

Geradores síncronos

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

- Compreender o circuito equivalente de um gerador síncrono.
 - Saber desenhar os diagramas fasoriais de um gerador síncrono.
 - Conhecer as equações de potência e conjugado de um gerador síncrono.
 - Saber como deduzir as características de uma máquina síncrona a partir de medidas (CAV e CCC).
 - Compreender como a tensão de terminal varia com a carga em um gerador síncrono que opera isolado. Saber calcular a tensão de terminal sob diversas condições de carga.
 - Compreender as condições requeridas para colocar em paralelo dois ou mais geradores síncronos.
 - Compreender o procedimento para colocar em paralelo geradores síncronos.
 - Compreender o funcionamento em paralelo de geradores síncronos, dentro de um sistema de potência muito grande (ou barramento infinito).
 - Compreender o limite de estabilidade estática de um gerador síncrono e por que o limite de estabilidade transitória é inferior ao limite de estabilidade estática.
 - Compreender as correntes transitórias que circulam em condições de falta (curto-circuito).
 - Compreender as especificações nominais dos geradores síncronos e que condições impõem limites a cada valor nominal.
-

Geradores síncronos ou *alternadores* são máquinas síncronas utilizadas para converter potência mecânica em potência elétrica CA. Este capítulo explora o funcionamento dos geradores síncronos, seja quando operam isoladamente, seja quando operam em conjunto com outros geradores.

4.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS GERADORES SÍNCRONOS

Em um gerador síncrono, um campo magnético é produzido no rotor. Durante o projeto do rotor, para obter esse campo magnético, pode-se optar pelo uso de um ímã permanente ou de um eletroímã, obtido pela aplicação de uma corrente CC a um enrolamento desse rotor. O rotor do gerador é então acionado por uma máquina motriz primária, que produz um campo magnético girante dentro da máquina. Esse campo magnético girante induz um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos de estator do gerador.

Duas expressões comumente usadas para descrever os enrolamentos de uma máquina são *enrolamentos de campo* e *enrolamentos de armadura*. Em geral, a expressão *enrolamentos de campo* é aplicada aos enrolamentos que produzem o campo magnético principal da máquina e a expressão *enrolamentos de armadura* é aplicada aos enrolamentos nos quais é induzida a tensão principal. Nas máquinas síncronas, os enrolamentos de campo estão no rotor, de modo que as expressões *enrolamentos de rotor* e *enrolamentos de campo* são usadas com o mesmo sentido. De modo semelhante, as expressões *enrolamentos de estator* e *enrolamentos de armadura* são também usadas com o mesmo sentido.

O rotor de um gerador síncrono é essencialmente um grande eletroímã. Os polos magnéticos do rotor podem ser construídos de duas formas: salientes ou não salientes. O termo *saliente* significa “protuberante” ou “que se projeta para fora” e um *polo saliente* é um polo magnético que se sobressai radialmente do rotor. Por outro lado, um *polo não saliente* é um polo magnético com os enrolamentos encaixados e nivelados com a superfície do rotor. Um rotor com polos não salientes está mostrado na Figura 4-1. Observe que os enrolamentos do eletroímã estão encaixados em fendas na superfície do rotor. Um rotor com polos salientes está mostrado na Figura 4-2. Observe que aqui os enrolamentos do eletroímã estão envolvendo o próprio polo, em vez de serem encaixados em ranhuras na superfície do rotor. Os rotores de polos não salientes são usados normalmente em rotores de dois e quatro polos, ao passo que os rotores de polos salientes são usados normalmente em rotores de quatro ou mais polos.

Como o rotor está sujeito a campos magnéticos variáveis, ele é construído com lâminas delgadas para reduzir as perdas por corrente parasita.

Se o rotor for um eletroímã, uma corrente CC deverá ser fornecida ao circuito de campo desse rotor. Como ele está girando, um arranjo especial será necessário para levar a potência CC até seus enrolamentos de campo. Há duas abordagens comuns para fornecer a potência CC:

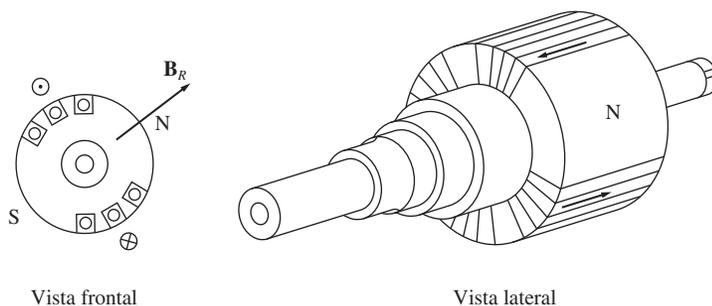


FIGURA 4-1

O rotor de dois polos não salientes de uma máquina síncrona.

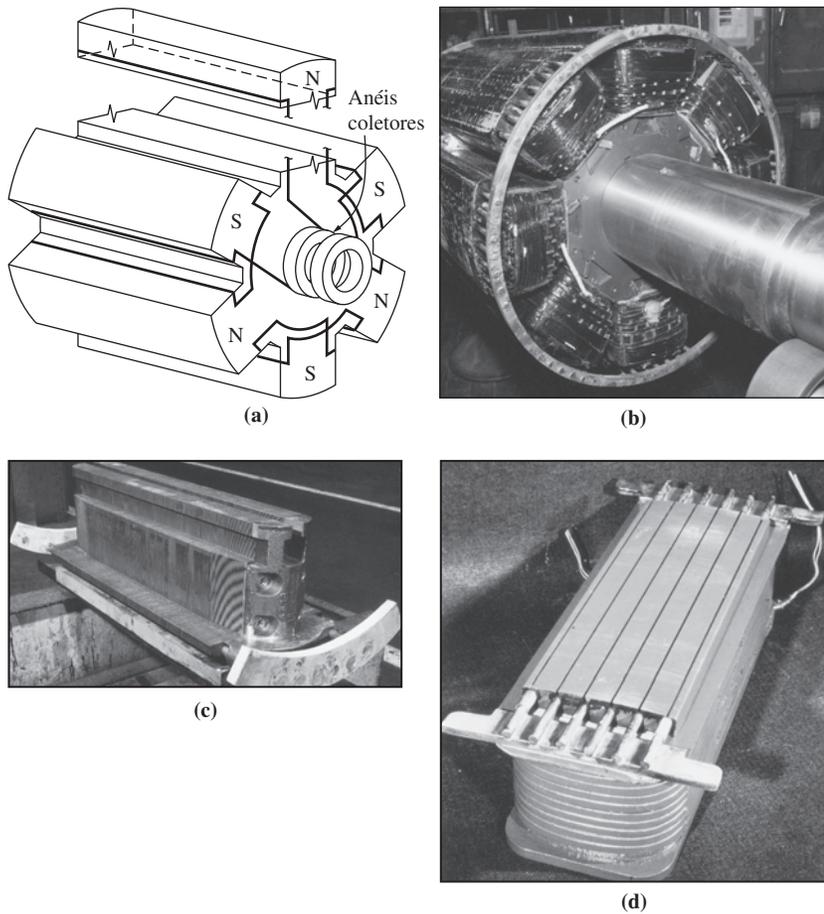


FIGURA 4-2

(a) Rotor de seis polos salientes de uma máquina síncrona. (b) Fotografia de rotor de oito polos salientes de uma máquina síncrona, podendo-se ver os enrolamentos dos polos individuais do rotor. (Cortesia da General Electric Company.) (c) Fotografia de um único polo saliente de um rotor, sem que os enrolamentos de campo tenham sido colocados no lugar. (Cortesia da General Electric Company.) (d) Um único polo saliente, mostrado depois que os enrolamentos de campo já foram instalados, mas antes que ele tenha sido montado no rotor. (Cortesia da Westinghouse Electric Company.)

1. A partir de uma fonte CC externa, forneça a potência CC para o rotor por meio de escovas e anéis coletores (ou deslizantes).
2. Forneça a potência CC a partir de uma fonte de potência CC especial, montada diretamente no eixo do gerador síncrono.

Anéis coletores (ou deslizantes) são anéis de metal que envolvem completamente o eixo de uma máquina, mas estão isolados deste. Cada extremidade do enrolamento CC do rotor é conectada a um dos dois anéis coletores no eixo da máquina síncrona e uma escova estacionária está em contato com cada anel coletor. Uma “escova” é um bloco de carbono semelhante a grafite que conduz eletricidade facilmen-

te, mas que tem um atrito muito baixo. Desse modo, a escova não desgasta o anel deslizando. Se o terminal positivo de uma fonte de tensão CC for conectado a uma escova e o terminal negativo for conectado à outra, então a mesma tensão CC será aplicada continuamente ao enrolamento de campo, independentemente da posição angular ou da velocidade do rotor.

Anéis coletores e escovas criam alguns problemas quando são usados para fornecer potência CC aos enrolamentos de campo de uma máquina síncrona. Eles aumentam o grau de manutenção exigida pela máquina, porque o desgaste das escovas deve ser verificado regularmente. Além disso, a queda de tensão nas escovas pode ser a causa de significativas perdas de potência em máquinas que operam com grandes correntes de campo. Apesar desses problemas, os anéis coletores e as escovas são usados em todas as máquinas síncronas de menor porte, porque nenhum outro método de fornecimento da corrente CC de campo é efetivo do ponto de vista do custo.

Em geradores e motores de maior porte, *excitatrizes sem escovas* são usadas para fornecer a corrente CC de campo para a máquina. Uma excitatriz sem escovas é um pequeno gerador CA com seu circuito de campo montado no estator e seu circuito de armadura montado no eixo do rotor. A saída trifásica do gerador da excitatriz é convertida em corrente contínua por meio de um circuito retificador trifásico que também está montado no eixo do gerador. A seguir, essa corrente contínua alimenta o circuito CC principal de campo. Controlando a baixa corrente de campo CC do

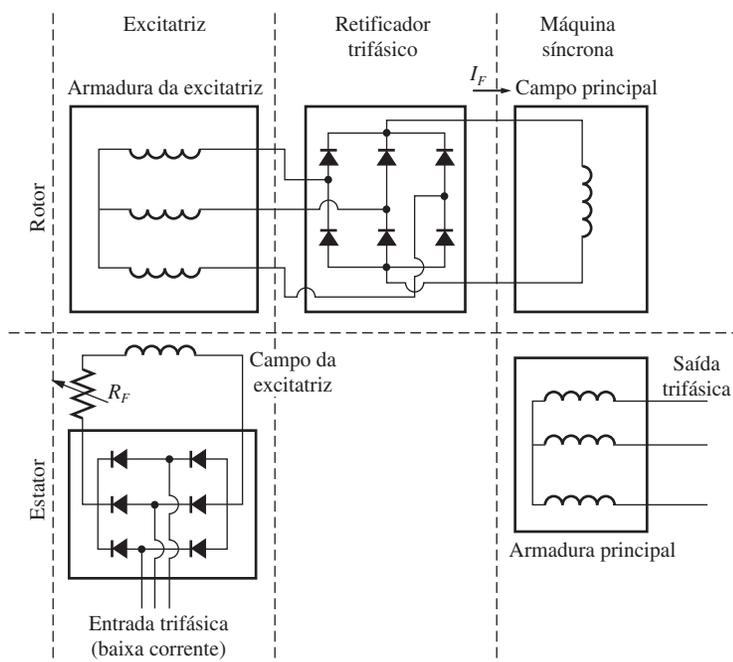


FIGURA 4-3

Um circuito de excitatriz sem escovas. Uma corrente trifásica de baixa intensidade é retificada e utilizada para alimentar o circuito de campo da excitatriz, o qual está localizado no estator. A saída do circuito de armadura da excitatriz (no rotor) é então retificada e usada para fornecer a corrente de campo da máquina principal.

gerador da excitatriz (localizado no estator), é possível ajustar a corrente de campo na máquina principal *sem usar escovas nem anéis coletores*. Esse arranjo está mostrado esquematicamente na Figura 4-3 e um rotor de máquina síncrona com uma excitatriz sem escovas montada no mesmo eixo está mostrado na Figura 4-4. Como nunca ocorrem contatos mecânicos entre o rotor e o estator, uma excitatriz sem escovas requer muito menos manutenção do que escovas e anéis coletores.

Para tornar a excitação de um gerador *completamente* independente de quaisquer fontes de potência externas, uma pequena excitatriz piloto é frequentemente incluída no sistema. Uma *excitatriz piloto* é um pequeno gerador CA com *ímãs permanentes* montados no eixo do rotor e um enrolamento trifásico no estator. Ela produz a potência para o circuito de campo da excitatriz, a qual por sua vez controla o circuito de campo da máquina principal. Se uma excitatriz piloto for incluída no eixo do gerador, *nenhuma potência elétrica externa* será necessária para fazer funcionar o gerador (veja Figura 4-5).

Muitos geradores síncronos, que contêm excitatrizes sem escovas, também possuem escovas e anéis coletores. Desse modo, uma fonte auxiliar de corrente de campo CC também está disponível para o caso de emergências.

O estator de um gerador síncrono já foi descrito no Capítulo 3 e mais detalhes dos aspectos construtivos do estator podem ser encontrados no Apêndice B. Os estatores de geradores síncronos são normalmente feitos de bobinas de estator pré-moldadas em um enrolamento de camada dupla. O enrolamento em si é distribuído e encurtado de modo a reduzir o conteúdo das harmônicas presentes nas tensões e correntes de saída, como está descrito no Apêndice B.

Um diagrama em corte de uma máquina síncrona completa de grande porte está mostrado na Figura 4-6. Esse desenho mostra um rotor de oito polos salientes, um estator com enrolamentos distribuídos de dupla camada e uma excitatriz sem escovas.

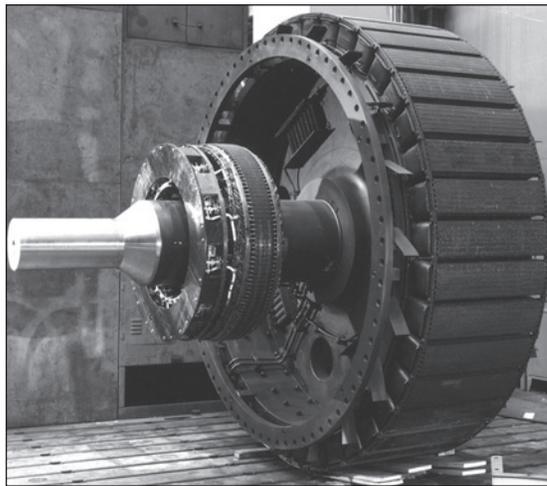


FIGURA 4-4

Fotografia de um rotor de máquina síncrona, com uma excitatriz sem escovas montada no mesmo eixo. Observe a eletrônica de retificação visível próxima da armadura da excitatriz. (Cortesia da Westinghouse Electric Company.)

