$F_m = \frac{4}{\pi} N 0.5 I_f K_{e1} = \frac{4}{\pi} 125 0.5 520 0.791 = 32732 \text{ ampère-espira por pólo}$$

Para determinarmos \vec{F}_{mf} através da composição de \vec{F}_m com \vec{F}_{ma} , escrevemos

$$\vec{F}_{mf} = 32732 e^{j(90+4.48)^\circ}$$

Podemos então definir \vec{F}_{ma} : o seu módulo, já obtido no Probl. 4.1, é de 27497 ampère-espira por pólo; seu argumento, será igual a ϕ (Fig. 2.7):

Então

$$\vec{F}_{mf} = 32732 e^{j(90+4.48)^\circ} - 27497 e^{-j(36.87)^\circ} = 54924 e^{j(116.55)^\circ}$$

Da expressão da força magnetomotriz do enrolamento de campo,

$$F_{mf} = \frac{4}{\pi} N K_{e1} I_f$$

tiramos

$$I = \frac{54924 \pi}{4 125 0.5 0.791} = 873 \text{ A}$$

Entrando com essa corrente na curva 0_{e0} , obtemos para a máquina em vazio:

$$E_0 = 17450 \text{ V}$$

O estudo da máquina síncrona em regime não saturado faz-se, como se viu atrás, recorrendo ao seu esquema equivalente que é constituído por uma fonte de tensão E_f em série com a reactância síncrona X_s considerada constante. A reactância síncrona é a soma da reactância correspondente à indutância mútua e da reactância correspondente à indutância de dispersão

do primário. Os fluxos correspondentes a estas duas indutâncias comportam-se de forma diferente: o de reacção (correspondente à indutância mútua) sobrepõe-se ao do indutor, e o de dispersão fecha-se através de um circuito magnético que se pode considerar diferente. A parte mais importante do fluxo de reacção fecha-se pelo ferro e a parte mais importante do fluxo de dispersão fecha-se pelo ar. A saturação vai ter uma influência muito diferente sobre estes dois fluxos: O fluxo de dispersão tem um percurso longo através do ar e por essa razão a saturação tem uma influência muito mais reduzida que no caso do fluxo de reacção que se fecha essencialmente pelo ferro.

O método de Potier, que se vai estudar seguidamente, considera separadamente estes dois fluxos e por isso faz uma aproximação relativamente boa da realidade. O fluxo magnético principal que vai provocar a força electromotriz em carga será criado pelas forças magnetomotrices do indutor e de reacção ou do induzido. O fluxo de dispersão dará origem a uma queda de tensão, resultante da reactância que lhe está associada.

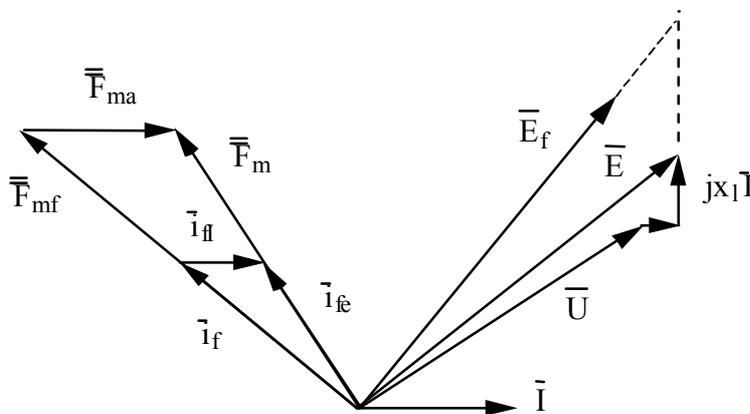


Fig. 2.46. Diagrama de Potier.

Com as hipóteses atrás referidas é possível traçar o diagrama da figura 2.46.

Este diagrama é traçado do seguinte modo:

1. Marca-se a tensão e a corrente fornecida pelo alternador (I, ϕ).

Conhecidos a resistência r_l e a reactância de dispersão x_l , podem desenhar-se $r_l I$ e $x_l I$ que estão em fase e quadratura com \bar{I} respectivamente.

2. Determinada a força electromotriz em carga E , tira-se da característica em vazio, a corrente i_{fe} ou a força magnetomotriz correspondente que se marca em quadratura e avanço sobre E .

3. Em fase com \bar{I} marca-se a força magnetomotriz de reacção dada por

$$F_{ma} = \frac{3\sqrt{2}}{p\pi} N_{l\text{esp}} K_e I_l \quad (2.58)$$

ou a corrente fictícia i_{fl} que lhe é equivalente. Esta corrente i_{fl} quando circular no rotor provoca uma força magnetomotriz equivalente a F_{ma} .

4. A partir de \bar{F}_{ma} e \bar{F}_m pode determinar-se \bar{F}_{mf} ou a corrente de excitação equivalente por:

$$\bar{F}_{mf} = \bar{F}_m - \bar{F}_{ma} \quad \text{ou} \quad \bar{i}_f = \bar{i}_{fe} - \bar{i}_{fl} \quad (2.59)$$

5. Conhecido o vector \bar{F}_{mf} ou \bar{i}_f , traça-se o vector \bar{E}_f em quadratura com \bar{F}_{mf} . O seu módulo é determinado pela característica em vazio e é menor do que a força electromotriz em vazio que existiria se não existisse saturação magnética.

Medição dos parâmetros para a construção do diagrama de Potier

1. A resistência r_l mede-se com facilidade

2. A f.m.m de reacção pode calcular-se pela equação 2.58. A corrente fictícia que lhe corresponde por:

$$i_{fl} = \frac{3\sqrt{2}}{p\pi} \frac{N_{l\text{esp}} K_{el}}{N_f K_{ef}} \bar{I}_l \quad (2.60)$$

3. É necessário conhecer a reactância de dispersão do induzido x_l .

A determinação directa destas duas grandezas x_l e i_{fl} ou F_{ma} faz-se a partir da características em vazio e das características reactivas da máquina.

Determinação dos parâmetros necessários para o traçado do diagrama de Potier. O triângulo de Potier.

Seguidamente vai-se examinar algumas propriedades da característica de saturação em carga sob factor de potência indutivo nulo. Ver-se-à como esta curva nos pode conduzir a valores suficientemente aproximados para a reactância de dispersão x_l . Como se referiu atrás, esta curva é definida como

$$U=f(i_p) \quad \text{com} \quad I=\text{cte}, \quad N=\text{cte}, \quad \varphi=90^\circ$$

Em termos mais gerais, podem-se traçar varias curvas de saturação em carga sob factor de potência indutivo nulo para o mesmo valor de velocidade de rotação e vários valores de corrente I . Obtém-se assim uma família de curvas da qual faz parte a característica de saturação em vazio pois está definida para o valor $I = \text{cte} = 0$.

Na figura 2.47 estão representadas as seguintes curvas:

- a) $0 - e_0$ Curva de saturação em vazio
- b) $\Omega - V$ Curva de saturação em carga ($\cos \varphi = 0$)
- c) $O - i_{cc}$ Curva de curto-circuito

Para a compreensão dos raciocínios que a seguir se descreverão, vai-se considerar a curva $0 - e_0$, que como vimos representa a característica magnética da máquina em vazio e relaciona a força electromotriz em carga E com a força magnetomotriz total F_m . Assim a curva $0 - e_0$ representa:

$$1 - E_f = f(F_{mf})$$

$$2 - E = f(F_m)$$

Veremos, seguidamente, que a curva $\Omega - V$ pode ser obtida por intermédio de uma translação adequada da característica em vazio. Para isso analisem-se as propriedades do triângulo PQR que se designa por triângulo de Potier.

O ponto R corresponde a uma situação de funcionamento sob factor de potência indutivo nulo. O diagrama vectorial correspondente encontra-se representado na figura 2.48. Nesta figura desprezam-se as quedas de tensão na resistência do induzido.

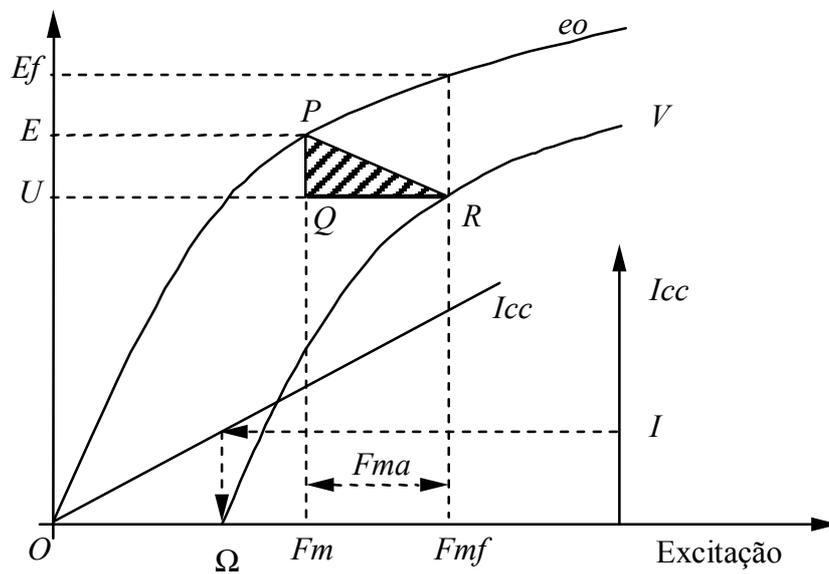


Fig. 2.47 Traçado do triângulo de Potier

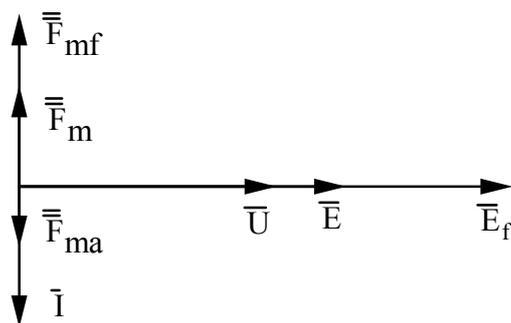


Fig. 2.48 Diagrama vectorial com carga indutiva pura

Deste diagrama vectorial pode concluir-se:

- a) A reacção magnética do induzido é completamente desmagnetizante e pode escrever-se:

$$|\overline{F}_m| = |\overline{F}_{mf}| - |\overline{F}_{ma}| \quad (2.61)$$

b) Os vectores \overline{U} , \overline{E} , e \overline{E}_f estão em fase (não estariam se não se desprezasse a queda de tensão resistiva nos enrolamentos do induzido). Assim:

$$|\overline{E}| = |\overline{U}| + |\overline{x}_1 \overline{I}| \quad (2.62)$$

As equações 2.61 e 2.62, válidas para a condição de factor de potência indutivo nulo, vão permitir demonstrar que o triângulo PQR é constante independentemente das situações dos pontos P e R sob as respectivas curvas. Deste facto decorre a propriedade referida segundo a qual a curva ΩV pode ser obtida por um deslocamento adequado da curva em vazio.