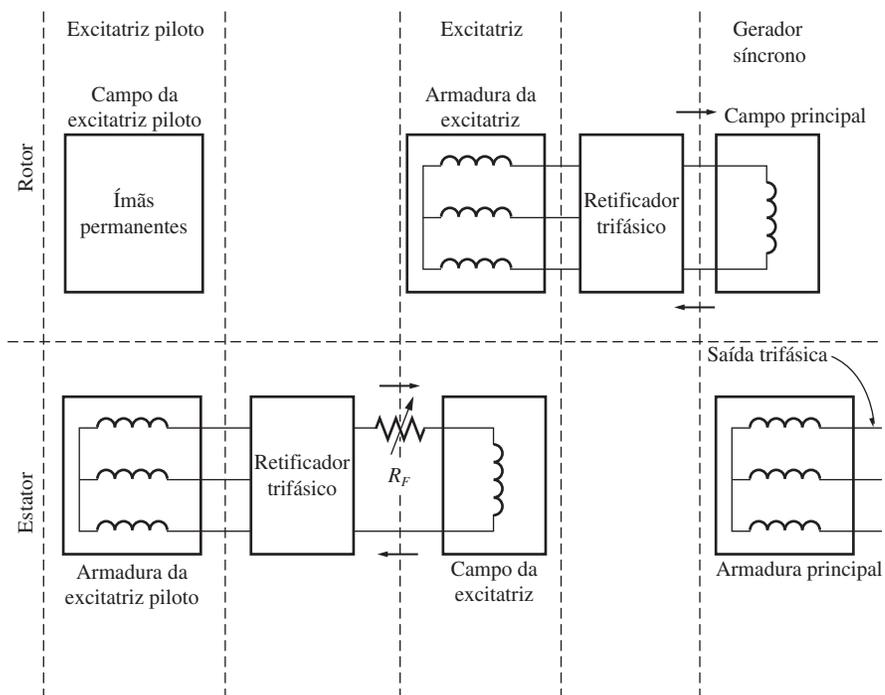


FIGURA 4-5 Esquema de excitação sem escovas que inclui uma excitatriz piloto. Os ímãs permanentes da excitatriz piloto produzem a corrente de campo da excitatriz, a qual por sua vez produz a corrente de campo da máquina principal.

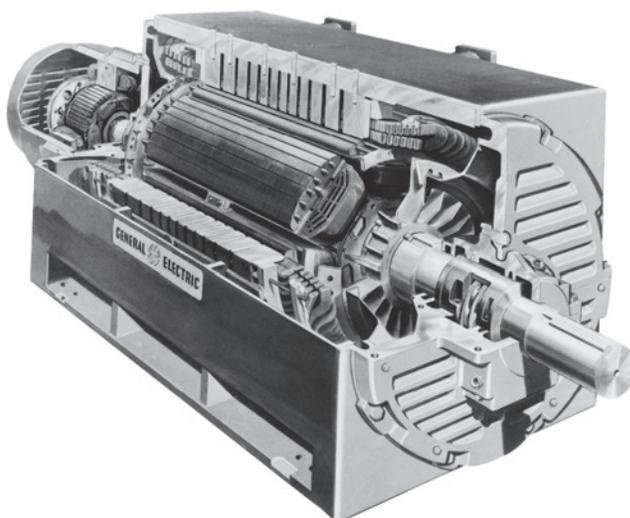


FIGURA 4-6 Diagrama em corte de uma máquina síncrona de grande porte. Observe a construção dos polos salientes e a excitatriz montada no eixo. (Cortesia da General Electric Company.)

4.2 A VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO

Os geradores síncronos são por definição *síncronos*, significando que a frequência elétrica produzida está sincronizada ou vinculada à velocidade mecânica de rotação do gerador. O rotor de um gerador síncrono consiste em um eletroímã ao qual aplica-se uma corrente contínua. O campo magnético do rotor aponta em qualquer direção, na qual o rotor foi posicionado ao ser girado. Agora, a taxa de rotação dos campos magnéticos da máquina está relacionada com a frequência elétrica do estator por meio da Equação (3-34):

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (3-34)$$

em que f_{se} = frequência elétrica, em Hz

n_m = velocidade mecânica do campo magnético, em rpm (igual à velocidade do rotor nas máquinas síncronas)

P = número de polos

Como o rotor gira com a mesma velocidade que o campo magnético, *essa equação relaciona a velocidade de rotação do rotor com a frequência elétrica resultante*. A potência elétrica é gerada em 50 ou 60 Hz, de modo que o gerador deve girar com uma velocidade fixa, dependendo do número de polos da máquina. Por exemplo, para gerar potência de 60 Hz em uma máquina de dois polos, o rotor *deve* girar a 3600 rpm. Para gerar potência de 50 Hz em uma máquina de quatro polos, o rotor *deve* girar a 1500 rpm. A taxa requerida de rotação para uma dada frequência pode sempre ser calculada a partir da Equação (3-34).

4.3 A TENSÃO INTERNA GERADA POR UM GERADOR SÍNCRONO

No Capítulo 3, o valor da tensão induzida em uma dada fase do estator foi dado por

$$E_A = \sqrt{2} \pi N_C \phi f \quad (3-50)$$

Essa tensão depende do fluxo ϕ da máquina, a frequência ou velocidade de rotação e da construção da máquina. Quando problemas de máquinas síncronas são resolvidos, essa equação é algumas vezes escrita de forma mais simples, destacando as grandezas que variam durante o funcionamento da máquina. Essa forma mais simples é

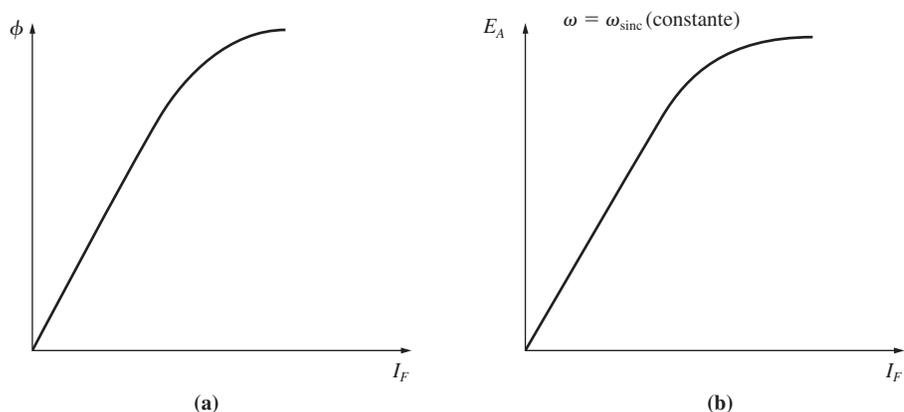
$$E_A = K \phi \omega \quad (4-41)$$

em que K é uma constante que representa os aspectos construtivos da máquina. Se ω for expressa em radianos *elétricos* por segundo, então

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (4-2)$$

ao passo que, se ω for expressa em radianos *mecânicos* por segundo, então

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (4-3)$$

**FIGURA 4-7**

(a) Gráfico de fluxo *versus* corrente de campo de um gerador síncrono. (b) A curva de magnetização do gerador síncrono.

A tensão interna gerada E_A é diretamente proporcional ao fluxo e à velocidade, mas o fluxo propriamente depende da corrente que flui no circuito de campo do rotor. A corrente I_F do circuito de campo relaciona-se com o fluxo ϕ , conforme mostra a Figura 4-7a. Como E_A é diretamente proporcional ao fluxo, a tensão gerada interna E_A relaciona-se com a corrente de campo, conforme está mostrado na Figura 4-7b. Esse gráfico é denominado *curva de magnetização* ou *característica a vazio* (CAV) da máquina.

4.4 O CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM GERADOR SÍNCRONO

A tensão E_A é a tensão gerada interna que é produzida em uma fase do gerador síncrono. Entretanto, essa tensão E_A *não* é usualmente a tensão que aparece nos terminais do gerador. De fato, o único momento em que a tensão interna E_A é igual à tensão de saída V_ϕ de uma fase é quando não há corrente de armadura circulando na máquina. Por que a tensão de saída V_ϕ de uma fase não é igual a E_A e qual é a relação entre essas duas tensões? A resposta a essas questões permite construir o modelo de circuito equivalente de um gerador síncrono.

Há uma série de fatores que são responsáveis pela diferença entre E_A e V_ϕ :

1. A distorção do campo magnético do entreferro pela corrente que flui no estator, denominada *reação de armadura*.
2. A autoindutância das bobinas da armadura.
3. A resistência das bobinas da armadura.
4. O efeito do formato dos polos salientes do rotor.

Exploraremos os efeitos dos três primeiros fatores e deduziremos um modelo de máquina a partir deles. Neste capítulo, os efeitos do formato de polo saliente sobre o funcionamento de uma máquina síncrona serão ignorados. Em outras palavras, assumiremos que neste capítulo todas as máquinas têm rotores cilíndricos ou não

salientes*. Fazendo essa suposição para o caso de máquinas com rotores de polos salientes, teremos respostas cujos valores calculados serão ligeiramente inexatos, entretanto, os erros serão relativamente pequenos. Uma discussão dos efeitos das saliências dos polos do rotor está incluída no Apêndice C.

O primeiro efeito mencionado, normalmente o maior, é a reação de armadura. Quando o rotor de um gerador síncrono é girado, uma tensão \mathbf{E}_A é induzida nos enrolamentos do estator do gerador. Se uma carga for aplicada aos terminais do gerador, uma corrente circulará. Contudo, uma corrente trifásica circulando no estator produzirá por si própria um campo magnético na máquina. Esse campo magnético de estator distorce o campo magnético original do rotor, alterando a tensão de fase resultante. Esse efeito é denominado *reação de armadura* porque a corrente de armadura (estator) afeta o campo magnético que o produziu em primeiro lugar.

Para compreender a reação de armadura, consulte a Figura 4-8. Essa figura mostra um rotor de dois polos girando dentro de um estator trifásico. Não há nenhuma carga ligada ao estator. O campo magnético \mathbf{B}_R do rotor produz uma tensão gerada internamente \mathbf{E}_A cujo valor de pico coincide com o sentido de \mathbf{B}_R . Como foi mostrado no capítulo anterior, a tensão será positiva para fora dos condutores na parte superior e negativa para dentro dos condutores na parte inferior da figura. Se não houver carga aplicada ao gerador, não haverá fluxo de corrente de armadura e \mathbf{E}_A será igual à tensão de fase \mathbf{V}_ϕ .

Agora, suponha que o gerador seja ligado a uma carga reativa atrasada. Como a carga está atrasada, o pico de corrente ocorrerá em um ângulo *após* o pico de tensão. Esse efeito está mostrado na Figura 4-8b.

A corrente que circula nos enrolamentos do estator produz um campo magnético por si própria. Esse campo magnético de estator é denominado \mathbf{B}_S e seu sentido é dado pela regra da mão direita, como mostra a Figura 4-8c. O campo magnético do estator \mathbf{B}_S produz uma tensão por si próprio no estator e essa tensão é denominada \mathbf{E}_{est} na figura.

Com duas tensões presentes nos enrolamentos do estator, a tensão total em uma fase é simplesmente a *soma* da tensão \mathbf{E}_A gerada internamente mais a tensão da reação de armadura \mathbf{E}_{est} :

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_{\text{est}} \quad (4-4)$$

O campo magnético líquido \mathbf{B}_{liq} é simplesmente a soma dos campos magnéticos do rotor e do estator:

$$\mathbf{B}_{\text{liq}} = \mathbf{B}_R + \mathbf{B}_S \quad (4-5)$$

Como os ângulos de \mathbf{E}_A e \mathbf{B}_R são os mesmos e os ângulos de \mathbf{E}_{est} e \mathbf{B}_S são os mesmos, o campo magnético resultante \mathbf{B}_{liq} coincidirá com a tensão líquida \mathbf{V}_ϕ . As tensões e correntes resultantes estão mostradas na Figura 4-8d.

O ângulo entre \mathbf{B}_R e \mathbf{B}_{liq} é conhecido como *ângulo interno ou ângulo de conjugado* Δ da máquina. Esse ângulo é proporcional à quantidade de potência que fornecida pelo gerador, como veremos na Seção 4.6.

Como podem ser modelados os efeitos da reação de armadura sobre a tensão de fase? Primeiro, observe que a tensão \mathbf{E}_{est} está em um ângulo de 90° atrás do plano de corrente máxima \mathbf{I}_A . Segundo, a tensão \mathbf{E}_{est} é diretamente proporcional à corrente \mathbf{I}_A .

* N. de T.: Também conhecidos como *rotores lisos*.

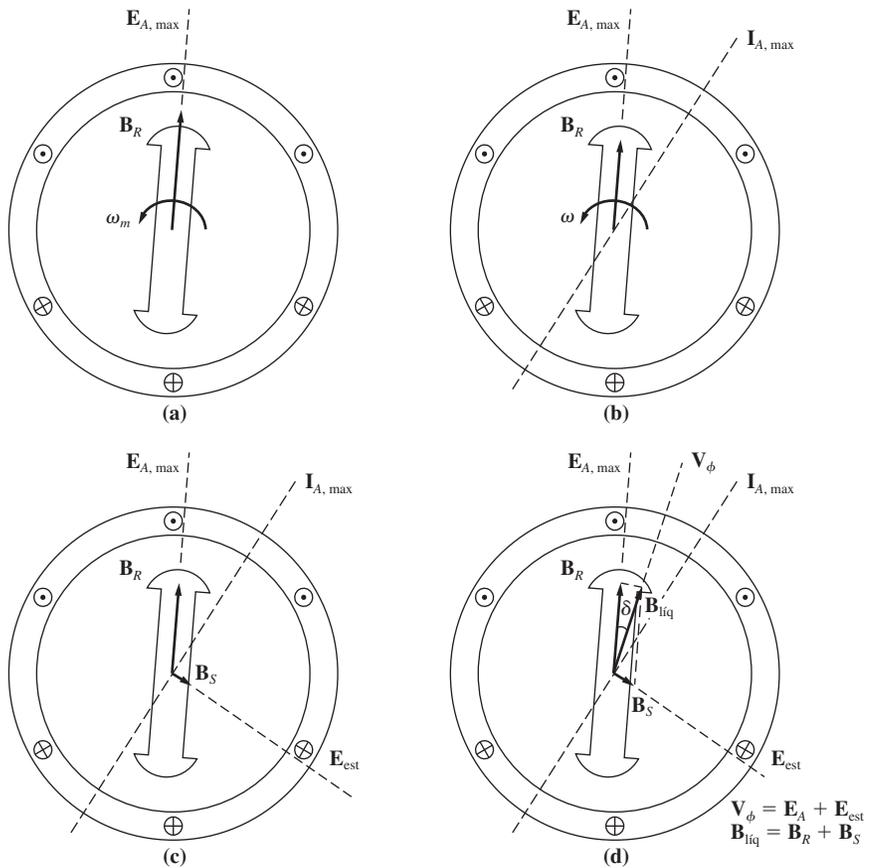


FIGURA 4-8

Desenvolvimento de um modelo de reação de armadura: (a) Um campo magnético girante produz a tensão E_A gerada internamente. (b) A tensão resultante produz um *fluxo de corrente* atrasado quando é ligada a uma carga reativa atrasada. (c) A corrente de estator produz seu próprio campo magnético B_S , o qual produz sua própria tensão E_{est} nos enrolamentos do estator da máquina. (d) O campo magnético B_S é somado a B_R , distorcendo-o e resultando B_{liq} . A tensão E_{est} é somada a E_A , produzindo V_ϕ na saída da fase.