O ponto R é caracterizado por (ver fig. 2.47):

- Uma tensão aos terminais U lida em ordenadas
- Uma força magnetomotriz de excitação F_{mf} lida em abcissas
- $F_m = F_{mf} - F_{ma}$ representa a força magnetomotriz resultante que mantém o fluxo no entreferro e a correspondente força electromotriz em carga E (ponto P).

Assim, o triângulo de Potier é definido por:

1 - O cateto QR = $|\overline{F}_{mf}| - |\overline{F}_m|$ representa a força magnetomotriz de reacção do induzido produzida pela corrente constante I para a qual foi traçada a curva ΩV .

2 - O cateto PQ = $|\overline{E}| - |\overline{U}|$ é numericamente igual à queda de tensão produzida pela corrente I na reactância x_l .

Este triângulo é o mesmo quaisquer que sejam as posições dos seus vértices P e Q sob as curvas correspondentes devido a duas razões:

1 - O cateto $QR = F_{ma}$ exprime a força magnetomotriz de reacção de induzido para uma corrente constante. É por consequência constante pois esta força magnetomotriz de reacção é proporcional aquela corrente.

2. O cateto $PQ = x_l I$ também é constante pois a reactância x_l é constante. Note-se que esta reactância representa fluxos que se fecham por regiões de ar relativamente extensas. É por isso considerada constante e independente do estado de saturação magnética da máquina.

Pode concluir-se que se conhecer o triângulo de Potier, tira-se:

$$X_l = \frac{\text{cateto } PQ(\text{volt})}{\text{corrente } I(\text{ampère})} \quad (2.63)$$

e a força magnetomotriz de reacção $F_{ma} = QR$.

Um ponto importante da curva ΩV é o ponto Ω . A este ponto corresponde a tensão $U=0$ e pode ser retirado da característica em curto-circuito. A sua distância à origem dos eixos de coordenadas exprime a excitação requerida para manter a corrente I na máquina com $U=0$.

Determinação da curva de saturação em carga sob factor de potência indutivo nulo.

A determinação experimental da curva de saturação em carga sob factor de potência indutivo nulo pode ser realizada em laboratório. Para tal o alternador deverá ser accionado a velocidade constante e alimentar uma carga indutiva com factor de potência suficientemente baixo (abaixo de 0,2). A execução deste ensaio para vários pontos da curva oferece algumas dificuldades de ordem prática pois deverão ser feitos vários reajustes na impedância de carga e na máquina de modo a manter a corrente do induzido e a velocidade constantes para diferentes valores da tensão aos terminais.

Para máquinas de potências elevadas é difícil encontrar cargas indutivas com potências convenientes. Em tal caso pode usar-se um motor síncrono como carga.

O traçado desta curva pode ser obtido de uma maneira muito mais cómoda e expedita bastando para isso que se determine apenas um ponto: um ponto a que corresponda uma tensão próxima da tensão nominal e uma corrente da ordem de grandeza da corrente nominal. O ponto Ω pode ser retirado da característica em curto-circuito.

O método requer assim o conhecimento das características em vazio e em curto-circuito e pode ser desenvolvido como se segue (fig 2.49):

a) Obter o ponto Ω a partir de característica em curto-circuito. Este ponto é obtido para a mesma corrente I do induzido para o qual o ponto R foi obtido.

b) Pelo ponto R traçar uma recta paralela ao eixo das abcissas e sobre esta recta marcar o ponto S tal que $RS = \Omega 0$.

c) Pelo ponto S traçar uma recta paralela ao troço linear da característica em vazio. Define-se assim o ponto P sobre a curva de vazio.

d) Pelo ponto P baixar a perpendicular a SR obtendo-se o ponto Q. O triângulo de Potier está encontrado.

Para determinar os restantes pontos da curva referida basta deslocar o triângulo de Potier, sem alterar a direcção dos seus lados, e manter o vértice sobre a curva em vazio. Neste deslocamento o vértice R descreverá a curva desejada.

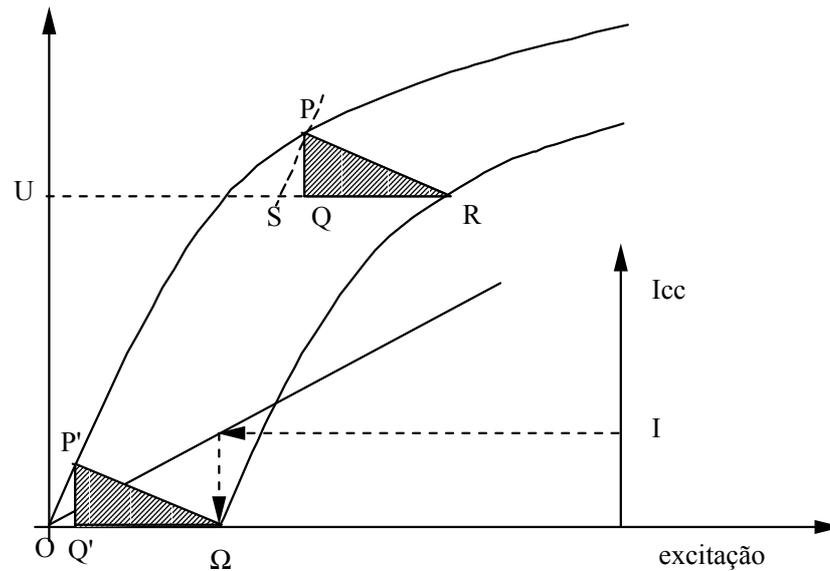


Fig. 2.49 Traçado da característica de saturação em carga sob factor de potência indutivo nulo.

Reactância de dispersão e reactância de Potier

Os raciocínios que se efectuaram atrás partiram do princípio de que a característica de saturação em vazio e em carga eram coincidentes. Isto quer dizer que esta característica relaciona indistintamente tensões em vazio E_0 com forças magnetomotrizes F_{mf} de excitação de campo, bem como tensões induzidas em carga E com as forças magnetomotrizes resultantes $\bar{F}_m = \bar{F}_{mf} + \bar{F}_{ma}$. Na realidade existe um erro resultante de tal aproximação.

No ensaio em vazio não existe fluxo de dispersão no induzido. Ao entrar em carga a corrente de induzido produz fluxo de dispersão e modifica a força magnetomotriz resultante. Para manter essa mesma força magnetomotriz no mesmo valor inicial (no caso de carga indutiva) trona-se necessário reforçar a excitação de campo. Este aumento de excitação de campo vai fazer saturar mais algumas partes da máquina principalmente no indutor.

Assim, ao funcionar com uma carga indutiva com uma força magnetomotriz resultante F_m , a máquina permanece mais saturada do que ao funcionar em vazio com a mesma força magnetomotriz. Assim, o valor do quociente representado na equação 2.63 não é rigorosamente o

coeficiente de dispersão x_j . É designado por reactância de Potier e é um pouco maior do que a reactância de dispersão x_j . Contudo a reactância de Potier x_p é normalmente mais utilizada do que a reactância de dispersão x_j . O facto é justificável pela dificuldade que existe na determinação rigorosa de reactância de dispersão. Como os erros que se obtêm nos cálculos pela substituição da reactância de dispersão pela reactância de Potier são relativamente reduzidos frequentemente estes valores são confundidos.

EXEMPLO 2.4

Determinar, para a máquina objecto do Exemplo. 2.3:

1) A reactância síncrona não saturada, em ohms e em valor por unidade;

2) A reactância de Potier

Recorrer ao gráfico da Fig. 2.45 que encerra:

a) Característica de saturação em vazio, O_{eo} ;

b) Característica de curto-circuito, O_{icc} ;

c) Um ponto R, de coordenadas 13200 V e 1005 A, correspondente à operação da máquina com corrente nominal no induzido, sob factor de potência indutivo nulo.

Solução

Preliminarmente, fixemos os valores base para tensões, correntes e impedâncias em geral. Para tensões, o valor base será a tensão nominal por fase:

$$U_b = \frac{13200}{\sqrt{3}} = 7621V$$

Para corrente, a corrente nominal, já calculada no Probl. 4.1 $I=4100$ A.

Para impedância, a impedância definida pelo quociente:

$$Z_b = \frac{U_b}{I_b} = \frac{7621}{4100} = 1.771\Omega$$

Utilizando-nos do gráfico da Fig. 2.8, a Eq. (2.13) conduz-nos à reactância síncrona não saturada:

$$X_s = \frac{15150}{\sqrt{3}} \frac{1}{4100} = 2.133\Omega \text{ por fase}$$

ou

$$X_s = \frac{2.133}{1.771} = 1.205 \text{ pu (120\%)}$$

Note-se que poderíamos entrar com outro valor qualquer para a corrente de curto-circuito a fim de obtermos, sobre a recta do entreferro O_e , a tensão a ser utilizada no numerador da Eq. (2.13).