Se X for uma constante de proporcionalidade, então a *tensão de reação de armadura* poderá ser expressa como

$$E_{est} = -jXI_A \tag{4-6}$$

A tensão em uma fase será, portanto,

$$V_\phi = E_A - jXI_A \tag{4-7}$$

Observe o circuito mostrado na Figura 4-9. A lei das tensões de Kirchhoff para esse circuito é

$$V_\phi = E_A - jXI_A \tag{4-8}$$

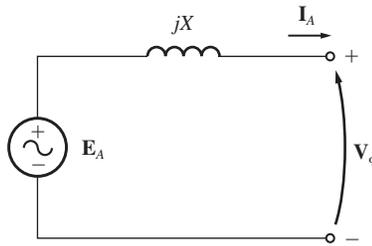


FIGURA 4-9
Um circuito simples (veja o texto).

Essa equação é exatamente a mesma que descreve a tensão da reação de armadura. Portanto, a tensão da reação de armadura pode ser modelada como um indutor em série com a tensão gerada internamente.

Além dos efeitos da reação de armadura, as bobinas do estator têm uma autoindutância e uma resistência. Se a autoindutância do estator for denominada L_A (com sua respectiva reatância denominada X_A) e a resistência do estator for denominada R_A , a diferença total entre E_A e V_ϕ será dada por

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A - jX_A\mathbf{I}_A - R_A\mathbf{I}_A \quad (4-9)$$

A autoindutância e os efeitos de reação de armadura da máquina são ambos representados por reatâncias, sendo costume combiná-las em uma única reatância, denominada *reatância síncrona* da máquina:

$$X_S = X + X_A \quad (4-10)$$

Portanto, a equação final que descreve V_ϕ é

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX_S\mathbf{I}_A - R_A\mathbf{I}_A \quad (4-11)$$

Agora, é possível construir o circuito equivalente de um gerador síncrono trifásico. O circuito equivalente completo desse gerador está mostrado na Figura 4-10. Essa figura apresenta uma fonte de tensão CC alimentando o circuito de campo do rotor, que é modelado pela indutância e a resistência em série da bobina. Em série com R_f , há um resistor ajustável R_{aj} que controla o fluxo da corrente de campo. O restante do circuito equivalente consiste nos modelos de cada fase. Cada uma delas tem uma tensão gerada internamente, com uma indutância em série X_S (consistindo na soma da reatância de armadura e a autoindutância da bobina) e uma resistência em série R_A . As tensões e correntes das três fases estão distanciadas entre si de 120° em ângulo, mas, fora isso, as três fases são idênticas.

Essas três fases podem ser ligadas tanto em Y ou em Δ , como mostra a Figura 4-11. Quando elas são ligadas em Y, a tensão de terminal V_T (que é a mesma tensão de linha a linha V_L) relaciona-se com a tensão de fase por

$$V_T = V_L = \sqrt{3}V_\phi \quad (4-12)$$

Se elas estiverem ligadas em Δ ,

$$V_T = V_\phi \quad (4-13)$$

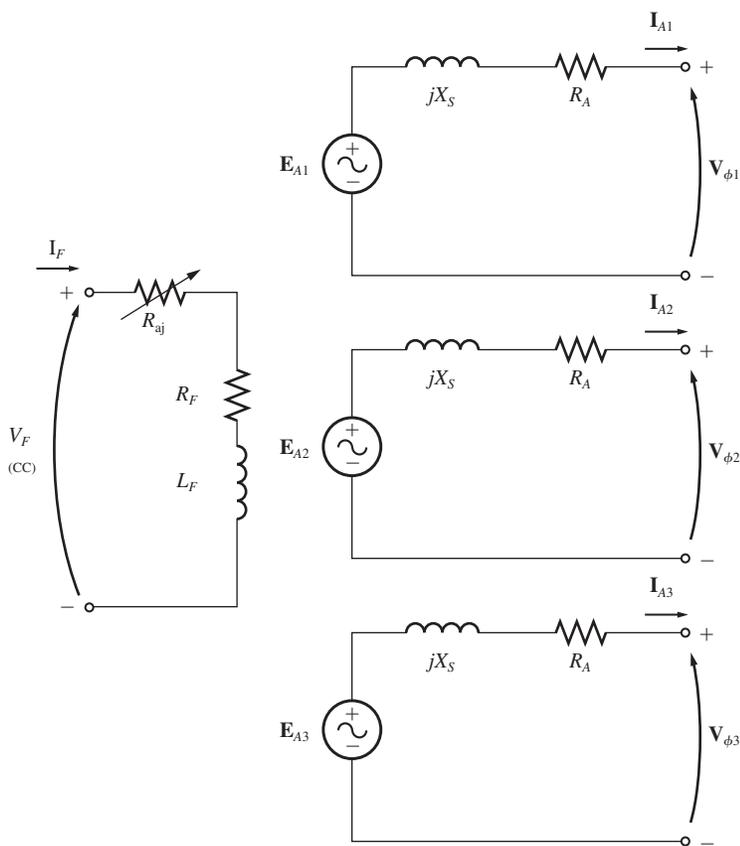


FIGURA 4-10

O circuito equivalente completo de um gerador síncrono trifásico.

O fato de as três fases de um gerador síncrono serem idênticas sob todos os aspectos, exceto em relação ao ângulo de fase, permite que seja usado normalmente um *circuito equivalente por fase*. O circuito equivalente por fase dessa máquina está mostrado na Figura 4-12. Quando o circuito equivalente por fase é usado, deve-se ter em mente um fato importante: as três fases apresentam as mesmas tensões e correntes *somente* quando as cargas a elas conectadas estão *equilibradas* (ou *balanceadas*). Se as cargas do gerador não estiverem equilibradas, então técnicas de análise mais sofisticadas serão necessárias. Essas técnicas estão além dos objetivos deste livro.

4.5 O DIAGRAMA FASORIAL DE UM GERADOR SÍNCRONO

Como as tensões de um gerador síncrono são tensões CA, elas são expressas usualmente como fasores, os quais têm módulo e ângulo. Portanto, as relações entre eles

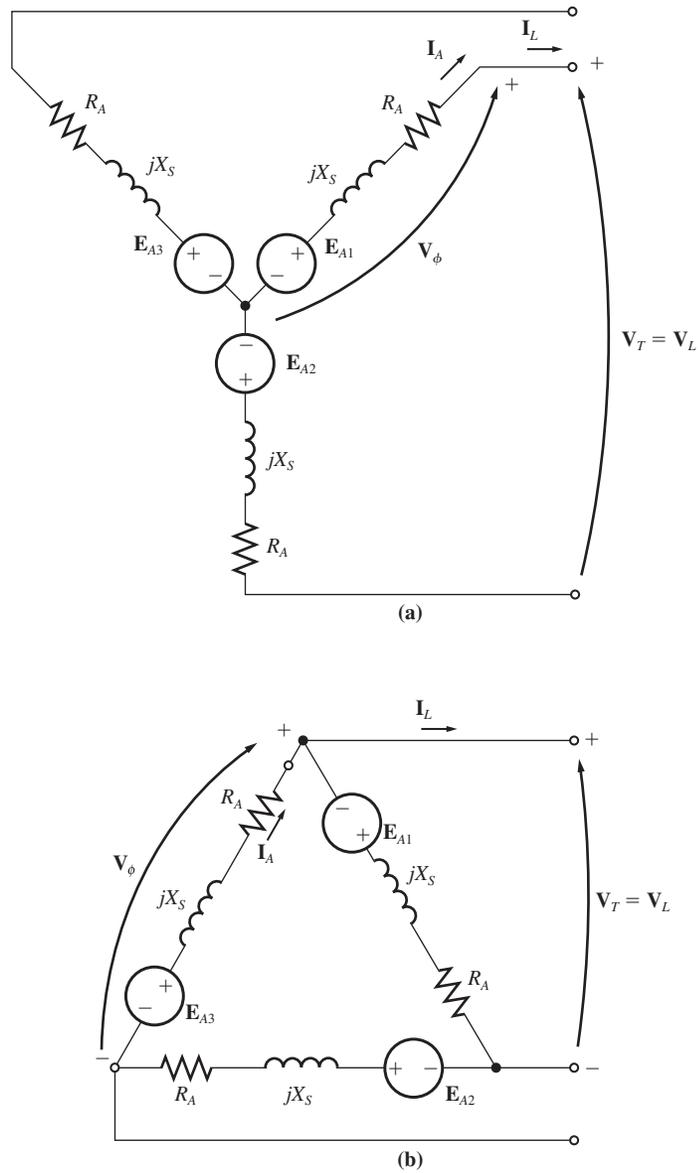


FIGURA 4-11
 O circuito equivalente do gerador ligado em (a) Y e (b) em Δ .

podem ser expressas por um gráfico bidimensional. Quando as tensões de uma fase (\mathbf{E}_A , \mathbf{V}_ϕ , $jX_S\mathbf{I}_A$ e $R_A\mathbf{I}_A$) e a corrente \mathbf{I}_A dessa fase são plotadas, resulta um gráfico denominado *diagrama fasorial* que mostra as relações entre essas grandezas.

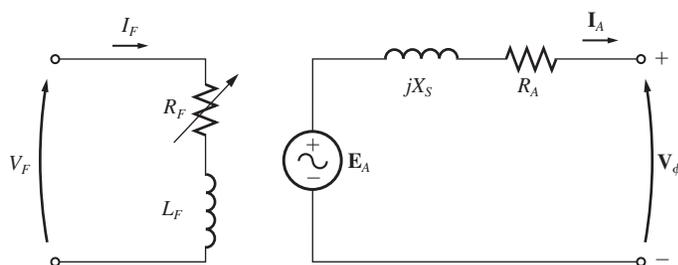


FIGURA 4-12

O circuito equivalente por fase de um gerador síncrono. A resistência interna do circuito de campo e a resistência externa variável foram combinadas em um único resistor R_F .

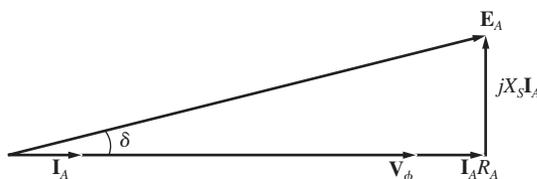


FIGURA 4-13

O diagrama fasorial de um gerador síncrono com fator de potência unitário.

Por exemplo, a Figura 4-13 mostra essas relações quando o gerador está alimentando uma carga com fator de potência unitário (uma carga puramente resistiva). A partir da Equação (4-11), vemos que a diferença entre a tensão total E_A e a tensão de terminal da fase V_ϕ é dada pelas quedas de tensão resistiva e indutiva. Todas as tensões e correntes são referidas à V_ϕ , cujo ângulo é assumido arbitrariamente como 0° .

Esse diagrama fasorial pode ser comparado com os diagramas fasoriais dos geradores que funcionam com fatores de potência atrasado e adiantado. Esses diagramas fasoriais estão mostrados na Figura 4-14. Observe que, *para uma dada tensão de fase e uma dada corrente de armadura*, é necessária uma tensão gerada interna E_A maior para as cargas atrasadas do que para as adiantadas. Portanto, quando se quer obter a mesma tensão de terminal, será necessária uma corrente de campo maior para as cargas atrasadas, porque

$$E_A = K\phi\omega \quad (4-1)$$

e ω deve ser constante para manter a frequência constante.

Alternativamente, *para uma dada corrente de campo e uma intensidade de corrente de carga*, a tensão de terminal será menor com cargas atrasadas e maior com cargas adiantadas.

Nas máquinas síncronas reais, a reatância síncrona é normalmente muito maior do que a resistência de enrolamento R_A , de modo que R_A é frequentemente desprezada no estudo *qualitativo* das variações de tensão. Para obter resultados numéricos mais exatos, devemos naturalmente levar R_A em consideração.

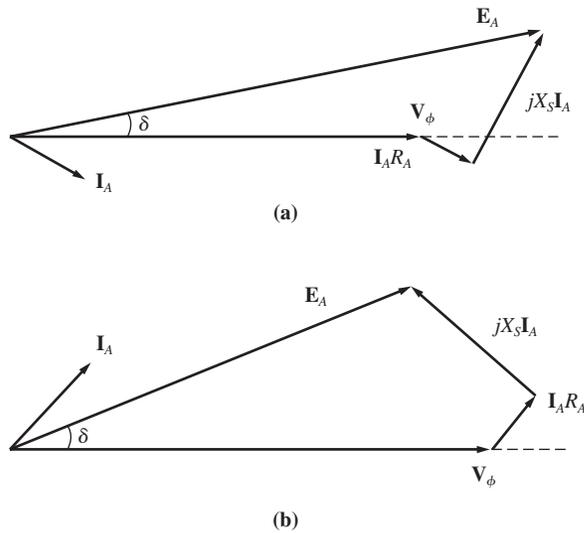


FIGURA 4-14 O diagrama fasorial de um gerador síncrono com fatores de potência (a) atrasado e (b) adiantado.

4.6 POTÊNCIA E CONJUGADO EM GERADORES SÍNCRONOS

Um gerador síncrono é uma máquina síncrona usada como gerador. Ele converte potência mecânica em potência elétrica trifásica. A fonte da potência mecânica, a *máquina motriz*, pode ser um motor diesel, uma turbina a vapor, uma turbina hidráulica ou qualquer dispositivo similar. Qualquer que seja a fonte, ela deve ter a propriedade básica de que sua velocidade seja quase constante independentemente da potência demandada. Se não fosse assim, a frequência do sistema de potência resultante variaria.

Nem toda a potência mecânica que entra em um gerador síncrono torna-se potência elétrica na saída da máquina. A diferença entre a potência de entrada e a de saída representa as perdas da máquina. Um diagrama de fluxo de potência para um gerador síncrono está mostrado na Figura 4-15. A potência mecânica de entrada é a potência no eixo do gerador $P_{\text{entrada}} = \tau_{\text{ap}} \omega_m$, ao passo que a potência convertida internamente da forma mecânica para a forma elétrica é dada por

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \omega_m \tag{4-14}$$

$$= 3E_A I_A \cos \gamma \tag{4-15}$$

em que γ é o ângulo entre \mathbf{E}_A e \mathbf{I}_A . A diferença entre a potência de entrada do gerador e a potência convertida nele representa as perdas mecânicas, as do núcleo e as suplementares da máquina.