Para obtermos a reactância de Potier, devemos, preliminarmente, construir o triângulo de Potier correspondente à corrente para a qual foi determinado o ponto

R, no caso a corrente nominal de 4100 A. Entrando-se com esta corrente no eixo de ordenadas à direita no gráfico, a abcissa correspondente para a característica de curto-circuito I_{cc} será $I_{cc} = 490$ A. Procedendo-se à construção do triângulo de Potier, conforme indicado, obtêmo-lo com um cateto $PQ = 14600 - 13200 = 1400$ V. Esta tensão representa a queda de tensão na reactância de Potier (entre terminais), produzida pela corrente nominal. Portanto, o valor dessa reactância, por fase do induzido, será:

$$X_p = \frac{1400}{\sqrt{3}} \frac{1}{4100} = 0.197 \Omega \text{ por fase}$$

ou

$$X_p = \frac{0.197}{1.771} = 0.111 \text{ pu (11.1\%)}$$

6. Estudo do regime permanente da máquina síncrona de pólos salientes

1. Introdução

As características que se tem vindo a apresentar para a máquina síncrona são válidas para a máquina síncrona de pólos lisos, também designada por máquina síncrona de rotor cilíndrico. Para a máquina de pólos salientes elas são qualitativamente válidas havendo que tomar em conta os aspectos da saliência dos pólos. Nesta secção apresenta-se uma breve introdução sobre a influência da saliência dos pólos nas principais características da máquina.

2. Definição de reactância longitudinal e reactância transversal

O fluxo de reacção produzido pelo induzido de uma máquina síncrona de pólos lisos depende da força magnetomotriz correspondente e do valor do entreferro. Como o entreferro é constante ao longo da periferia da máquina, este fluxo de reacção e correspondente reactância X_s é independente da posição relativa entre o rotor e a força magnetomotriz produzida pelo induzido.

O valor do entreferro varia ao longo da periferia na máquina de pólos salientes, sendo pequeno segundo a direcção dos pólos e grande segundo a direcção perpendicular a estes. Esta máquina tem uma direcção preferencial de magnetização que é determinada pela existência de saliência dos pólos de magnetização e coincide com a direcção destes.

A figura 2.50 mostra que o percurso das linhas de força do campo produzido pelo induzido é fortemente dependente da posição relativa entre o eixo polar e o eixo de simetria da onda de força magnetomotriz provocada pelo induzido. A figura 2.50a estes dois eixos encontram-se alinhados dando origem a que as linhas de força do campo de reacção se fechem por um percurso caracterizado por um valor baixo de entreferro. Neste caso a reactância de reacção toma um valor alto que se designa por X_d . Na figura

2.50b os referidos eixos encontram-se em quadratura. Neste caso as linhas de força vão encontrar um entreferro elevado segundo o eixo de simetria e por conseguinte tem-se uma reactância de reacção baixa. Esta reactância é designada por X_q .

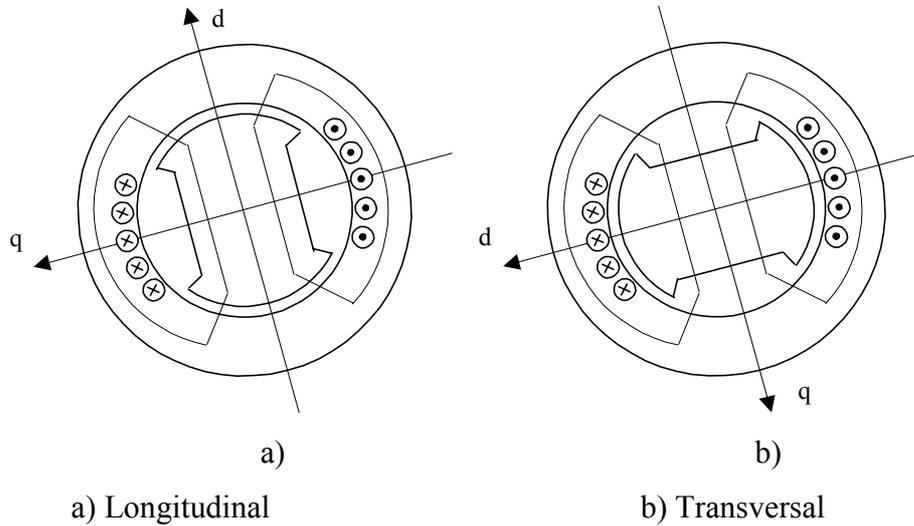


Fig. 2.50 Definição de reactância longitudinal X_d e reactância transversal X_q .

A figura 2.51 apresenta os correspondentes diagramas vectoriais para as situações ilustradas na figura 2.50.

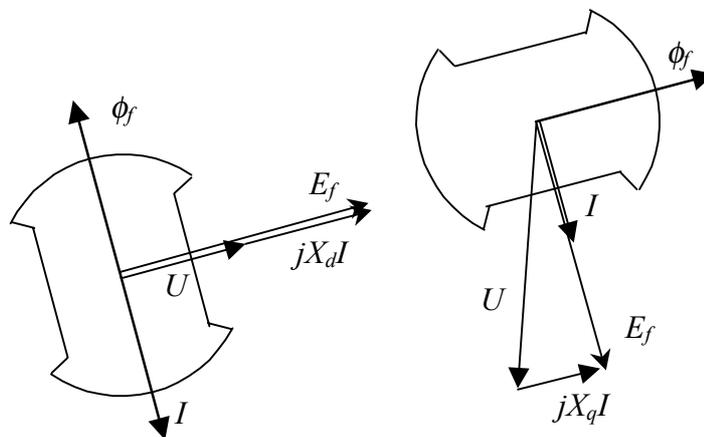


Fig. 2.51. Diagramas vectoriais

Na primeira situação a máquina encontra-se a funcionar como compensador síncrono, e a sua queda de tensão interna é determinada pela reactância X_d . Na figura 2.51.b, a corrente encontra-se em quadratura com o fluxo de excitação ϕ_f e por consequência em fase com a força electromotriz em vazio E_f . A queda de tensão de reacção é determinada pela reactância

transversal X_q . Neste caso a máquina encontra-se a funcionar como gerador absorvendo potência reactiva da rede eléctrica.

No caso mais geral, os pólos salientes podem ser tidos em conta no modelo matemático da máquina síncrona decompondo a corrente do induzido em duas correntes, uma alinhada com o circuito de excitação I_d e a outra em quadratura I_q . Esta decomposição encontra-se representada na figura 2.52 onde o triângulo de forças magnetomotrizes foi substituído por um triângulo de fluxos. Nesta decomposição supõe-se que se está em regime linear de saturação magnética embora esta teoria possa via a ser estendida a máquinas saturadas.

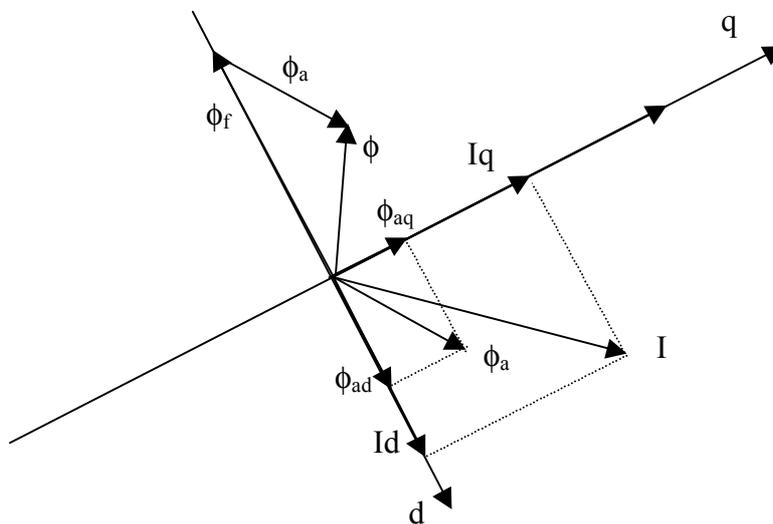


Fig. 2.52 Decomposição da corrente do induzido

De salientar o facto de que, uma vez que $X_d > X_q$, o fluxo de reacção provocado pela corrente do induzido não está em fase com a corrente que o provoca. O sistema de eixos adoptado é designado por dq e está associado ao referencial do rotor da máquina. Assim a velocidade deste sistema de eixos (referencial) é a velocidade da máquina.

Os efeitos indutivos das ondas de fluxo de reacção nos eixos em quadratura podem ser levados em conta por reactâncias de magnetização de eixo directo e quadratura X_{md} e X_{mq} . Então:

$$\begin{aligned} X_d &= X_{md} + x_1 \\ X_q &= X_{mq} + x_1 \end{aligned} \tag{2.64}$$

Onde x_1 é a reactância de dispersão do induzido que se considera igual segundo os dois eixos. Normalmente a reactância transversal é inferior à reactância longitudinal, tendo-se:

$$X_q \cong (0.6 \text{ a } 0.7) X_d \tag{2.65}$$

3. Diagrama vectorial

A cada uma das componentes I_d e I_q está associada uma queda de tensão nas reactâncias síncronas X_d e X_q dadas por $jX_d I_d + jX_q I_q$.

Para a obtenção de um diagrama vectorial deverá fazer-se:

$$jX_s I \rightarrow jX_d I_d + jX_q I_q \tag{2.66}$$

Nos turboalternadores (rotor cilíndrico) também existe um pequeno efeito de saliência.

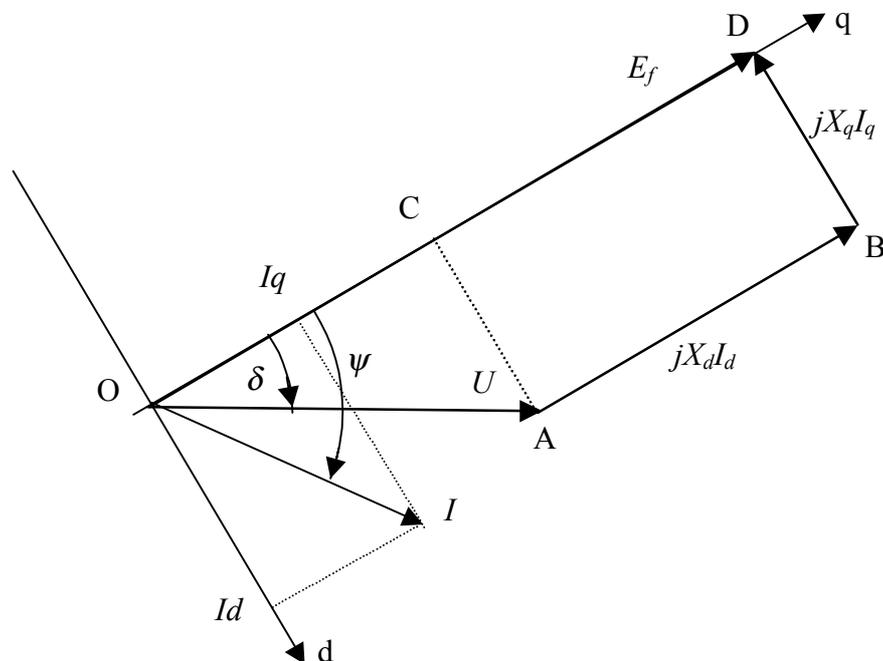


Fig. 2.53 Diagrama vectorial da máquina síncrona de pólos salientes.

O diagrama vectorial a utilizar será o que se encontra representado na figura 2.53. Neste diagrama não se encontra representada a queda de tensão resistiva que também é normalmente desprezável.

O diagrama da figura 2.53 corresponde a equação:

$$\bar{E}_f = \bar{U} + jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q \quad (2.67)$$

Diagramas vectoriais da Máquina Síncrona não saturada

O diagrama vectorial definido na figura 2.53 é utilizado normalmente para determinar a corrente de excitação em carga. Para o caso do funcionamento definido pelo conhecimento da tensão aos terminais U , a corrente I (ou a potência aparente) e o factor de potência φ , a defasagem ψ entre os vectores \bar{I} e \bar{E}_f , isto é, a posição do vector \bar{I} em relação ao sistema de eixos d - q não é conhecida à priori. Assim, as componentes I_d e I_q da corrente não podem ser determinadas directamente.

Com o intuito de explicar um método de as obter, vamos supor que o problema se encontra resolvido e o diagrama vectorial estabelecido para um caso de carga qualquer. Assim admita-se que a figura 2.53 se encontra já traçada.

A partir do diagrama da figura 2.53 tira-se:

$$BD = X_q I_q \quad AB = X_d I_d \quad (2.68)$$

Estando o sistema de eixos d - q posicionado, a projecção de \bar{I} sobre os seus eixos determina as componentes I_d , I_q .

$$I_d = I \sin \psi \quad I_q = I \cos \psi \quad (5.169)$$

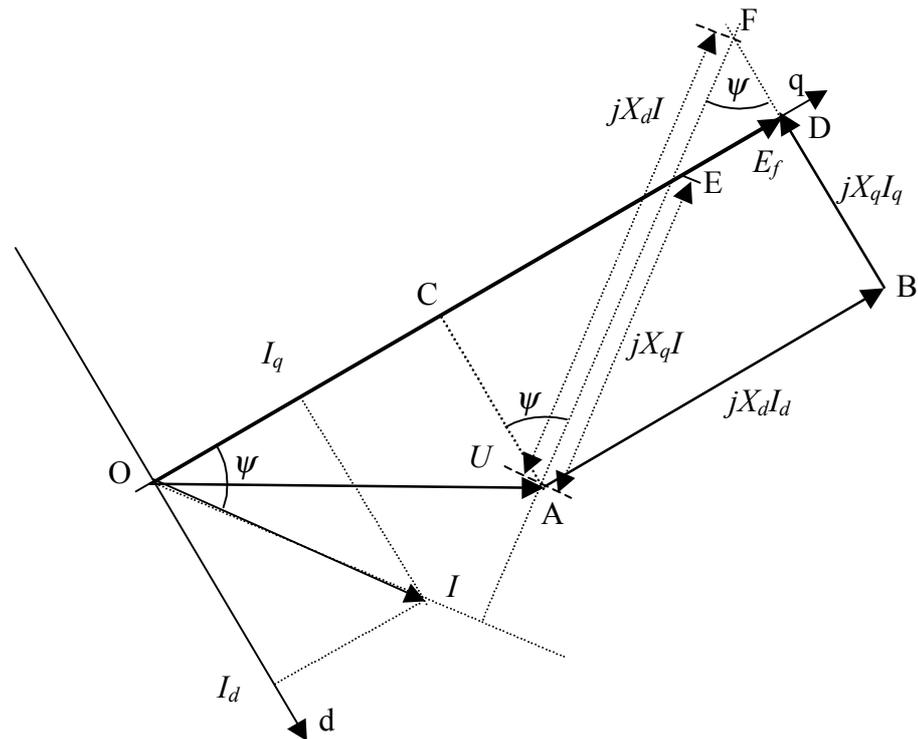


Fig. 2.54. Construção do diagrama de tensões de uma máquina de pólos salientes.

Traçando por A uma perpendicular ao vector corrente \bar{I} , determinam-se os pontos E e F. Prolongando o segmento BD, o ângulo entre este segmento e AF é igual a ψ (ângulos com lados perpendiculares). Note-se que:

$$BD = X_q I_q = X_q I \cos \psi \quad \rightarrow \quad AE = X_q I \quad (2.70)$$

$$AB = X_d I_d = X_d I \sin \psi \quad \rightarrow \quad AF = X_d I \quad (2.71)$$

Diagrama de Blondel ou das duas reacções

O diagrama de tensão para um caso de carga qualquer, estabelece-se assim pelo processo seguinte:

1. Sejam $U I$ e φ as características desejadas. Estas características são conhecidas à priori.
2. Os parâmetros r_l , X_d , X_q são constantes da máquina considerada.

3. Traçam-se no plano os vectores \bar{U} e \bar{I} . O vector \bar{U} pode ser traçado com um ângulo qualquer. O vector \bar{I} é traçado a partir de \bar{U} pois conhece-se φ .

4. Define-se o ponto $A = \bar{U}$. Deste ponto traçam-se, na direcção perpendicular a \bar{I} , dois vectores $X_d I$ e $X_q I$. Obtêm-se os pontos E e F do diagrama.

5. A direcção de E_f (eixos) é obtida pela recta OE e o seu módulo é obtido pela projecção de F nesta direcção.

Conhecida a direcção do eixo q , traça-se a direcção do eixo d e ficam-se a conhecer os ângulos ψ e δ , bem como as componentes I_d e I_q .

Nas máquinas síncronas de rotor cilíndrico, as reactâncias síncronas X_d e X_q são praticamente iguais de modo que o ponto E e F são coincidentes. O estabelecimento do diagrama a partir das condições de carga definidas por \bar{I} , \bar{U} e φ é imediato. Este novo diagrama é conhecido com o nome de diagrama de Poitier.

A determinação de E_f através dos diagramas de Blondel e de Potier permite a determinação da corrente de excitação em carga da característica em vazio.

Expressões das Potências Activa e Reactiva

Nas máquinas de média e de grande potência, a queda de tensão óhmica é sempre desprezável quando comparada com as quedas de tensão indutivas nas reactâncias síncronas longitudinal e transversal.

Seja \bar{S} a potência complexa duma máquina trifásica

$$\bar{S} = P + jQ = 3\bar{U}\bar{I}^* \quad (2.72)$$

$$\bar{S} = 3(U_d + jU_q)(I_d - jI_q)$$

$$\bar{S} = 3(U_d I_d + U_q I_q) + j3(U_q I_d - U_d I_q) \quad (2.73)$$

Do diagrama vectorial tira-se:

$$\begin{aligned} U \operatorname{sen} \delta &= X_q I_q \\ U \cos \delta &= E_f - X_d I_d \end{aligned} \quad (2.74)$$

donde:

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{U \operatorname{sen} \delta}{X_q} \\ I_d &= \frac{E_f - U \cos \delta}{X_d} \end{aligned} \quad (2.75)$$

Substituindo, tem-se:

$$P = 3U \operatorname{sen} \delta \frac{E_f - U \cos \delta}{X_d} + 3U \cos \delta \frac{U \operatorname{sen} \delta}{X_q} \quad (2.76)$$

Desenvolvendo obtém-se:

$$P = 3 \frac{UE_f}{X_d} \operatorname{sen} \delta + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \operatorname{sen} 2\delta \quad (2.77)$$

$$Q = 3 \frac{UE_f}{X_d} \cos \delta - 3 \frac{U^2}{X_q} + 3 \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) (1 + \cos 2\delta) \quad (2.78)$$

A relação 2.77, exprimindo a potência activa em função das reactâncias síncronas e da força electromotriz em vazio, põe em evidência a propriedade que as máquinas de pólos salientes têm de fornecer ou absorver uma potência activa por efeito relutante, mesmo quando a excitação é nula. Neste caso E_f é nula e apenas o segundo termo de 2.77 é diferente de zero. Para as máquinas síncronas de rotor cilíndrico ($X_d = X_q$), as expressões simplificam-se e tomam a forma:

$$P = 3 \frac{UE_f}{X_d} \operatorname{sen} \delta \quad (2.79)$$

$$Q = 3 \frac{UE_f}{X_d} \cos \delta - 3 \frac{U^2}{X_d} \quad (2.80)$$

Em caso de ruptura do circuito de excitação, este tipo de máquina é incapaz de trocar potência activa com a rede e dessincroniza.