A saída de potência elétrica ativa do gerador síncrono pode ser expressa em grandezas de linha como

$$P_{\text{saída}} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \tag{4-16}$$

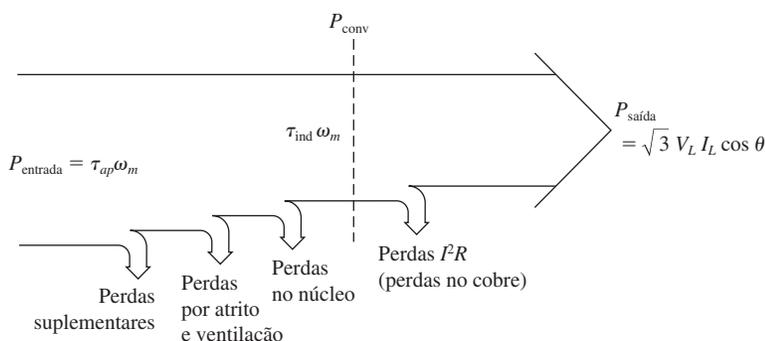


FIGURA 4-15
O diagrama de fluxo de potência de um gerador síncrono.

e, em grandezas de fase, como

$$P_{saída} = 3V_{\phi} I_A \cos \theta \tag{4-17}$$

A saída de potência reativa pode ser expressa em grandezas de linha como

$$Q_{saída} = \sqrt{3} V_L I_L \sen \theta \tag{4-18}$$

ou em grandezas de fase como

$$Q_{saída} = 3V_{\phi} I_A \sen \theta \tag{4-19}$$

Se a resistência de armadura R_A for ignorada (já que $X_S \gg R_A$), então uma equação muito útil pode ser deduzida para fornecer um valor aproximado da potência de saída do gerador. Para deduzir essa equação, examine o diagrama fasorial da Figura 4-16. Essa figura mostra um diagrama fasorial simplificado de um gerador com a resistência de estator ignorada. Observe que o segmento vertical bc pode ser expresso como $E_A \sen \delta$ ou $X_S I_A \cos \theta$. Portanto,

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sen \delta}{X_S}$$

e, substituindo essa expressão na Equação (4-17), obtemos

$$P_{conv} = \frac{3V_{\phi} E_A}{X_S} \sen \delta \tag{4-20}$$

Como assumimos que as resistências são zero na Equação (4-20), então não há perdas elétricas nesse gerador e a equação expressa ambas, P_{conv} e $P_{saída}$.

A Equação (4-20) mostra que a potência produzida por um gerador síncrono depende do ângulo δ entre \mathbf{V}_{ϕ} e \mathbf{E}_A . O ângulo δ é conhecido como *ângulo interno* ou *ângulo de conjugado (torque)* da máquina. Observe também que a potência máxima que o gerador pode fornecer ocorre quando $\delta = 90^\circ$. Para $\delta = 90^\circ$, temos $\sen \delta = 1$ e

$$P_{max} = \frac{3V_{\phi} E_A}{X_S} \tag{4-21}$$

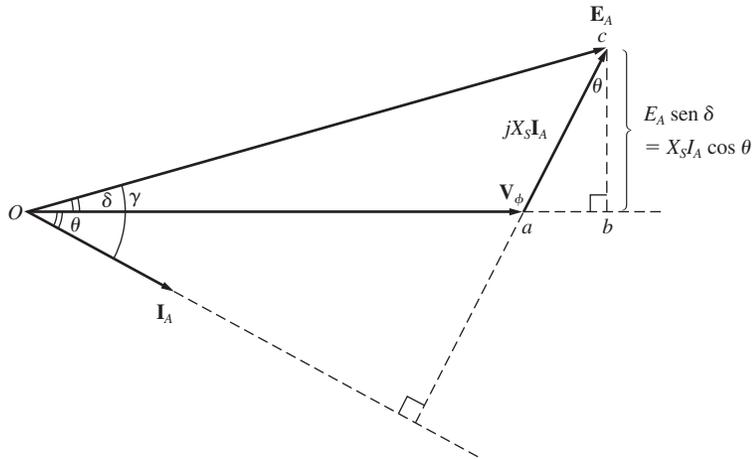


FIGURA 4-16
Diagrama fasorial simplificado com a resistência de armadura ignorada.

A potência máxima indicada por essa equação é denominada *limite de estabilidade estática* do gerador. Normalmente, os geradores reais nunca chegam nem próximos desse limite. As máquinas reais apresentam ângulos típicos de conjugado (ou torque) a plena carga de 20 a 30 graus.

Agora, examine novamente as Equações (4-17), (4-19) e (4-20). Se assumirmos que V_ϕ é constante, a saída de potência ativa será diretamente proporcional a $I_A \cos \theta$ e a $E_A \sin \delta$ e a saída de potência reativa será diretamente proporcional à $I_A \sin \theta$. Esses fatos são úteis quando se plotam diagramas fasoriais de geradores síncronos com carga variável.

Com base no Capítulo 3, o conjugado induzido desse gerador pode ser expresso como

$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \quad (3-58)$$

ou como

$$\tau_{\text{ind}} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{liq}} \quad (3-60)$$

O módulo da Equação (3-60) pode ser expresso como

$$\tau_{\text{ind}} = k B_R B_{\text{liq}} \sin \delta \quad (3-61)$$

em que δ é o ângulo entre o campo magnético do rotor e o campo magnético líquido (o assim denominado *ângulo de conjugado* ou *torque*). Como \mathbf{B}_R produz a tensão \mathbf{E}_A e \mathbf{B}_{liq} produz a tensão \mathbf{V}_ϕ , o ângulo δ_ϕ entre \mathbf{E}_A e \mathbf{V}_ϕ é o mesmo que o ângulo δ entre \mathbf{B}_R e \mathbf{B}_{liq} .

Uma expressão alternativa para o conjugado induzido em um gerador síncrono pode ser obtida da Equação (4-20). Como $P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \omega_m$, o conjugado induzido pode ser expresso como

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_S} \sin \delta \quad (4-22)$$

Essa expressão descreve o conjugado induzido em termos de grandezas elétricas, ao passo que a Equação (3-60) fornece a mesma informação em termos de grandezas magnéticas.

Observe que, em um gerador síncrono, tanto a potência convertida da forma mecânica para a elétrica P_{conv} como o conjugado induzido τ_{ind} no rotor do gerador dependem do ângulo de conjugado δ .

$$P_{\text{conv}} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \text{sen } \delta \quad (4-20)$$

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_{\phi}E_A}{\omega_m X_S} \text{sen } \delta \quad (4-22)$$

Essas duas grandezas alcançam seus valores máximo quando o ângulo de conjugado δ alcança 90° . O gerador não é capaz de exceder esses limites mesmo instantaneamente. Tipicamente, os geradores reais a plena carga têm ângulos de conjugado de $20\text{--}30^\circ$, de modo que a potência e o conjugado máximos absolutos instantâneos que eles podem fornecer são no mínimo o dobro de seus valores a plena carga. Essa reserva de potência e conjugado é essencial para a estabilidade dos sistemas de potência que contêm esses geradores, como veremos na Seção 4.10.

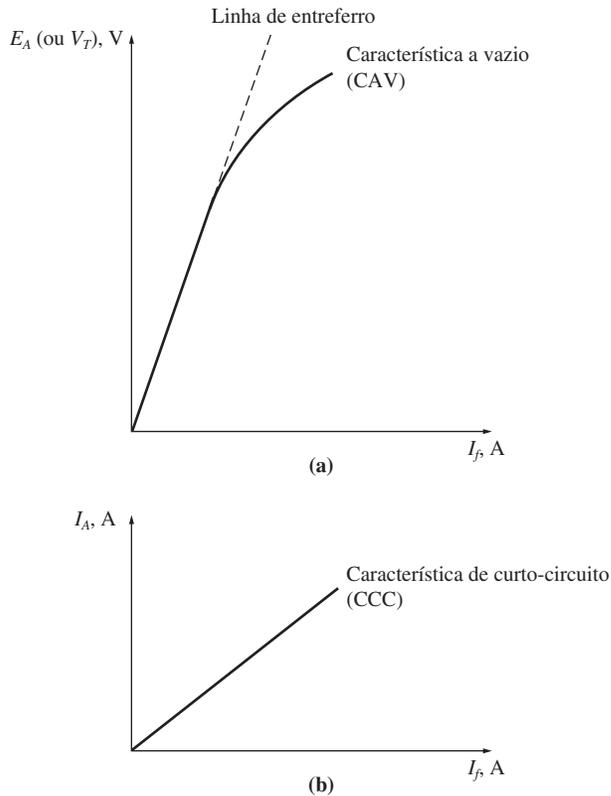
4.7 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE GERADOR SÍNCRONO

O circuito equivalente deduzido para um gerador síncrono continha três grandezas que devem ser determinadas para se descrever completamente o comportamento de um gerador síncrono real:

1. A relação entre corrente de campo e o fluxo (e, portanto, entre a corrente de campo e E_A)
2. A reatância síncrona
3. A resistência de armadura

Esta seção descreve uma técnica simples para determinar essas grandezas em um gerador síncrono.

O primeiro passo desse processo é executar o *ensaio a vazio* (ou *de circuito aberto*) com o gerador. Para realizar esse ensaio, o gerador é colocado a girar na velocidade nominal, os terminais são desconectados de todas as cargas e a corrente de campo é ajustada para zero. A seguir, a corrente de campo é incrementada gradualmente e a tensão nos terminais é medida a cada passo. Com os terminais abertos, $I_A = 0$, de modo que E_A é igual a V_{ϕ} . Assim, a partir dessa informação, é possível construir um gráfico de E_A (ou V_T) versus I_F . Essa curva é assim denominada *característica a vazio* (CAV) (ou *característica de circuito aberto* – CCA) de um gerador. Com essa curva característica, é possível encontrar a tensão gerada interna do gerador para qualquer corrente de campo dada. Uma característica a vazio típica está mostrada na Figura 4-17a. Observe que, no início, a curva é quase perfeitamente reta até que alguma saturação é observada com correntes de campo elevadas. O ferro não saturado da máquina síncrona tem uma relutância que é diversos milhares de vezes menor que


FIGURA 4-17

(a) A característica a vazio (CAV) de um gerador síncrono. (b) A característica de curto-circuito (CCC) de um gerador síncrono.

a relutância do entreferro. Desse modo, no início, quase *toda* a força magnetomotriz está no entreferro e o incremento de fluxo resultante é linear. Quando o ferro finalmente satura, a relutância do ferro aumenta dramaticamente e o fluxo aumenta muito mais vagarosamente com o aumento da força magnetomotriz. A porção linear de uma CAV é denominada *linha de entreferro* da característica.

O segundo passo do processo é a realização de um *ensaio de curto-circuito*. Para executá-lo, ajuste a corrente de campo novamente em zero e coloque em curto-circuito os terminais do gerador usando um conjunto de amperímetros. Então, a corrente de armadura I_A , ou a corrente de linha I_L , é medida enquanto a corrente de campo é incrementada. Tal curva é denominada *característica de curto-circuito* (CCC) e está mostrada na Figura 4-17b. Ela é basicamente uma linha reta. Para compreender por que essa característica é uma reta, examine o circuito equivalente da Figura 4-12 quando os terminais são curto-circuitados. Esse circuito está mostrado na Figura 4-18a. Observe que, quando os terminais são curto-circuitados, a corrente de armadura I_A é dada por

$$\mathbf{I}_A = \frac{\mathbf{E}_A}{R_A + jX_S} \quad (4-23)$$

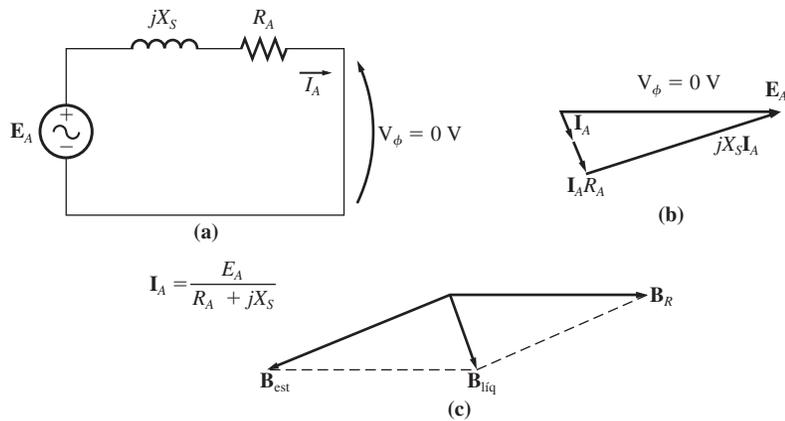


FIGURA 4-18
 (a) O circuito equivalente de um gerador síncrono durante o ensaio de curto-circuito. (b) O diagrama fasorial resultante. (c) Os campos magnéticos durante o ensaio de curto-circuito.

e o seu módulo é dado simplesmente por

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \tag{4-24}$$

O diagrama fasorial resultante está mostrado na Figura 4-18b e os respectivos campos magnéticos estão mostrados na Figura 4-18c. Como B_S quase cancela B_R , o campo magnético líquido B_{liq} é *muito* pequeno (correspondendo apenas a quedas resistiva e indutiva internas). Como o campo magnético líquido na máquina é tão pequeno, a máquina não está saturada e a CCC é linear.

Para compreender quais informações são fornecidas por essas duas características, observe que, com V_ϕ igual a zero na Figura 4-18, a *impedância interna da máquina* é dada por

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \tag{4-25}$$

Como $X_S \gg R_A$, essa equação reduz-se a

$$X_S \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\phi, vz}}{I_A} \tag{4-26}$$

Se E_A e I_A forem conhecidas em uma dada situação, então a reatância síncrona X_S poderá ser encontrada.

Portanto, um método *aproximado* para determinar a reatância síncrona X_S , com uma dada corrente de campo, é

1. Obtenha a tensão gerada interna E_A a partir da CAV para aquela corrente de campo.
2. Obtenha a corrente de curto-circuito $I_{A, CC}$ a partir da CCC para aquela corrente de campo.
3. Encontre X_S aplicando a Equação (4-26).

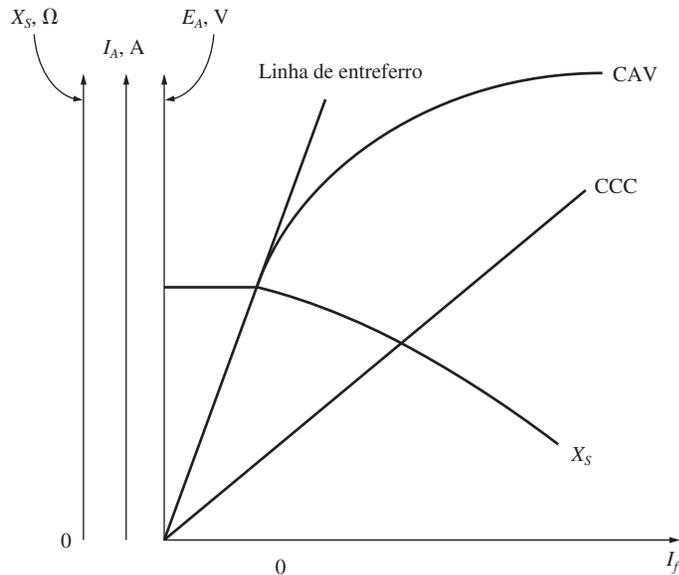


FIGURA 4-19

Um gráfico da reatância síncrona aproximada de um gerador síncrono em função da corrente de campo da máquina. O valor constante de reatância encontrado para baixos valores de corrente de campo é a reatância síncrona *não saturada* da máquina.