Expressão do binário síncrono

Numa máquina síncrona, se se desprezarem as perdas, o binário é dado pela potência activa sobre a velocidade de sincronismo. Assim tem-se:

$$M_{em} = 3 \frac{P}{\omega} \left[\frac{UE_f}{X_d} \text{sen}\delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}2\delta \right] \quad (2.81)$$

Para as máquinas de rotor cilíndrico, obtém-se:

$$M_{em} = 3 \frac{P}{\omega} \frac{UE_f}{X_d} \text{sen}\delta \quad (2.82)$$

A figura 2.55 representa o andamento do binário em função do ângulo de carga δ .

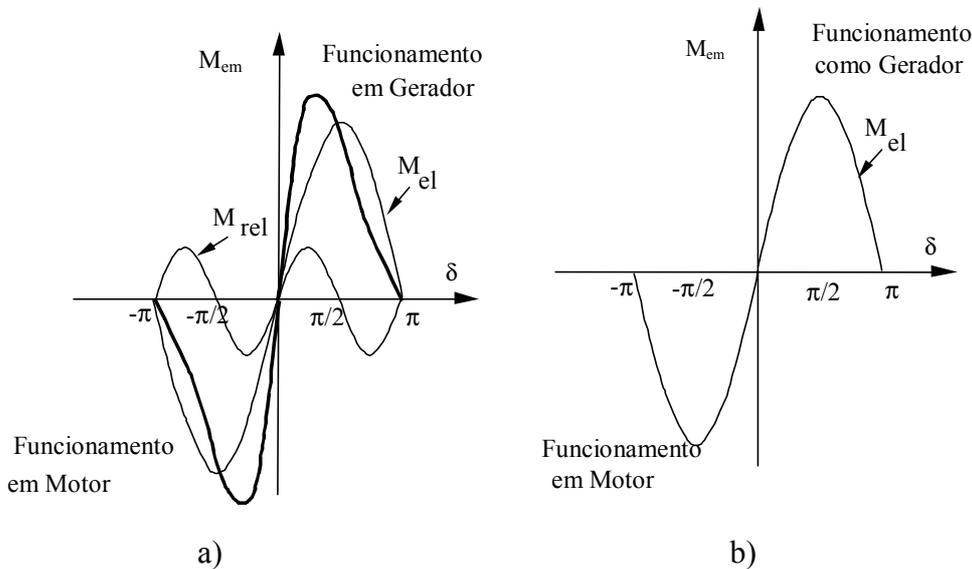


Fig.2.55: Binário em função do ângulo de carga

Constata-se igualmente que a curva passa por um máximo que define o binário de dessincronização para uma determinada corrente de excitação. O binário de relutância, dentro da zona de estabilidade, actua no mesmo sentido do binário electrodinâmico.

Máquina Síncrona de Relutância

Como se viu atrás, mesmo na ausência de excitação, uma máquina síncrona de pólos salientes é capaz de fornecer um binário que resulta do segundo termo da expressão 2.81. Tem-se:

$$M_{em} = 3 \frac{p}{\omega} \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\delta) \quad (2.83)$$

Este binário tem a mesma natureza do binário dos sistemas de relutância. Como se pode verificar, o valor do binário depende do quadrado do valor eficaz da tensão aplicada, da diferença entre as relutâncias segundo o eixo *d* longitudinal e segundo o eixo *q* (transversal). Tal como nos outros tipos de dispositivos de relutância, o binário varia com o seno do ângulo 2δ .

Para melhorar as características destas máquinas, deve-se reforçar a anisotropia magnética segundo os dois eixos. Para isso utilizam-se algumas técnicas construtivas. Estas técnicas tem vindo a ser desenvolvidas e têm obtido alguma relevância nos últimos anos. A figura 2.56 mostra algumas destas formas construtivas. Note-se a preocupação de construir rotores com valores L_d/L_q elevados e com elevada compacidade mecânica. Actualmente constroem-se máquinas com coeficientes de indução L_d e L_q na razão de 1:10, isto é $L_d/L_q = 10$.

Este tipo de máquina é geralmente utilizado como motor de accionamento síncronos de baixas potências (5kW).

Um enrolamento amortecedor assegura boas características de arranque assíncrono.

Fig. 5.56 - Algumas formas construtivas do rotor da máquina síncrona de relutância

- a - Rotor de pólos salientes primitivo
- b - Rotor de barreira de fluxo
- c - Rotor de segmentos isolados
- d - Rotor anisotrópico laminado axialmente.

Esta máquina está a encontrar grande interesse por parte de alguns investigadores em accionamentos de velocidade variável. Nesta situação a máquina é alimentada por um conversor de frequência electrónico. A velocidade é assim variada actuando directamente no valor de frequência e na tensão aplicada.

7. Manobra das máquinas síncronas

Generalidades

As condições de funcionamento que se estudaram referem-se ao regime permanente das máquinas, à velocidade de sincronismo, rodando o rotor, à parte a variação de defasagem, com uma velocidade rigorosamente proporcional à frequência da rede.

Para ligar uma máquina a uma rede, há um período transitório, durante o qual a velocidade da máquina difere em geral da velocidade de sincronismo.

No caso dos geradores, accionados por uma máquina motriz, o processo mais frequente é levar o grupo motor-gerador a uma velocidade próxima da de sincronismo, e então, recorrendo a diversos processos que se analisarão mais adiante, destinados a averiguar se são convenientes as condições para a ligação da máquina à rede, fazer o "paralelo".

No caso dos motores, não se dispõe em geral de máquina motriz para os levar à velocidade de sincronismo. Como se verá mais adiante, recorrendo a determinados expedientes construtivos e de manobra, se se aplicar ao enrolamento do estator uma tensão alternada, o rotor é actuado por um binário motor que, em determinadas condições, o acelera até à velocidade de sincronismo. Durante este período transitório, o funcionamento da máquina é essencialmente diferente do que se estudou, em regime "síncrono". Outras vezes, recorre-se a um motor auxiliar, que acelera o rotor até à velocidade de sincronismo, permitindo efectuar a manobra de paralelo sem perturbação para a rede.

Arranque e ligação dos alternadores

Para que se possa efectuar a ligação de um alternador a uma rede (fig. 2.57), é necessário:

- a) Que a velocidade do rotor seja próxima da de sincronismo

b) Que a tensão aos terminais do alternador seja aproximadamente igual à tensão da rede

c) Que a sequência de fases nos terminais a ligar seja a mesma

d) Que as tensões aos terminais do alternador e da rede estejam aproximadamente em fase.

Se não se verificar a condição c), não é evidentemente possível um funcionamento correcto.

Se se não se verificarem as condições b) e d), ao efectuar-se a ligação o alternador será percorrido por uma corrente intensa. Além disso, se a defasagem for desfavorável, poderá efectuar-se o paralelo no domínio "instável" do diagrama de funcionamento.

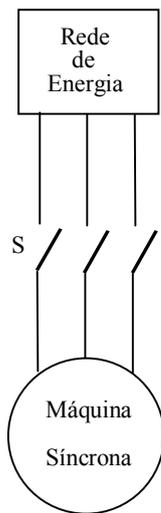


Fig. 2.57

Se se não verificar a condição a), os binários que actuarão o rotor ao efectuar o paralelo podem não ser suficientes para levar rapidamente o rotor à velocidade de sincronismo na zona estável do diagrama de funcionamento.

Portanto, a sequência da manobra será a seguinte:

a) Accionar a máquina motriz, até uma velocidade próxima da de sincronismo.

b) Regular a corrente de excitação do alternador, por forma que a tensão aos seus terminais seja aproximadamente igual à tensão da rede.

c) Verificar que a sequência de fases nos terminais a ligar é a mesma.

d) Regulando a velocidade da máquina motriz, actuar por forma que a diferença entre as frequências das tensões da rede e aos terminais do alternador seja muito pequena e, quando estiverem ambas em fase, efectuar o paralelo.

e) Depois de feito o paralelo, actuar no regulador de velocidade da máquina motriz por forma que a potência fornecida pelo alternador à rede

atinja o valor pretendido e actuar no circuito de excitação do alternador por forma que a potência reactiva fornecida pelo alternador à rede atinja o valor pretendido.

Um dos sistemas mais simples é utilizar uma montagem do tipo da indicada na fig. 2.58. Os voltímetros V_1 e V_2 indicam as tensões aos terminais do alternador e da rede, que devem ser aproximadamente iguais.

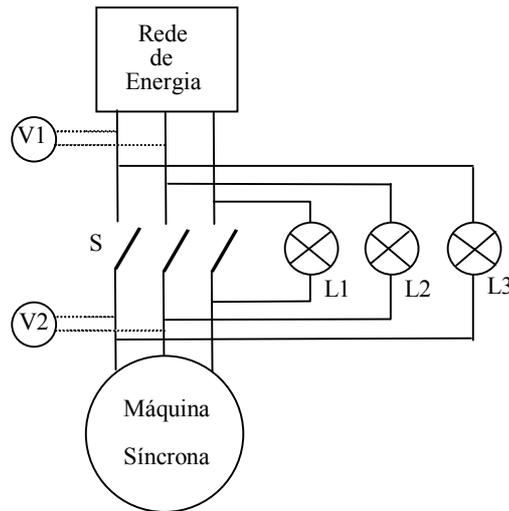


Fig.2.58 Montagem de fogos pulsantes

As tensões aplicadas às lâmpadas dependem da defasagem relativa da tensão da rede e aos terminais do alternador. Se as frequências forem ligeiramente diferentes, as duas estrelas de tensões têm movimento relativo (fig. 2.59) e a tensão aos terminais das lâmpadas varia entre zero e o dobro da tensão simples⁽¹⁾, com uma frequência igual à diferença entre as duas frequências. O período do brilho das lâmpadas é o inverso da diferença entre as duas frequências. Quando o período do brilho das lâmpadas for elevado, da ordem de alguns segundos, as frequências são bastante próximas. No instante em que as três lâmpadas se apagam, as tensões estão em fase. Se as indicações de V_1 e V_2 forem aproximadamente iguais, poder-se-à efectuar o paralelo no instante em que as três lâmpadas se apagam.

⁽¹⁾ Por este motivo, as lâmpadas devem ser previstas para uma tensão eficaz igual ao dobro da tensão simples.

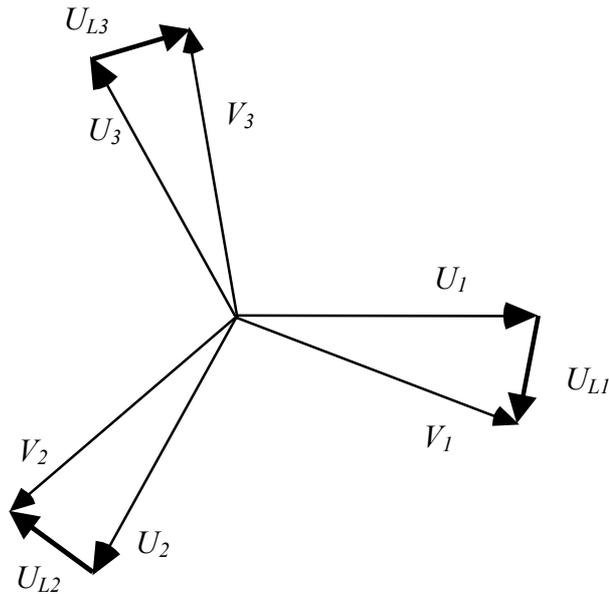


Fig. 2.59 Estrelas de fogos pulsantes

Se a sequência de fases não for a mesma, as três lâmpadas não se acendem e apagam ao mesmo tempo. Trocando duas das fases da rede ou do alternador, ter-se-à a mesma sequência de fases.

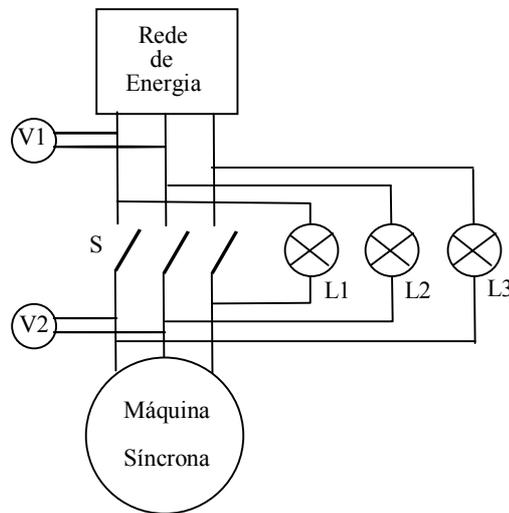


Fig. 2.60 Montagem de fogos girantes

Outra montagem semelhante, e ainda mais usada, é ligar três lâmpadas, uma entre terminais correspondentes do interruptor destinado a fazer o paralelo, as outras duas entre terminais "cruzados" (fig. 2.60).

As lâmpadas acendem-se e apagam-se com uma frequência igual à diferença entre as frequências da rede e do alternador mas não

simultaneamente. Acendem-se sucessivamente, sendo o sentido da sucessão dependente do sentido da diferença das frequências (fig.2.61).

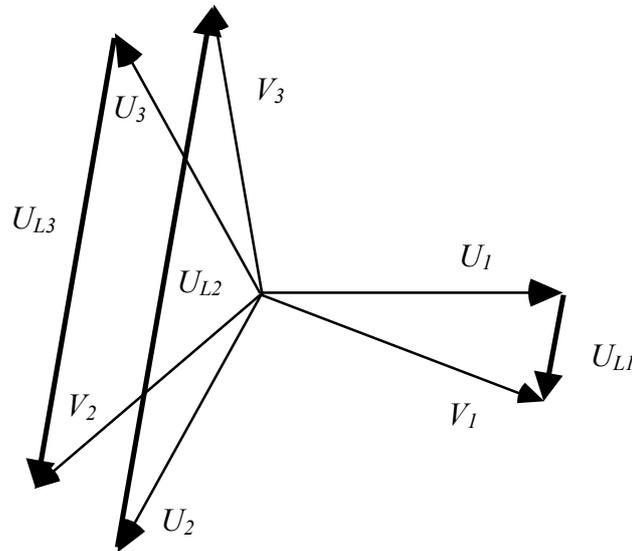


Fig.2.61 Estrelas no sistema de fogos girantes

Aparece assim um sistema "fogos girantes" que roda no sentido directo ou no sentido inverso consoante a frequência do alternador é superior (inferior) ou inferior (superior) à rede.

O instante conveniente para o paralelo é aquele em que a lâmpada que liga terminais correspondentes está apagada, sendo nessa altura iguais (mas inferiores ao máximo) os fluxos luminosos das outras duas lâmpadas. Normalmente as três lâmpadas são dispostas em triângulo, sendo colocada superiormente a lâmpada ligada entre terminais correspondentes.

Se a sequência de fases nos dois conjuntos de terminais do dispositivo de ligação for inversa, as três lâmpadas acendem e apagam simultaneamente.

Este sistema tem, em relação ao anterior, a vantagem de indicar o sinal da diferença entre as frequências do alternador e da rede. Por exemplo, ao ligar um alternador a uma rede convém que a sua frequência seja ligeiramente superior. Sendo a frequência ligeiramente superior, ao efectuar-se o paralelo o alternador vai fornecer à rede uma certa potência. Sendo a frequência inferior, o alternador vai receber da rede uma certa potência, o

que vai sobrecarregar a rede e pode ser inconveniente para a máquina motriz que acciona o alternador.

Há, evidentemente, que ter o cuidado de averiguar como está ligado determinado sistema de ligação⁽¹⁾. Por exemplo uma indicação de sequência de fases correcta num sistema de "extinção simultânea" é igual a uma indicação de sequência de fases incorrecta num sistema de "fogos girantes".

Outro sistema usado, normalmente como auxiliar do anterior, para permitir com mais precisão o instante em que as duas estrelas de tensão estão em fase, é ligar em paralelo com a lâmpada que funciona à extinção um voltímetro com uma escala não inferior ao dobro da tensão por fase mas com grande sensibilidade na vizinhança do zero. A indicação do voltímetro varia entre zero e o dobro da tensão por fase (aproximadamente), marcando zero no instante em que as tensões estão em fase.

Outro sistema, para o paralelo de alternadores, é recorrer a um sincronoscópio, que é essencialmente um instrumento de medida com um ponteiro (ou outro dispositivo indicador) que indica a defasagem entre as duas estrelas de tensões. A posição angular do ponteiro "indica" a diferença de fase entre as duas estrelas de tensão. O período do movimento do ponteiro é o inverso da diferença entre as duas frequências. O sentido do movimento do ponteiro indica o sentido da diferença das frequências da rede e do alternador. Quando as duas tensões forem iguais, o movimento do ponteiro for suficientemente lento o sentido conveniente, e a defasagem for nula, deve efectuar-se o paralelo.

Por o sistema móvel do sincrosópio estar em geral previsto apenas para movimentos lentos, o instrumento só deve ser ligado quando as duas frequências forem bastante próximas. Por este motivo, medem-se previamente as duas frequências por intermédio de um ou dois frequencímetros.

(1) Além dos dois métodos indicados, há outros, também baseados em três lâmpadas, embora os dois mencionados sejam os mais correntes.

Principalmente quando se pretende manobras bastante rápidas, usa-se a sincronização automática, fundada num dispositivo que "meça" as tensões, as diferenças entre as frequências e a defasagem, e quando se esteja em condições de fazer o paralelo, dê ordem de fecho ao interruptor.

Desligação de um alternador em paralelo com uma rede

Para desligar um alternador de uma rede convém, para evitar perturbação na rede e, nalguns casos, para evitar o risco de embalamento do grupo, actuar no regulador de velocidade e no circuito de excitação, por forma que a potência activa e a potência reactiva trocadas entre o alternador e a rede sejam aproximadamente nulas, desligando-se então o paralelo.

Manobra de arranque dos motores síncronos

O estudo que efectuamos do funcionamento dos motores síncronos, à velocidade de sincronismo, não é aplicável durante o regime transitório em que o motor não se encontra à velocidade de sincronismo.

Uma das maneiras de "arrancar" um motor síncrono é recorrer a um motor auxiliar, montado no mesmo veio, com o qual se leva a máquina à velocidade de sincronismo, efectuando-se depois o paralelo com a rede, tal como se se tratasse de um alternador.

Uma vez feito o paralelo, desliga-se o motor auxiliar e aplica-se a carga ao motor síncrono. Actuando no circuito de excitação, regula-se a potência reactiva trocada entre o motor e a rede.

Este processo de arranque não origina qualquer perturbação apreciável na rede, mas tem o inconveniente de exigir o motor de lançamento e os dispositivos de sincronização, só sendo frequente em máquinas de grande potência.

A solução mais frequente baseia-se nas propriedades desta máquina em regime diferente do de sincronismo.

Suponha-se que aos enrolamentos do estator se aplica um sistema trifásico de tensões.

Por razões idênticas às que se estudaram no funcionamento dos motores de indução, estando o rotor a uma velocidade diferente da de sincronismo, o "campo girante" associado às correntes no estator não roda em sincronismo com o rotor. Se a máquina for provida de um "enrolamento amortecedor" o movimento relativo do "campo girante" em relação ao rotor vai originar f.e.m. no enrolamento amortecedor e portanto correntes. Há um binário que actua o rotor, associado a essas correntes e a esse campo girante, no sentido do campo girante se a velocidade for inferior à de sincronismo, binário que é utilizado para acelerar o rotor até próximo da velocidade de sincronismo.