Entretanto, há um problema com essa abordagem. A tensão gerada interna E_A provém da CAV, na qual a máquina está parcialmente *saturada* para correntes de campo elevadas. Por outro lado, a corrente I_A é obtida da CCC, na qual a máquina *não está saturada* para todas as correntes de campo. Portanto, para uma dada corrente elevada de campo, a E_A tomada da CAV *não* é a mesma E_A que se obtém com a mesma corrente de campo em condições de curto-circuito. Essa diferença faz com que o valor resultante de X_s seja apenas aproximado.

Entretanto, a resposta dada por essa abordagem é exata até o ponto de saturação. Assim, a *reatância síncrona não saturada* $X_{s,n}$ da máquina pode ser encontrada simplesmente aplicando a Equação (4-26) e usando qualquer corrente de campo obtida na região linear (linha de entreferro) da curva CAV.

O valor aproximado da reatância síncrona varia com o grau de saturação da CAV, de modo que o valor da reatância síncrona a ser usado em um dado problema deve ser calculado para a carga aproximada que está sendo aplicada à máquina. Um gráfico da reatância síncrona aproximada em função da corrente de campo está mostrado na Figura 4-19.

Para obter uma estimativa mais exata da reatância síncrona saturada, consulte Seção 5-3 da Referência 2.

É importante conhecer a resistência do enrolamento, assim como sua reatância, síncrona. A resistência pode ser aproximada aplicando uma tensão CC aos enrolamentos enquanto a máquina permanece estacionária e medindo o fluxo de corrente resultante. O uso de tensão CC significa que a reatância dos enrolamentos será zero durante o processo de medição.

Essa técnica não é perfeitamente exata, porque a resistência CA será ligeiramente superior à resistência CC (como resultado do efeito pelicular em altas frequências). O valor medido da resistência pode mesmo ser incluído na Equação (4-26) para melhorar a estimativa de X_S , se desejado. (Tal melhoria não é de muito auxílio na abordagem aproximada – a saturação causa um erro muito maior no cálculo de X_S do que quando se ignora R_A .)

A razão de curto-circuito

Outro parâmetro usado para descrever geradores síncronos é a razão de curto-circuito. A *razão (ou relação) de curto-circuito* de um gerador é definida como a razão entre a *corrente de campo requerida para a tensão nominal a vazio* e a *corrente de campo requerida para a corrente nominal de armadura em curto-circuito*. Pode-se mostrar que essa grandeza é simplesmente o inverso do valor por unidade da reatância síncrona aproximada em saturação que foi calculada usando a Equação (4-26).

Embora a razão de curto-circuito não acrescente nenhuma informação nova a respeito do gerador que já não seja conhecida com base na reatância síncrona em saturação, é importante conhecê-la, porque a expressão é encontrada ocasionalmente na indústria.

EXEMPLO 4-1 Um gerador síncrono de 200 kVA, 480 V, 50 Hz, ligado em Y e com uma corrente nominal de campo de 5 A foi submetido a ensaios, tendo-se obtido os seguintes dados:

1. Para I_F nominal, $V_{T,VZ}$ foi medida como sendo 540 V.
2. Para I_F nominal, $I_{L,CC}$ foi encontrada como sendo 300 A.
3. Quando uma tensão CC de 10 V foi aplicada a dois dos terminais, uma corrente de 25 A foi medida.

Encontre os valores da resistência de armadura e da reatância síncrona aproximada em ohms que seriam usados no modelo do gerador nas condições nominais.

Solução

O gerador recém descrito está ligado em Y, de modo que a corrente contínua no teste de resistência flui através de dois enrolamentos. Portanto, a resistência é dada por

$$2R_A = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

$$R_A = \frac{V_{CC}}{2I_{CC}} = \frac{10 \text{ V}}{(2)(25 \text{ A})} = 0,2 \Omega$$

A tensão gerada interna, com corrente de campo nominal, é igual a

$$E_A = V_{\phi,VZ} = \frac{V_T}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{540 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 311,8 \text{ V}$$

A corrente de curto-circuito I_A é simplesmente igual à corrente de linha, porque o gerador está ligado em Y:

$$I_{A,CC} = I_{L,CC} = 300 \text{ A}$$

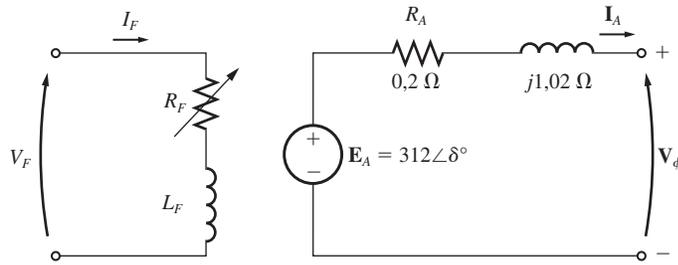


FIGURA 4-20
O circuito equivalente por fase do gerador do Exemplo 4-1.

Portanto, a reatância síncrona, com corrente de campo nominal, pode ser calculada a partir da Equação (4-25):

$$\begin{aligned} \sqrt{R_A^2 + X_S^2} &= \frac{E_A}{I_A} & (4-25) \\ \sqrt{(0,2 \Omega)^2 + X_S^2} &= \frac{311,8 \text{ V}}{300 \text{ A}} \\ \sqrt{(0,2 \Omega)^2 + X_S^2} &= 1,039 \Omega \\ 0,04 + X_S^2 &= 1,08 \\ X_S^2 &= 1,04 \\ X_S &= 1,02 \Omega \end{aligned}$$

Qual foi o efeito da inclusão de R_A na estimativa de X_S ? O efeito foi pequeno. Se X_S for calculado pela Equação (4-26), o resultado será

$$X_S = \frac{E_A}{I_A} = \frac{311,8 \text{ V}}{300 \text{ A}} = 1,04 \Omega$$

Como o erro em X_S , devido a não termos incluído R_A , é muito menor do que o erro devido aos efeitos de saturação, os cálculos aproximados são feitos normalmente aplicando a Equação (4-26).

O circuito equivalente resultante por fase está mostrado na Figura 4-20.

4.8 O GERADOR SÍNCRONO OPERANDO ISOLADO

O comportamento de um gerador síncrono sob carga varia grandemente, conforme o fator de potência da carga e se o gerador está operando isolado ou em paralelo com outros geradores síncronos. Nesta seção, estudaremos o comportamento de geradores síncronos que operam isolados. O estudo dos geradores síncronos que operam em paralelo será feito na Seção 4.9.

Nesta seção, os conceitos serão ilustrados com diagramas fasoriais simplificados que ignoram o efeito de R_A . Em alguns dos exemplos numéricos, a resistência R_A será incluída.

Também nesta seção, a não ser que seja especificado em contrário, assumiremos que a velocidade dos geradores é constante e que todas as características de terminal são obtidas assumindo-se velocidade constante. Além disso, assumimos que o

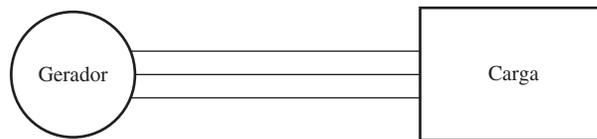


FIGURA 4-21

Um único gerador alimentando uma carga.

fluxo no rotor dos geradores é constante, a não ser que suas correntes de campo sejam explicitamente alteradas.

O efeito das mudanças de carga sobre um gerador síncrono que opera isolado

Para compreender as características de funcionamento de um gerador síncrono que opera isolado, examinaremos um gerador alimentando uma carga. Um diagrama de um único gerador alimentando uma carga está mostrado na Figura 4-21. Que acontece quando aumentamos a carga desse gerador?

Um incremento de carga é um aumento de potência ativa e/ou reativa solicitada do gerador. Esse incremento de carga aumenta a corrente de carga solicitada do gerador. Como a resistência de campo não foi alterada, a corrente de campo é constante e, portanto, o fluxo ϕ é constante. Como a máquina motriz também mantém constante sua velocidade ω , o valor da tensão gerada interna $E_A = K\phi\omega$ é constante.

Se E_A for constante, afinal o que muda com uma carga variável? A maneira de se descobrir é construindo diagramas fasoriais que mostram um aumento de carga, levando em consideração as restrições do gerador.

Primeiro, examine um gerador que opera com um fator de potência atrasado. Se mais carga for acrescentada com o *mesmo fator de potência*, então $|\mathbf{I}_A|$ aumentará, mas permanecerá no mesmo ângulo θ em relação à tensão \mathbf{V}_ϕ de antes. Portanto, a tensão da reação de armadura $jX_S\mathbf{I}_A$ será maior do que antes, mas permanecerá com o mesmo ângulo. Agora, como

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi + jX_S\mathbf{I}_A$$

$jX_S\mathbf{I}_A$ deverá se estender entre \mathbf{V}_ϕ em um ângulo de 0° e \mathbf{E}_A , que apresenta a restrição de ter o mesmo valor de antes do aumento da carga. Se essas restrições forem plotadas em um diagrama fasorial, haverá um e somente um ponto no qual a tensão da reação de armadura pode estar em paralelo com sua posição original e ao mesmo tempo ter um aumento em seu tamanho. O diagrama resultante está mostrado na Figura 4-22a.

Se as restrições forem observadas, veremos que, quando a carga aumenta, a tensão \mathbf{V}_ϕ diminui bastante acentuadamente.

Agora, suponha que o gerador receba cargas com fator de potência unitário. Que acontecerá se novas cargas forem acrescentadas com o mesmo fator de potência? Com as mesmas restrições de antes, pode-se ver que, desta vez, \mathbf{V}_ϕ diminui apenas ligeiramente (veja a Figura 4-22b).

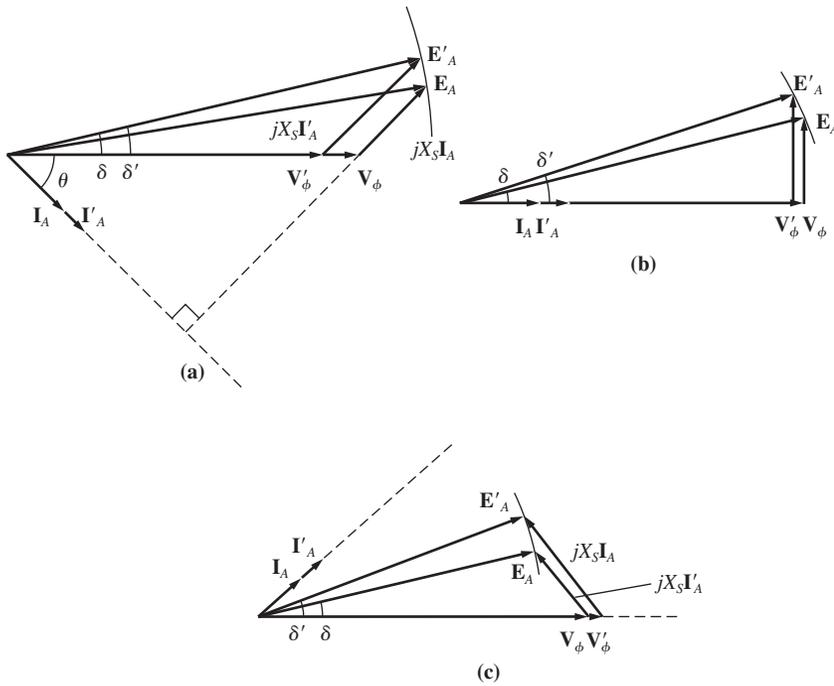


FIGURA 4-22

Efeito de um incremento da carga do gerador sobre a tensão de terminal, mantendo constante o fator de potência. (a) Fator de potência atrasado; (b) fator de potência unitário; (c) fator de potência adiantado.

Finalmente, o gerador receberá cargas com fator de potência adiantado. Se agora novas cargas forem acrescentadas com o mesmo fator de potência, a tensão da reação de armadura será diferente de seu valor anterior e V_ϕ na realidade *aumentará* (veja Figura 4-22c). Neste último caso, o aumento da carga do gerador produziu um incremento da sua tensão de terminal. Esse resultado não é algo que poderíamos esperar, baseados apenas na intuição.

Conclusões gerais dessa discussão do comportamento dos geradores síncronos são

1. Se cargas com fator de potência em atraso (+Q ou cargas de potência reativa indutiva) forem acrescentadas a um gerador, V_ϕ e a tensão de terminal V_T diminuirão de forma significativa.
2. Se cargas com fator de potência unitário (sem potência reativa) forem acrescentadas a um gerador, haverá um pequeno aumento em V_ϕ e na tensão de terminal.
3. Se cargas com fator de potência adiantado (-Q ou cargas de potência reativa capacitiva) forem acrescentadas a um gerador, V_ϕ e a tensão de terminal V_T aumentarão.

Uma maneira conveniente de comparar os comportamentos de dois geradores é através de sua *regulação de tensão*. A regulação de tensão (RT) de um gerador é definida pela equação

$$RT = \frac{V_{vz} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100\% \quad (3-67)$$

em que V_{vz} é a tensão a vazio do gerador e V_{pc} é a tensão a plena carga do gerador. Um gerador síncrono operando com um fator de potência atrasado apresenta uma regulação de tensão muito positiva, um gerador síncrono operando com um fator de potência unitário tem uma pequena regulação de tensão positiva e um gerador síncrono operando com um fator de potência adiantado apresenta frequentemente uma regulação de tensão negativa.

Normalmente, é desejável manter constante a tensão fornecida a uma carga, mesmo quando a própria carga se altera. Como as variações de tensão de terminal podem ser corrigidas? A abordagem óbvia é variar o valor de E_A para compensar as mudanças de carga. Lembre-se de que $E_A = K\phi\omega$. Como a frequência não deve ser alterada em um sistema normal, então E_A deverá ser controlada pela variação do fluxo da máquina.

Por exemplo, suponha que uma carga com fator de potência atrasado seja acrescentada a um gerador. Então, a tensão de terminal cairá, como foi mostrado anteriormente. Para levá-la de volta a seu nível anterior, diminua a resistência de campo R_F . Se R_F diminuir, a corrente de campo aumentará. Um incremento em I_F aumenta o fluxo, que por sua vez aumenta E_A e um incremento em E_A aumenta as tensões de fase e de terminal. Essa ideia pode ser resumida como segue:

1. Uma diminuição da resistência de campo do gerador aumenta sua corrente de campo.
2. Um incremento na corrente de campo aumenta o fluxo da máquina.
3. Um incremento de fluxo aumenta a tensão gerada interna $E_A = K\phi\omega$.
4. Um incremento em E_A aumenta V_ϕ e a tensão de terminal do gerador.

O processo pode ser invertido para diminuir a tensão de terminal. É possível regular a tensão de terminal do gerador para uma série de alterações de carga, simplesmente ajustando a corrente de campo.