Estando o rotor a uma velocidade diferente da de sincronismo, o campo girante associado às correntes no estator (campo girante que "roda" à velocidade de sincronismo) vai originar f.e.m. no enrolamento indutor. Pelo menos para velocidades muito diferentes da de sincronismo, designadamente estando o rotor parado, dado o elevado número de espiras do enrolamento indutor, essa f.e.m. pode ser muito elevada. Se o enrolamento indutor estiver interrompido, a tensão no enrolamento indutor pode ser muito elevada e muito perigosa, quer sob o ponto de vista de isolamento, quer sob o ponto de vista de segurança. Demais não seja que por este motivo, é usual, durante a primeira fase do arranque, curto-circuitar o enrolamento indutor, directamente ou por intermédio de uma resistência.

Por outro lado, estando o enrolamento indutor em circuito fechado, e rodando o rotor a uma velocidade diferente da de sincronismo, será sede de correntes "associadas" ao campo girante "associado" às correntes no estator. Há assim um binário, que actua o rotor no sentido do campo girante, binário que é em geral muito reduzido quando o estator está parado, mas que é apreciável quando a velocidade do rotor se aproxima da velocidade de sincronismo.

Resumindo, tem-se, portanto, que, aplicando uma tensão trifásica aos enrolamentos do estator, por exemplo com o rotor curto-circuitado, o rotor é actuado por um binário no sentido do campo girante.

Deve notar-se que, no período transitório correspondente ao arranque, se verificam correntes muito superiores aos valores em funcionamento normal, que, designadamente, provocam importantes esforços electrodinâmicos nos condutores e aquecimento apreciável dos enrolamentos ⁽¹⁾ (especialmente no caso de arranques sucessivos ou com pequenos intervalos), factos que é essencial ter em conta ao projecto dos motores.

Na fig. 2.55 representa-se, a título de exemplo, a relação entre este binário e a velocidade do rotor, tomando para unidade de velocidade a velocidade de sincronismo e para unidade de binário o binário nominal, na hipótese de se aplicar ao enrolamento do estator a tensão nominal.

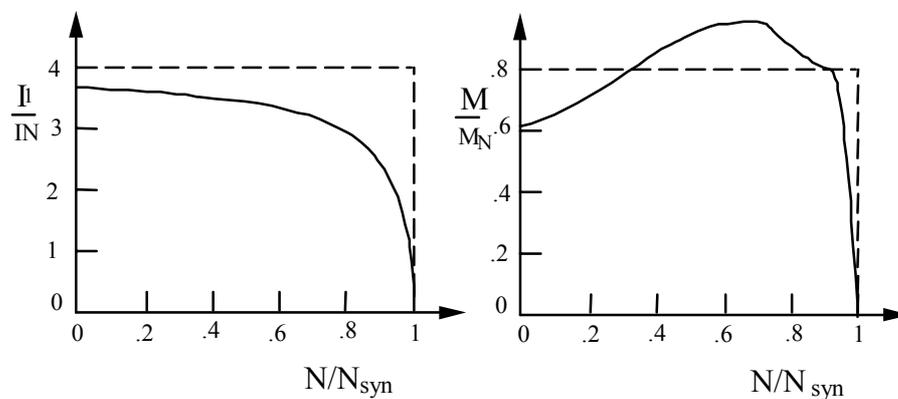


Fig.2.62

Neste exemplo, o binário de "arranque" do rotor é cerca de 60% do binário nominal. Sendo assim, o motor poderá arrancar mesmo com um binário resistente pouco inferior a 60% do nominal. Também neste exemplo, a corrente de arranque é cerca de 3.5 vezes superior à corrente nominal.

Em geral, os enrolamentos amortecedores dos motores síncronos são projectados por forma que, aplicando ao estator a tensão nominal, o binário de arranque seja da ordem de grandezas de 0,5 a 2 vezes o binário nominal.

(1) Os esforços electrodinâmicos e as potências dissipadas, no regime transitório, podem ser algumas dezenas de vezes superiores aos valores correspondentes em regime normal de funcionamento.

Portanto, aplicando por exemplo ao estator a tensão nominal e curto-circuitado o rotor, mesmo com o rotor carregado, o rotor é acelerado até uma velocidade tal que a soma dos binários que actuam o rotor é nula⁽¹⁾. Esta velocidade de equilíbrio é em geral próxima da velocidade de sincronismo. Sendo esta velocidade próxima da de sincronismo, a f.e.m. induzida no enrolamento indutor é relativamente pequena.

Se nesta altura se aplicar ao enrolamento indutor uma tensão contínua, verifica-se, em geral, que o motor tende a entrar em sincronismo com a rede. O binário resistente máximo para o qual se dá a sincronização depende da posição relativa do rotor em relação ao campo girante associado à corrente do estator no instante em que se aplica tensão ao motor. Tem em geral variações da ordem 1/2 para diferentes valores da "posição angular" do rotor em relação ao referido campo girante, no instante em que se aplica a tensão contínua ao enrolamento do "indutor".

O inconveniente deste processo de arranque é o elevado valor da corrente trocada entre o motor e a rede durante o arranque, corrente que é em geral bastante superior à corrente nominal.

Por este motivo, usam-se em geral para a fase inicial do arranque (durante a qual o rotor é acelerado até uma velocidade próxima da de sincronismo) processos um tanto diferentes, por exemplo arranque com autotransformador e arranque estrela-triângulo.

Por exemplo, estes dois métodos permitem reduzir a corrente absorvida à rede durante o arranque, reduzindo na mesma proporção o binário electromagnético que actua o rotor durante o arranque. Outro

⁽¹⁾ Para máquinas de pólos salientes, à velocidade de sincronismo pode ter-se, com tensão de excitação nula, um binário não nulo. Nesse caso, para arranque com cargas reduzidas, pode obter-se a "sincronização" antes de aplicar tensão de excitação ao enrolamento indutor. Nota-se que essa sincronização se pode verificar para duas posições eléctricas desfasadas de um ângulo eléctrico do rotor igual a π , podendo uma delas ser "oposta" à que "corresponde" ao sentido da tensão aplicada posteriormente ao enrolamento

processo, também frequentemente usado, é intercalar em série com o enrolamento do estator, durante o arranque, uma reactância.

Estes processos são análogos aos métodos correspondentes de arranque dos motores de indução, sendo estudados no capítulo respectivo com mais pormenor.

A fase final do arranque, em que se aplica tensão contínua ao enrolamento de excitação, à parte a variante, é comum aos diversos processos de arranque dos motores síncronos.

Manobra dos motores síncronos em paralelo com uma rede

Dentro dos limites de estabilidade, e para manobras lentas actuando-se na carga do motor, varia correspondentemente a potência pedida por este motor à rede.

Actuando no circuito de excitação, regula-se a potência reactiva trocada entre o motor e a rede. Deve-se notar que para uma determinada potência pedida pelo motor á rede, o ângulo de carga depende do nível de excitação sendo mais baixos para valores mais elevados de excitação. Quando se baixa o valor da corrente de excitação de uma forma acentuada corre-se o risco de aumentar o ângulo de carga de modo a sair-se da zona de estabilidade.

A manobra de desligar um motor de uma rede não oferece em geral quaisquer problemas. Para que a perturbação seja mínima para a rede, convém que a potência absorvida pelo motor seja mínima e que a potência reactiva trocada com a rede seja nula.

de excitação. Se tal suceder, ao aplicar essa tensão verifica-se uma perturbação correspondente a uma variação de π do ângulo eléctrico do rotor.

8. Sistemas de excitação. Esquemas de ligação

Para alimentação do circuito de excitação das máquinas síncronas, há necessidade de energia em corrente contínua, interessando em geral poder regular a corrente no circuito de excitação.

Dispondo-se de uma fonte de energia de corrente contínua a tensão constante, se se montar em série com o enrolamento indutor uma resistência variável R_c , modificando o valor desta resistência tem-se possibilidade de regular a corrente de excitação⁽¹⁾ Fig. 2.63.

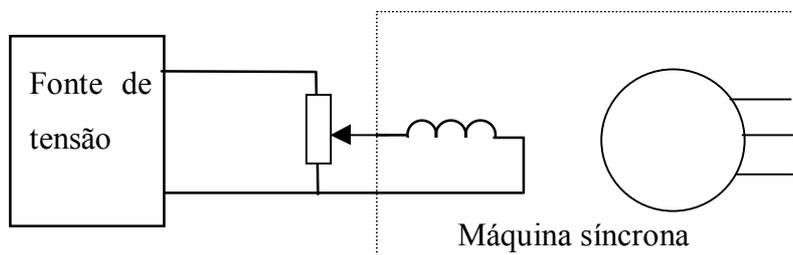


Fig. 2.63

No entanto, é frequente não se dispor de uma rede a tensão contínua. Por outro lado, a utilização desta rede em corrente contínua torna o funcionamento das máquinas síncronas dependente desta rede. Uma avaria nesta rede origina a impossibilidade de funcionamento da máquina síncrona. O uso de resistência de campo tem também o inconveniente de impossibilitar o uso de sistemas de controlo automático.

Desta forma, quando não se disponha de uma rede em tensão contínua ou se queira reduzir ao mínimo a possibilidade de avaria, uma das soluções normais é equipar cada máquina síncrona com um sistema gerador de corrente contínua privativo. Uma das soluções mais frequentes é montar no

(1) É normal usar-se para o circuito de excitação dos alternadores uma resistência de campo com "terceiro ponto" ou "montagem anti-indutiva", tal como acontece nos geradores de corrente contínua.

veio da própria máquina síncrona um gerador de corrente contínua - excitatriz - por exemplo com excitação em derivação, que fornece energia em corrente contínua ao circuito indutor da máquina síncrona. A corrente de excitação pode ser regulada, por exemplo, intercalando em série com o circuito indutor da máquina síncrona uma resistência variável, ou actuando na resistência de campo do gerador de corrente contínua (fig. 2.64).