Problemas exemplos

Os três problemas seguintes são exemplos de cálculos simples, que envolvem tensões, correntes e fluxos de potência de geradores síncronos. O primeiro problema inclui a resistência de armadura em seus cálculos, ao passo que os dois exemplos seguintes ignoram R_A . Uma parte do primeiro problema envolve a questão: *como a corrente de campo de um gerador deve ser ajustada para manter V_T constante quando a carga muda?* Por outro lado, parte do segundo problema faz a pergunta: *se a carga variar e o campo for deixado sozinho, que acontece com a tensão de terminal?* Você poderia comparar os comportamentos que serão calculados para os dois geradores desses problemas para ver se eles estão de acordo com os argumentos qualitativos que foram desenvolvidos nesta seção. Finalmente, o terceiro exemplo ilustra o uso de um programa MATLAB para obter as características de terminal do gerador síncrono.

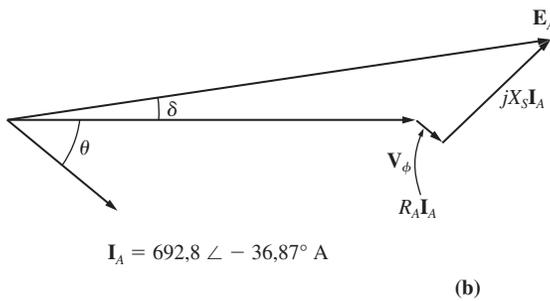
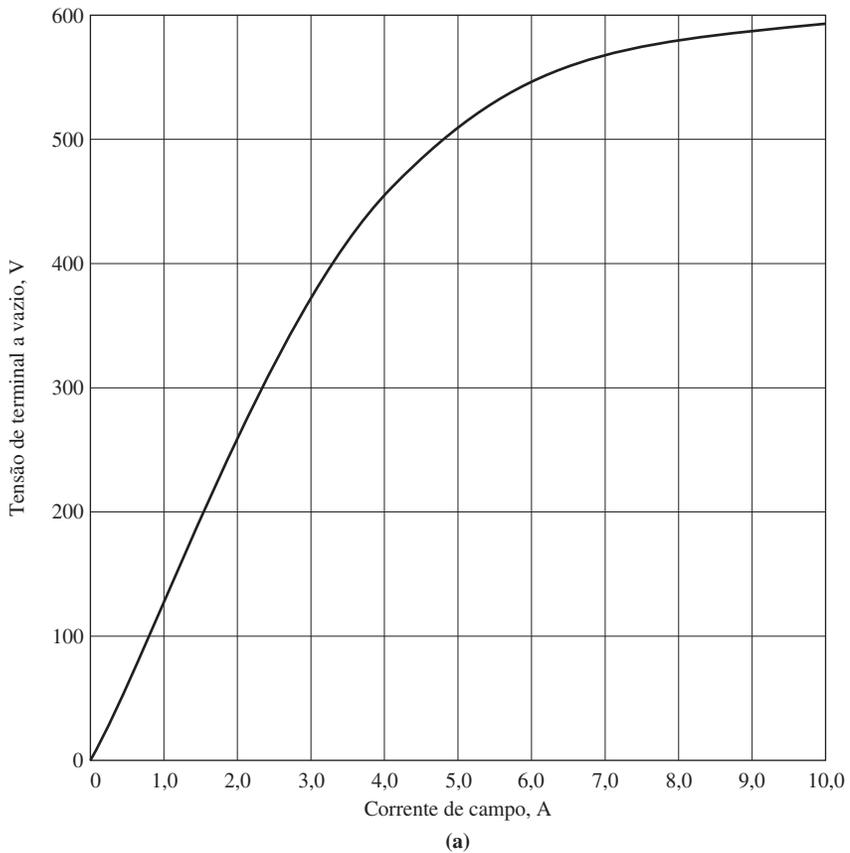


FIGURA 4-23 (a) Característica a vazio do gerador do Exemplo 4-2. (b) Diagrama fasorial do gerador do Exemplo 4-2.

EXEMPLO 4-2 Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em Δ e de quatro polos tem a CAV mostrada na Figura 4-23a. Esse gerador tem uma reatância síncrona de $0,1 \Omega$ e uma resistência de armadura de $0,015 \Omega$. A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo.

- (a) Qual é a velocidade de rotação desse gerador?
- (b) Quanta corrente de campo deve ser fornecida ao gerador para que a tensão de terminal seja de 480 V a vazio?
- (c) Se o gerador for ligado a uma carga que solicita 1200 A com FP 0,8 atrasado, quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão de terminal em 480 V?
- (d) Quanta potência o gerador está fornecendo agora? Quanta potência é fornecida ao gerador pela máquina motriz? Qual é a eficiência total dessa máquina?
- (e) Se a carga do gerador for repentinamente desligada da linha, que acontecerá à sua tensão de terminal?
- (f) Finalmente, suponha que o gerador seja ligado a uma carga que solicita 1200 A com FP de 0,8 *adiantado*. Quanta corrente de campo será necessária para manter V_T em 480 V?

Solução

Este gerador síncrono está ligado em Δ , de modo que sua tensão de fase é igual à sua tensão de linha $V_\phi = V_T$, ao passo que sua corrente de fase relaciona-se com sua corrente de linha pela equação $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

- (a) A relação entre a frequência elétrica produzida por um gerador síncrono e a velocidade mecânica de rotação no eixo é dada pela Equação (3-34):

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (3-34)$$

Portanto,

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{120f_{se}}{P} \\ &= \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ polos}} = 1800 \text{ rpm} \end{aligned}$$

- (b) Nessa máquina, $V_T = V_\phi$. Como o gerador está a vazio, $\mathbf{I}_A = 0$ e $\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi$. Portanto, $V_T = V_\phi = E_A = 480 \text{ V}$ e, da característica a vazio, temos $I_F = 4,5 \text{ A}$.
- (c) Se o gerador estiver fornecendo 1200 A, a corrente de armadura da máquina será

$$I_A = \frac{1200 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 692,8 \text{ A}$$

O diagrama fasorial desse gerador está mostrado na Figura 4-23b. Se a tensão de terminal for ajustada para 480 V, o valor da tensão gerada interna \mathbf{E}_A será dado por

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_A &= \mathbf{V}_\phi + R_A \mathbf{I}_A + jX_S \mathbf{I}_A \\ &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + (0,015 \Omega)(692,8 \angle -36,87^\circ \text{ A}) + (j0,1 \Omega)(692,8 \angle -36,87^\circ \text{ A}) \\ &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 10,39 \angle -36,87^\circ \text{ V} + 69,28 \angle 53,13^\circ \text{ V} \\ &= 529,9 + j49,2 \text{ V} = 532 \angle 5,3^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Para manter a tensão de terminal em 480 V, o valor de \mathbf{E}_A deve ser ajustado para 532 V. Da Figura 4-23, temos que a corrente de campo necessária é 5,7 A.

- (d) A potência que o gerador está fornecendo agora pode ser obtida da Equação (4-16):

$$P_{\text{saída}} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (4-16)$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{3}(480 \text{ V})(1200 \text{ A}) \cos 36,87^\circ \\
 &= 798 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Para determinar a entrada de potência do gerador, use o diagrama de fluxo de potência (Figura 4-15). Desse diagrama de fluxo de potência, vemos que a entrada de potência mecânica é dada por

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{saída}} + P_{\text{perdas eletr.}} + P_{\text{perdas núcleo}} + P_{\text{perdas mec.}} + P_{\text{perdas suplem.}}$$

As perdas suplementares não foram especificadas aqui, de modo que serão ignoradas. Nesse gerador, as perdas elétricas são

$$\begin{aligned}
 P_{\text{perdas eletr.}} &= 3I_A^2 R_A \\
 &= 3(692,8 \text{ A})^2(0,015 \Omega) = 21,6 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

As perdas no núcleo são 30 kW e as perdas por atrito e ventilação são 40 kW, de modo que a potência total de entrada do gerador é

$$P_{\text{entrada}} = 798 \text{ kW} + 21,6 \text{ kW} + 30 \text{ kW} + 40 \text{ kW} = 889,6 \text{ kW}$$

Portanto, a eficiência total da máquina é

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% = \frac{798 \text{ kW}}{889,6 \text{ kW}} \times 100\% = 89,75\%$$

- (e) Se a carga do gerador for repentinamente desligada da linha, a corrente I_A cairá a zero, tornando $E_A = V_\phi$. Como a corrente de campo não mudou, $|E_A|$ também não mudou e V_ϕ e V_T devem subir para igualar E_A . Portanto, se a carga for desligada de repente, a tensão de terminal do gerador subirá para 532 V.
- (f) Se o gerador for carregado com 1200 A, com FP de 0,8 adiantado enquanto a tensão de terminal é mantida em 480 V, então a tensão gerada interna será

$$\begin{aligned}
 E_A &= V_\phi + R_A I_A + jX_S I_A \\
 &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + (0,015 \Omega)(692,8 \angle 36,87^\circ \text{ A}) + (j0,1 \Omega)(692,8 \angle 36,87^\circ \text{ A}) \\
 &= 480 \angle 0^\circ \text{ V} + 10,39 \angle 36,87^\circ \text{ V} + 69,28 \angle 126,87^\circ \text{ V} \\
 &= 446,7 + j61,7 \text{ V} = 451 \angle 7,1^\circ \text{ V}
 \end{aligned}$$

Portanto, a tensão gerada interna E_A deverá ser ajustada para fornecer 451 V se V_T permanecer em 480 V. Utilizando a característica a vazio, vemos que a corrente de campo deve ser ajustada para 4,1 A.

Que tipo de carga (com fator de potência adiantado ou atrasado) necessitou de uma corrente de campo maior para manter a tensão nominal? Que tipo de carga (adiantada ou atrasada) impôs um *stress* térmico maior ao gerador? Por quê?

EXEMPLO 4-3 Um gerador síncrono de 480 V e 50 Hz, ligado em Y e de seis polos, tem uma reatância síncrona por fase de 1,0 Ω . Sua corrente de armadura de plena carga é 60 A, com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação desse gerador são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 60 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura está sendo ignorada, assuma que as perdas $I^2 R$ são desprezíveis. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão de terminal seja 480 V a vazio.

- (a) Qual é a velocidade de rotação desse gerador?
- (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se o seguinte for verdadeiro?

1. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 atrasado.
 2. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP unitário.
 3. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 adiantado.
- (c) Qual é a eficiência desse gerador (ignorando as perdas elétricas desconhecidas) quando ele está operando com a corrente nominal e FP 0,8 atrasado.
- (d) Quanto conjugado deve ser aplicado no eixo pela máquina motriz a plena carga? Qual é o valor do contraconjugado induzido?
- (e) Qual é a regulação de tensão desse gerador, com FP 0,8 atrasado? Com FP 1,0 (unitário)? Com FP 0,8 adiantado?

Solução

Esse gerador está ligado em Y, de modo que sua tensão de fase é dada por $V_\phi = V_T / \sqrt{3}$. Isso significa que, quando V_T é ajustada para 480 V, temos $V_\phi = 277$ V. A corrente de campo foi ajustada de modo que $V_{t,vz} = 480$ V. Portanto, temos $V_\phi = 277$ V. *A vazão*, a corrente de armadura é zero, de modo que as quedas da tensão da reação de armadura e de $I_A R_A$ são zero. Como $\mathbf{I}_A = 0$, a tensão gerada interna é $E_A = V_\phi = 277$ V. A tensão gerada interna $E_A (= K\phi\omega)$ varia apenas quando a corrente de campo muda. Como o problema afirma que a corrente de campo é ajustada inicialmente e então deixada por si mesma, o valor da tensão gerada interna é $E_A = 277$ V e não será alterada neste exemplo.

- (a) A velocidade de rotação de um gerador síncrono, em rotações por minuto, é dada pela Equação (3-34):

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (3-34)$$

Portanto,

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{120 f_{se}}{P} \\ &= \frac{120(50 \text{ Hz})}{6 \text{ polos}} = 1000 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Alternativamente, a velocidade expressa em radianos por segundo é

$$\begin{aligned} \omega_m &= (1000 \text{ rotações/min}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rotação}} \right) \\ &= 104,7 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

- (b) 1. Se o gerador for carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 atrasado, o diagrama fasorial resultante será como o que está mostrado na Figura 4-24a. Nesse diagrama fasorial, sabemos que \mathbf{V}_ϕ está no ângulo de 0° , que o módulo de \mathbf{E}_A é 277 V e que o termo $jX_S \mathbf{I}_A$ é

$$jX_S \mathbf{I}_A = j(1,0 \Omega)(60 \angle -36,87^\circ \text{ A}) = 60 \angle 53,13^\circ \text{ V}$$

As duas grandezas desconhecidas no diagrama fasorial de tensões são o módulo de \mathbf{V}_ϕ e o ângulo δ de \mathbf{E}_A . Para encontrar esses valores, a maneira mais fácil é construir um triângulo reto no diagrama fasorial, como está mostrado na figura. Da Figura 4-24a, o triângulo reto dá

$$E_A^2 = (V_\phi + X_S I_A \sin \theta)^2 + (X_S I_A \cos \theta)^2$$

Portanto, a tensão de fase com carga nominal e FP 0,8 atrasado é

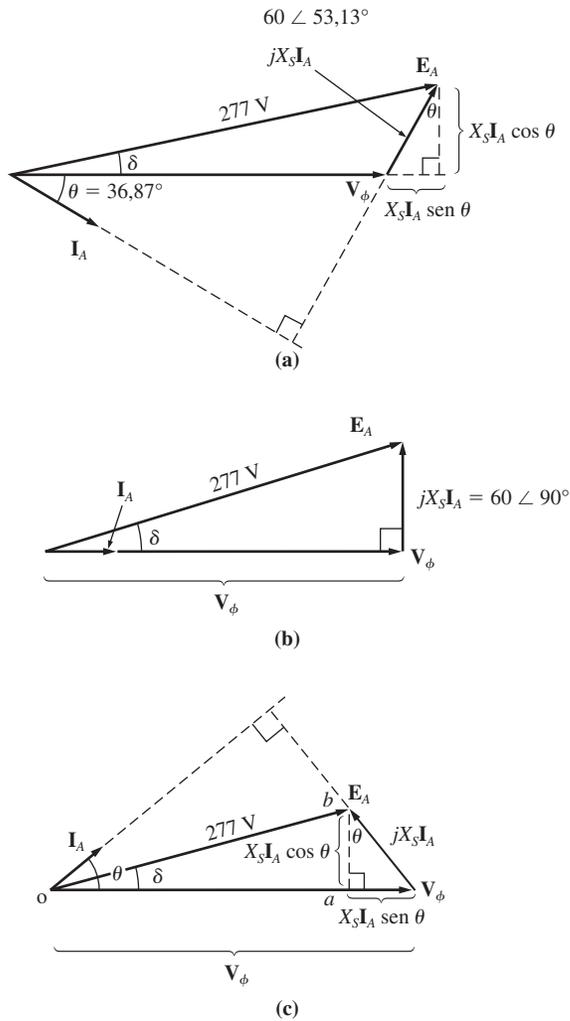


FIGURA 4-24
 Diagramas fasoriais do gerador do Exemplo 4-3. (a) Fator de potência atrasado; (b) fator de potência unitário; (c) fator de potência adiantado.

$$\begin{aligned}
 (277 \text{ V})^2 &= [V_\phi + (1,0 \Omega)(60 \text{ A}) \text{ sen } 36,87^\circ]^2 + [(1,0 \Omega)(60 \text{ A}) \text{ cos } 36,87^\circ]^2 \\
 76.729 &= (V_\phi + 36)^2 + 2304 \\
 74.425 &= (V_\phi + 36)^2 \\
 272,8 &= V_\phi + 36 \\
 V_\phi &= 236,8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Como o gerador está ligado em Y, $V_T = \sqrt{3} V_\phi = 410 \text{ V}$.

- Se o gerador for carregado com a corrente nominal, sendo FP unitário, então o diagrama fasorial resultante será como o que está mostrado na Figura 4-24b. Para encontrar V_ϕ aqui, o triângulo reto é

$$\begin{aligned}
 E_A^2 &= V_\phi^2 + (X_S I_A)^2 \\
 (277 \text{ V})^2 &= V_\phi^2 + [(1,0 \Omega)(60 \text{ A})]^2 \\
 76.729 &= V_\phi^2 + 3600 \\
 V_\phi^2 &= 73.129 \\
 V_\phi &= 270,4 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Portanto, $V_T = \sqrt{3}V_\phi = 468,4 \text{ V}$.

3. Quando o gerador está carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 adiantado, o diagrama fasorial resultante é o mostrado na Figura 4-24c. Para encontrar V_ϕ neste caso, construiremos o triângulo OAB mostrado na figura. A equação resultante é

$$E_A^2 = (V_\phi - X_S I_A \sin \theta)^2 + (X_S I_A \cos \theta)^2$$

Portanto, a tensão de fase para a corrente nominal e FP 0,8 adiantado, é

$$\begin{aligned}
 (277 \text{ V})^2 &= [V_\phi - (1,0 \Omega)(60 \text{ A}) \sin 36,87^\circ]^2 + [(1,0 \Omega)(60 \text{ A}) \cos 36,87^\circ]^2 \\
 76.729 &= (V_\phi - 36)^2 + 2304 \\
 74.425 &= (V_\phi - 36)^2 \\
 272,8 &= V_\phi - 36 \\
 V_\phi &= 308,8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Como o gerador está ligado em Y, $V_T = \sqrt{3}V_\phi = 535 \text{ V}$.

- (c) A potência de saída desse gerador, para 60 A e FP 0,8 atrasado, é

$$\begin{aligned}
 P_{\text{saída}} &= 3V_\phi I_A \cos \theta \\
 &= 3(236,8 \text{ V})(60 \text{ A})(0,8) = 34,1 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

A entrada de potência mecânica é dada por

$$\begin{aligned}
 P_{\text{entrada}} &= P_{\text{saída}} + P_{\text{perdas eletr.}} + P_{\text{perdas núcleo}} + P_{\text{perdas mec.}} \\
 &= 34,1 \text{ kW} + 0 + 1,0 \text{ kW} + 1,5 \text{ kW} = 36,6 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Portanto, a eficiência do gerador é

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100\% = \frac{34,1 \text{ kW}}{36,6 \text{ kW}} \times 100\% = 93,2\%$$

- (d) O conjugado de entrada desse gerador é dado pela equação

$$\begin{aligned}
 P_{\text{entrada}} &= \tau_{\text{ap}} \omega_m \\
 \text{Portanto,} \quad \tau_{\text{ap}} &= \frac{P_{\text{entrada}}}{\omega_m} = \frac{36,6 \text{ kW}}{125,7 \text{ rad/s}} = 291,2 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

O contraconjugado induzido é dado por

$$\begin{aligned}
 P_{\text{conv}} &= \tau_{\text{ind}} \omega_m \\
 \text{Portanto,} \quad \tau_{\text{ind}} &= \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_V} = \frac{34,1 \text{ kW}}{125,7 \text{ rad/s}} = 271,3 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

- (e) A regulação de tensão de um gerador é definida como

$$RT = \frac{V_{vz} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100\% \quad (3-67)$$

Por essa definição, a regulação de tensão para os casos de fatores de potência atrasado, unitário e adiantado são

1. Caso de FP atrasado: $RT = \frac{480 \text{ V} - 410 \text{ V}}{410 \text{ V}} \times 100\% = 17,1\%$
2. Caso de FP unitário: $RT = \frac{480 \text{ V} - 468 \text{ V}}{468 \text{ V}} \times 100\% = 2,6\%$
3. Caso de FP adiantado: $RT = \frac{480 \text{ V} - 535 \text{ V}}{535 \text{ V}} \times 100\% = -10,3\%$

No Exemplo 4-3, as cargas com FP atrasado resultaram em uma queda da tensão de terminal, as cargas com fator de potência unitário tiveram pequeno efeito sobre V_T e as cargas com FP adiantado resultaram em uma elevação da tensão de terminal.

EXEMPLO 4-4 Assuma que o gerador do Exemplo 4-3 esteja operando a vazio, com uma tensão de terminal de 480 V. Plote a característica de terminal (tensão de terminal *versus* corrente de linha) desse gerador quando sua corrente de armadura varia desde a vazio até plena carga com fatores de potência de (a) 0,8 atrasado e (b) 0,8 adiantado. Assuma que a corrente de campo permaneça constante todo o tempo.

Solução

A característica de terminal de um gerador é um gráfico de sua tensão de terminal *versus* a corrente de linha. Como esse gerador está ligado em Y, sua tensão de fase é dada por $V_\phi = V_T / \sqrt{3}$. Se V_T for ajustada para 480 V a vazio, teremos $V_\phi = E_A = 277 \text{ V}$. Como a corrente de campo permanece constante, E_A permanecerá em 277 V todo o tempo. A corrente de saída I_L desse gerador será a mesma que sua corrente de armadura I_A , porque ele está ligado em Y.

(a) Se o gerador for carregado com uma corrente de FP 0,8 atrasado, o diagrama fasorial resultante será semelhante ao mostrado na Figura 4-24a. Nesse diagrama fasorial, sabemos que V_ϕ está no ângulo de 0° , que o módulo de E_A é 277 V e que o termo $jX_S I_A$ se estende entre V_ϕ e E_A , como mostrado. As duas grandezas desconhecidas do diagrama fasorial são o módulo de V_ϕ e o ângulo δ de E_A . Para encontrar V_ϕ , a maneira mais fácil é construir um triângulo reto no diagrama fasorial, como está mostrado na figura. Da Figura 4-24a, o triângulo reto fornece

$$E_A^2 = (V_\phi + X_S I_A \text{ sen } \theta)^2 + (X_S I_A \text{ cos } \theta)^2$$

Essa equação pode ser usada para obter V_ϕ em função da corrente I_A :

$$V_\phi = \sqrt{E_A^2 - (X_S I_A \text{ cos } \theta)^2} - X_S I_A \text{ sen } \theta$$

Um programa simples (*M-file*) para MATLAB pode ser usado para calcular V_ϕ (e portanto V_T) em função da corrente. O *M-file* está mostrado a seguir.

```
% M-file: term_char_a.m
% M-file para plotar as características de terminal do
% gerador do Exemplo 4-4 com uma carga de FP 0,8 atrasado.

% Primeiro, inicialize as amplitudes da corrente (21 valores
% no intervalo 0-60 A)
i_a = (0:1:20) * 3;
```

```

% Agora, inicialize todos os demais valores
v_phase = zeros(1,21);
e_a = 277.0;
x_s = 1.0;
theta = 36.87 * (pi/180);    % Convertido para radianos

% Agora, calcule v_phase para cada nível de corrente
for ii = 1:21
    v_phase(ii) = sqrt(e_a^2 - (x_s * i_a(ii) * cos(theta))^2 -
                      (x_s * i_a(ii) * sin(theta))^2);
end

% Calcule a tensão de terminal a partir da tensão de fase
v_t = v_phase * sqrt(3);

% Plote a característica de terminal, lembrando que a
% corrente de linha é a mesma que i_a
plot(i_a,v_t,'Color','k','Linewidth',2.0);
xlabel('Corrente de Linha (A)','Fontweight','Bold');
ylabel('Tensão de Terminal (V)','Fontweight','Bold');
title('Característica de Terminal para Carga de FP 0,8 Atrasado',...
      'Fontweight','Bold');
grid on;
axis([0 60 400 550]);

```

O gráfico resultante da execução deste *M-file* está mostrado na Figura 4-25a.

- (b) Se o gerador for carregado com uma corrente de FP 0,8 adiantado, o diagrama fasorial resultante será semelhante ao mostrado na Figura 4-24c. Para encontrar V_ϕ , a maneira mais fácil é construir um triângulo reto no diagrama fasorial, como está mostrado na figura. Da Figura 4-24c, o triângulo reto fornece

$$E_A^2 = (V_\phi - X_S I_A \sin \theta)^2 + (X_S I_A \cos \theta)^2$$

Essa equação pode ser usada para obter V_ϕ em função da corrente I_A :

$$V_\phi = \sqrt{E_A^2 - (X_S I_A \cos \theta)^2} + X_S I_A \sin \theta$$

Essa equação pode ser usada para calcular e plotar a característica de terminal, de modo semelhante à parte *a* anterior. A característica de terminal resultante está mostrada na Figura 4-25b.

4.9 OPERAÇÃO EM PARALELO DE GERADORES SÍNCRONOS

No mundo atual, é muito raro encontrar um gerador síncrono isolado que esteja alimentando sua própria carga, independentemente de outros geradores. Essa situação só ocorre em algumas aplicações incomuns, como geradores de emergência. Em todas as aplicações usuais de geradores, há mais de um gerador operando em paralelo para fornecer a potência demandada pelas cargas. Um exemplo extremo dessa situação é a rede elétrica de um país, em que milhares de geradores compartilham literalmente a carga do sistema.

Por que os geradores síncronos são colocados a funcionar em paralelo? Há diversas vantagens importante nesse tipo de operação:

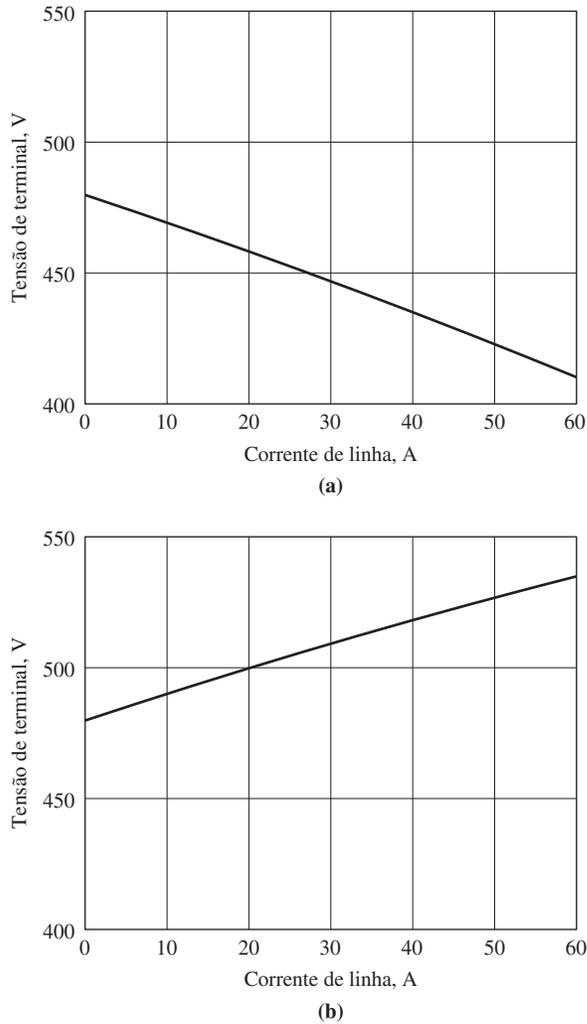


FIGURA 4-25

(a) Característica de terminal para o gerador do Exemplo 4-4, com carga de FP 0,8 atrasado.
 (b) Característica de terminal para o gerador, com carga de FP 0,8 adiantado.

1. Diversos geradores podem alimentar uma carga maior do que apenas uma máquina isolada.
2. A presença de muitos geradores aumenta a confiabilidade do sistema de potência porque, se um deles falhar, não ocorrerá uma perda total de potência para a carga.
3. A presença de muitos geradores em paralelo permite que um ou mais deles sejam removidos para desligamento e manutenção preventiva.
4. Quando apenas um gerador está sendo usado e não está operando próximo da plena carga, então ele será relativamente ineficiente. Quando há muitas máqui-

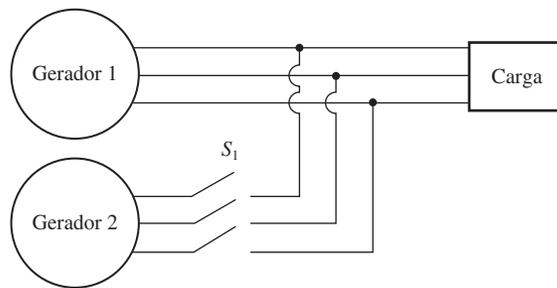


FIGURA 4-26

Um gerador sendo ligado em paralelo com um sistema de potência que já está operando.

nas menores em paralelo, é possível operar com apenas uma fração delas. As que estiverem realmente operando estarão funcionando próximo da plena carga e, portanto, mais eficientemente.

Esta seção explora os requerimentos para colocar geradores CA em paralelo e, em seguida, examina o comportamento dos geradores síncronos que estão operando em paralelo.

As condições requeridas para ligação em paralelo

A Figura 4-26 mostra um gerador síncrono G_1 , que está fornecendo potência para uma carga, e um outro gerador G_2 , que será ligado em paralelo com G_1 quando a chave S_1 for fechada. Que condições devem ser atendidas antes que a chave seja fechada e os dois geradores ligados?

Se a chave for fechada arbitrariamente em um instante qualquer, os geradores estarão sujeitos a danos graves e a carga poderá perder potência. Se as tensões não forem exatamente as mesmas em cada condutor que está sendo conectado, haverá um fluxo *muito* grande de corrente quando a chave for fechada. Para evitar esse problema, cada uma das três fases deve ter *exatamente o mesmo valor de tensão e ângulo de fase* que o condutor ao qual ela está sendo ligada. Em outras palavras, a tensão na fase a deve ser *exatamente* a mesma que a tensão na fase a' e assim por diante para as fases $b-b'$ e $c-c'$. Para conseguir esse acoplamento, as seguintes *condições de paralelismo* devem ser atendidas:

1. As *tensões eficazes de linha* dos dois geradores devem ser iguais.
2. Os dois geradores devem ter a mesma *sequência de fases*.
3. Os ângulos de fase das duas fases a devem ser iguais.
4. A frequência do novo gerador, o gerador *que está entrando em paralelo*, deve ser ligeiramente superior à frequência do sistema que já está em operação.

Essas condições para ligação em paralelo requerem algumas explicações. A condição 1 é óbvia – para que dois conjuntos de tensões sejam idênticos, eles devem naturalmente ter o mesmo valor de tensão eficaz. As tensões nas fases a e a' serão completamente idênticas em todos os instantes se ambos os seus valores e ângulos forem os mesmos, o que explica a condição 3.