No entanto, a gama de regulação da corrente de excitação da máquina síncrona é frequentemente bastante extensa.

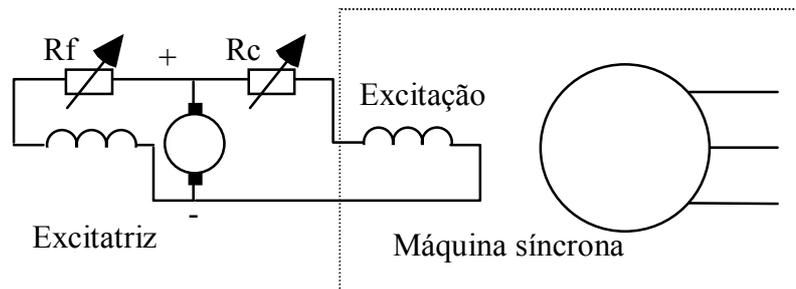


Fig. 2.64

No caso de se usar para regulação da corrente de excitação uma resistência em série com o enrolamento indutor, a energia dissipada nesta resistência pode ser bastante elevada, sendo portanto apreciável o valor da energia dissipada e o custo da resistência. Por outro lado, no caso de geradores de excitação em derivação de construção normal, funcionando com uma velocidade constante, a gama de regulação de tensão é relativamente reduzida o que não é suficiente para muitas máquinas síncronas.

Nalguns casos, para aumentar a gama de regulação de tensão, constroem-se excitatrizes com a característica magnética com acentuada curvatura. Mais frequentemente, no caso de máquinas de grande potência, monta-se no veio da excitatriz outro gerador de corrente contínua - excitatriz

(2) A solução da excitatriz piloto tem ainda, em geral, a vantagem de conduzir a uma "resposta" mais rápida do sistema de excitação a perturbações bruscas de carga ou de tensão da máquina síncrona, o que é em geral vantajoso.

piloto - que fornece a energia para o circuito de excitação da excitatriz principal, que funciona assim como gerador de excitação independente.

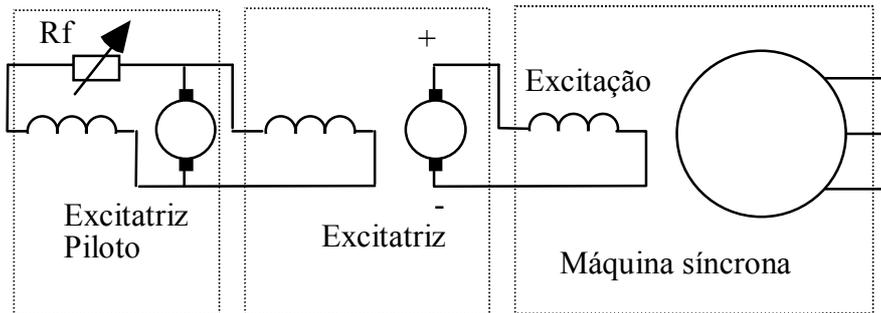


Fig. 2.65

A excitatriz piloto funciona a tensão aproximadamente constante. A potência dissipada na resistência de campo da excitatriz principal é suficientemente pequena para que não constitua problema grave⁽²⁾⁽³⁾.

A solução apontada não é única. Outra, também frequente, é ligar aos terminais do induzido um motor de corrente alternada, montado noutra veio, que acciona a excitatriz e a excitatriz piloto.

Ainda dentro das soluções baseadas em máquinas de corrente contínua para alimentação da excitação das máquinas síncronas, são bastante frequentes esquemas baseados em máquinas de correntes contínua "especiais" (designadamente dos tipos usualmente designados por "rototrol" e "amplidine") que são caracterizadas por uma resposta muito "rápida" e com grande ampliação de potência a corrente ou correntes num ou mais enrolamento de comando, que podem ser obtidas por forma a facilitar, por exemplo, uma regulação automática de tensão sem necessidade de variar resistências de campo.

Outras soluções têm como base enrolamentos de um "alternador auxiliar" com enrolamentos do induzido montados no mesmo veio do

(3) A excitatriz piloto e a excitatriz têm, muito frequentemente, além dos enrolamentos de excitação em derivação, enrolamentos de excitação em série, o que, designadamente, melhora a "resposta" do sistema de excitação a perturbações bruscas de carga ou de tensão na máquina síncrona.

alternador, com rectificadores estáticos montados no rotor e ligados por forma que a tensão "rectificada" seja aplicada ao enrolamento de excitação do alternador principal. Actuando na corrente de excitação do alternador auxiliar, regula-se a tensão no induzido correspondente e portanto a tensão de excitação do alternador principal. Esta solução tem a vantagem de dispensar anéis e escovas e evitar contacto galvânico entre os circuitos do rotor e o exterior. A tensão de excitação do alternador auxiliar pode ser obtida a partir de uma fonte auxiliar (eventualmente alternada, com rectificação) ou da tensão do alternador principal, rectificada, ou da tensão da rede (no caso de motores).

Especialmente no caso de motores síncronos e de alternadores de potências relativamente pequenas, para dispensar as máquinas de corrente contínua auxiliares do circuito de excitação, que são caras e de manutenção mais delicada, recorre-se, para alimentar o enrolamento de excitação, à rectificação da tensão da rede (no caso dos motores) ou da própria máquina (no caso dos alternadores), sendo neste caso, para que se dê a autoexcitação, essencial o fluxo remanescente.

No caso de máquinas de grande potência, usam-se muito frequentemente sistemas de regulação automática, procurando-se, por exemplo, que, dentro de determinado domínio de funcionamento, a tensão aos terminais se mantenha constante. Os sistemas de regulação, que, por vezes, são relativamente complexos, têm que ser considerados em conjunto para se analisar o comportamento das máquinas síncronas em regime transitório.

Questões sobre o capítulo 2

Questão N° 1: Dois alternadores trifásicos idênticos de 60MVA, 13.2kV, 50Hz, encontram-se ligados em paralelo e fornecem à rede uma potência total de 80MW com $\cos\phi=-0.8$ e $\sin\phi=0.6$. A sua reactância síncrona vale 0,97 pu e a sua resistência estatórica é desprezável.

Determinar a potência aparente, a corrente, a força electromotriz em vazio, o $\cos\phi$ e o ângulo de carga δ de cada máquina, quando a potência activa se encontrar repartida igualmente entre estas duas máquinas. Sabe-se que uma das máquinas se encontra excitada com uma corrente de excitação a que corresponde uma força electromotriz em vazio igual a 1.74 pu.

Questão N° 2: Um turbo-alternador trifásico, de reactância síncrona igual a 8Ω , é percorrido por uma corrente de induzido de 200A sob um factor de potência unitário e tensão de 11kV.

a) Sem modificar a abertura do distribuidor da turbina, aumenta-se de 30% a corrente de excitação. Determinar os novos valores de corrente e de factor de potência.

b) Sem modificar a excitação aumenta-se gradualmente a abertura do distribuidor até à perda de sincronismo. A que potência, e a que factor de potência se efectuará a perda de sincronismo?

c) Sem modificar a abertura do distribuidor da turbina determine o valor máximo de potência reactiva que a máquina pode absorver da rede.

Exercícios de Revisão

I

Um motor síncrono tem as características seguintes:

$P_n=10\text{MW}$, $U_N=6\text{ kV}$, $p=5$, pólos lisos, $r_a=2\%$, $X_l=20\%$ 3 fases

a sua característica magnética pode ser dada por

$$F_{mm} = K_1 \varphi + K_3 \varphi^3 \quad \begin{array}{l} K_1= 2650 \\ K_3= 1227 \end{array}$$

Sabe-se que os enrolamentos do induzido desta máquina são de dupla camada com 3 ranhuras por pólo e por fase e com um ângulo de encurtamento igual ao passo de ranhura. O número de espiras por ranhura é unitário. Admite-se que para o indutor se tem $F_{mm}=K_f I_f$ com $K_f=15$.

O motor encontra-se a fornecer a sua carga nominal sob condições óptimas de exploração.

1. Qual o valor da corrente do induzido.
2. Qual a F_{mm} provocada pelos enrolamentos do induzido.
3. Qual a F_{mm} total.
4. Determine a corrente de excitação.

5. O motor foi desligado da máquina sem que se tivesse alterado a corrente de excitação. Qual será a tensão aos terminais da máquina nos instantes imediatos.

Bibliografia:

- 1. Máquinas Eléctricas.** , M. P. Kostenko, L. M. Piotrovski,
Editorial MIR Moscovo
- 2. The Performance and Design og Alternating Current Machines** M. G. Say , Pitman Paperbacks
- 3. Máquinas Eléctricas y sus aplicaciones** Hindmarsh
URMO s. a. ediciones
- 4. Máquinas Eléctricas** , António Carrisso
edição da AEIST
- 5. Máquinas Eléctricas** , Carlos Portela
- 6. Machines Electriques**, J. Chatelain
Editions Dunod
- 7. Électrotechnique et Machines Electriques** B. Saint Jean
Éditions Eyrolles, Éditions Lidec
- 8. Máquinas Síncronas**, Rubens Guedes Jordão
Livros técnicos e científicos editora, S.A.
Editora da Universidade de São Paulo
- 9. Máquinas Eléctricas**, A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Alexander Kusko
Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA
- 10. Teoría, Cálculo y Construcción de las Máquinas de corriente alterna asincrónicas**
Volume 6 da coleção ETE Editorial Labor, S. A.
- 11. Electromagnetics**, Jonhn D. Kraus, Keith R. Craver
Editora McGraw-Hill