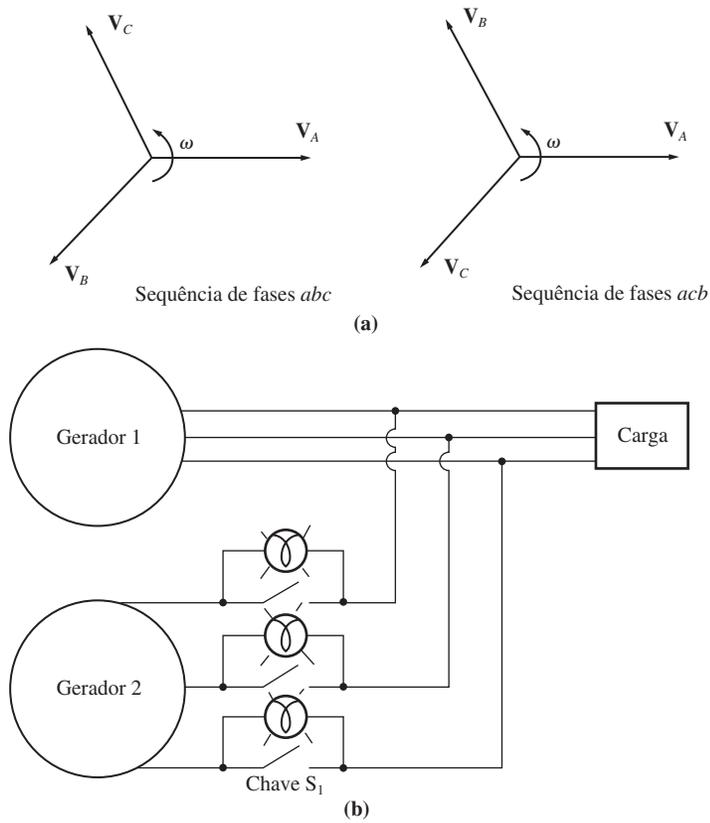


FIGURA 4-27

(a) As duas seqüências de fases possíveis de um sistema trifásico. (b) O método das três lâmpadas para verificação da seqüência de fases.

A Condição 2 assegura que a seqüência na qual as tensões de fase passam por picos nos dois geradores seja a mesma. Se a seqüência de fases for diferente (como está mostrado na Figura 4-27a), então, mesmo que um par de tensões (as fases *a*) esteja em fase, os outros dois pares de tensões estarão 120° fora de fase. Se os dois geradores fossem ligados dessa forma, não haveria problema com a fase *a*, mas correntes muito elevadas circulariam nas fases *b* e *c*, danificando ambas as máquinas. Para corrigir o problema de seqüência de fases, simplesmente inverta as ligações de duas fases de uma das máquinas.

Se as frequências dos geradores não estiverem muito próximas uma da outra quando os geradores são ligados entre si, ocorrerão grandes transitórios de potência até que os geradores se estabilizem em uma frequência comum. As frequências das duas máquinas devem ser muito próximas, mas não podem ser exatamente iguais. Elas devem diferir em um pequeno valor, de modo que o ângulo de fase da máquina que está entrando em paralelo mude lentamente em relação ao ângulo de fase do sistema já em operação. Desse modo, pode-se observar o ângulo entre as tensões e fechar a chave S_1 quando os sistemas estão exatamente em fase.

O procedimento genérico para ligar geradores em paralelo

Suponha que o gerador G_2 seja ligado ao sistema que já está operando, mostrado na Figura 4-27. Os seguintes passos devem ser seguidos para fazer a ligação em paralelo.

Primeiro, usando voltímetros, a corrente de campo da máquina que está entrando em paralelo deve ser ajustada até que sua tensão de terminal seja igual à tensão de linha do sistema já em operação.

Segundo, a sequência de fases do gerador que está entrando em paralelo deve ser comparada com a sequência de fases do sistema que já está operando. A sequência de fases pode ser verificada de diferentes modos. Uma maneira é ligar de modo alternado um pequeno motor de indução aos terminais de cada um dos dois geradores. Se a cada vez o motor girar no mesmo sentido, a sequência de fases será a mesma em ambos os geradores. Se o motor girar em sentidos opostos, então as sequências de fases serão diferentes e dois dos condutores do gerador que está entrando em paralelo devem ser invertidos.

Outra maneira de verificar a sequência de fases é o *método das três lâmpadas*. Nessa abordagem, três lâmpadas incandescentes são conectadas aos terminais abertos da chave que liga o gerador ao sistema, como está mostrado na Figura 4-27b. À medida que a fase se modifica entre os dois sistemas, as lâmpadas inicialmente brilham muito (grande diferença de fase) e então brilham fracamente (pequena diferença de fase). *Se as três lâmpadas brilharem e apagarem-se em conjunto, isso significa que os sistemas terão a mesma sequência de fases*. Se as lâmpadas brilharem sucessivamente uma depois da outra, os sistemas terão a sequência oposta de fases e uma das sequências deverá ser invertida.

A seguir, a frequência do gerador que está entrando em paralelo é ajustada para uma frequência ligeiramente superior à do sistema já em operação. Isso é feito inicialmente com um frequencímetro até que as frequências estejam próximas e então observando as alterações de fase entre os sistemas. O gerador que está entrando é ajustado para uma frequência ligeiramente maior. Desse modo, ao ser conectado à linha, o gerador fornece potência como gerador, em vez de consumi-la como motor (esse ponto será explicado mais adiante).

Logo que as frequências tornarem-se muito aproximadamente iguais, a fase entre as tensões dos dois sistemas se alterará muito vagarosamente. As alterações de fase são observadas e, quando os ângulos de fase forem iguais, a chave que conecta os dois sistemas será fechada.

Como podemos dizer que dois sistemas estão finalmente em fase? Um modo simples é observar as três lâmpadas incandescentes descritas antes na discussão da sequência de fases. Quando as três lâmpadas estiverem apagadas, a diferença de tensão entre elas é zero e os sistemas estão em fase. Esse esquema simples funciona, mas não é muito exato. Um modo melhor é empregar um sincronoscópio. Um *sincronoscópio* ou *sincroscópio* é um aparelho que mede a diferença no ângulo de fase entre as fases a dos dois sistemas. A Figura 4-28 mostra o aspecto de um sincronoscópio. O dial mostra a diferença de fase entre as duas fases a , estando 0 (significando em fase) no topo e 180° na parte inferior. Como as frequências dos dois sistemas são ligeiramente diferentes, o ângulo de fase no medidor mudará lentamente. Se o sistema ou gerador que está entrando em paralelo for mais veloz que o sistema que está já operando (situação desejada), então o ângulo de fase adianta-se e a agulha do sincronoscópio girará em sentido horário. Se a máquina que está entrando for mais lenta, a agulha irá girar em

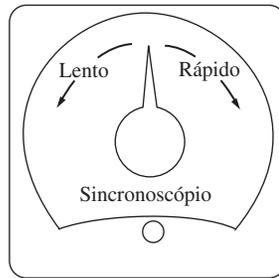


FIGURA 4-28
Um sincronoscópio.

sentido anti-horário. Quando a agulha do sincronoscópio estiver na posição vertical, as tensões estarão em fase e a chave poderá ser fechada para ligar os dois sistemas.

No entanto, observe que um *sincronoscópio verifica as relações de apenas uma fase*. Ele não dá nenhuma informação sobre a sequência de fases.

Em geradores de grande porte que fazem parte de sistemas de energia elétrica, esse processo completo de ligar um novo gerador em paralelo com a linha é automatizado e um computador realiza esse trabalho. Com geradores menores, no entanto, o operador deve realizar manualmente os passos recém descritos de ligação em paralelo de um gerador.

Características de frequência versus potência e tensão versus potência reativa de um gerador síncrono

Todos os geradores são acionados por uma *máquina motriz*, que é a fonte de potência mecânica do gerador. O tipo mais comum de máquina motriz é a turbina a vapor, mas outros tipos incluem máquinas diesel, turbinas a gás, turbinas hidráulicas e mesmo turbinas eólicas.

Independentemente da fonte original de potência, todas as máquinas motrizes tendem a se comportar de modo semelhante – à medida que aumenta a potência retirada delas, a velocidade com que giram diminui. A diminuição de velocidade é geralmente não linear, mas alguma forma de mecanismo regulador de velocidade é usualmente incluída para tornar linear a diminuição da velocidade com o aumento da demanda de potência.

Qualquer que seja o mecanismo regulador presente em uma máquina motriz, ele sempre será ajustado para apresentar uma característica de ligeira queda com o aumento da carga. A queda de velocidade (QV) de uma máquina motriz é definida pela equação

$$QV = \frac{n_{vz} - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\% \quad (4-27)$$

em que n_{vz} é a velocidade a vazio da máquina motriz e n_{pc} é a velocidade a plena carga da máquina motriz. A maioria das máquinas motrizes de geradores apresenta queda de velocidade de 2 a 4%, como definido na Equação (4-27). Além disso, a maioria dos reguladores apresenta algum tipo de ajuste do ponto de operação para permitir que a velocidade a vazio da turbina seja variada. Um gráfico típico de velocidade versus potência está mostrado na Figura 4-29.

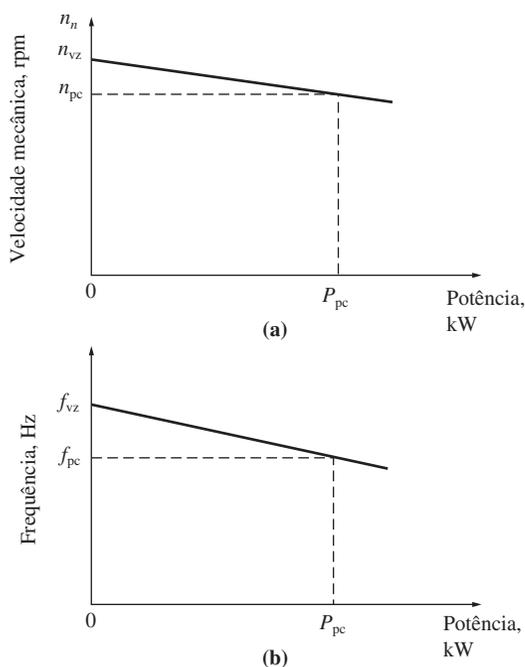


FIGURA 4-29

(a) A curva de velocidade *versus* potência de uma máquina motriz típica. (b) Curva resultante da frequência *versus* potência do gerador.

Como a velocidade do eixo relaciona-se com a frequência elétrica resultante através da Equação (3-34),

$$f_{se} = \frac{n_{sm} P}{120} \quad (3-34)$$

podemos concluir que a saída de potência de um gerador síncrono está relacionada com sua frequência. Um exemplo gráfico de frequência *versus* potência está mostrado na Figura 4-29b. Curvas características de frequência *versus* potência desse tipo desempenham um papel fundamental na operação em paralelo de geradores síncronos.

A relação entre frequência e potência pode ser descrita quantitativamente por meio da equação

$$P = s_p(f_{vz} - f_{sis}) \quad (4-28)$$

em que P = saída de potência do gerador

f_{vz} = frequência a vazio do gerador

f_{sis} = frequência de operação do sistema

s_p = inclinação da curva, em kW/Hz ou MW/Hz

Uma relação semelhante pode ser obtida para a potência reativa Q e a tensão de terminal V_T . Como visto anteriormente, quando uma carga atrasada é ligada a

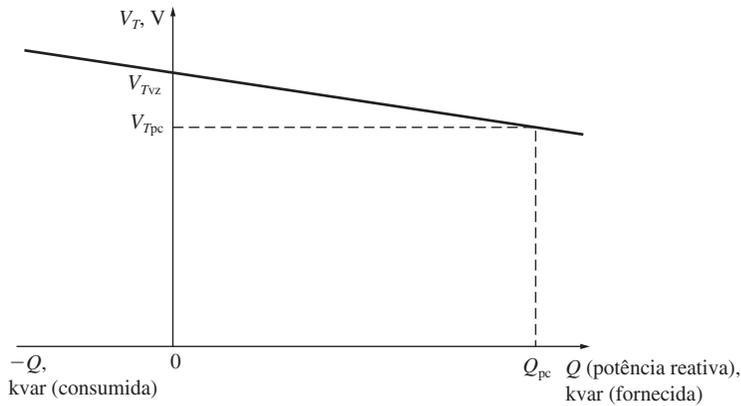


FIGURA 4-30 Curva de tensão de terminal (V_T) versus potência reativa (Q) de um gerador síncrono.

um gerador síncrono, sua tensão de terminal cai. De modo semelhante, quando uma carga adiantada é ligada a um gerador síncrono, sua tensão de terminal eleva-se. É possível fazer um gráfico da tensão de terminal versus potência reativa e tal gráfico tem uma característica descendente, como o mostrado na Figura 4-30. Essa característica não é intrinsecamente linear, mas muitos reguladores de tensão de gerador incluem um recurso para torná-la linear. A curva característica pode ser movida para cima e para baixo, alterando o ponto de operação da tensão de terminal a vazio no regulador de tensão. Assim como a característica de frequência versus potência, essa curva desempenha um papel importante na operação em paralelo dos geradores síncronos.

A relação entre a tensão de terminal e a potência reativa poderá ser expressa por uma equação similar à de frequência versus potência [Equação (4-28)] se o regulador de tensão produzir uma saída que é linear com as alterações de potência reativa.

É importante entender que, quando um único gerador está operando isoladamente, a potência ativa P e a potência reativa Q fornecidas pelo gerador terão os valores demandados pela carga conectada ao gerador – as potências P e Q fornecidas não podem ser ajustadas pelos controles do gerador. Portanto, para uma potência ativa qualquer dada, o ajuste no regulador controla a frequência f_e de operação do gerador e, para uma potência reativa qualquer dada, a corrente de campo controla a tensão V_T de terminal do gerador.

EXEMPLO 4-5 A Figura 4-31 mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61,0 Hz e uma inclinação s_p de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 atrasado, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado.

- (a) Antes que a chave seja fechada, qual é a frequência de operação do sistema?
- (b) Depois que a carga 2 é ligada, qual é a frequência de operação do sistema?
- (c) Depois que a carga 2 é ligada, que ação um operador poderá realizar para que a frequência do sistema retorne a 60 Hz?

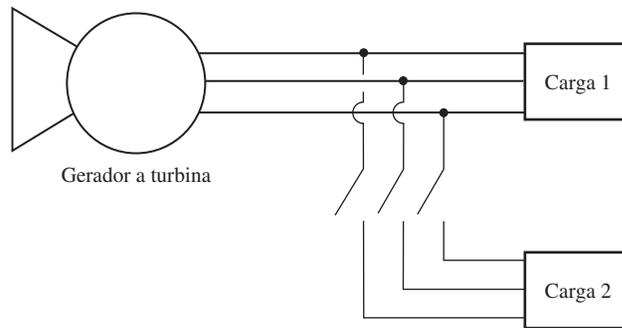


FIGURA 4-31
O sistema de potência do Exemplo 4-5.

Solução

Este problema afirma que a inclinação da característica do gerador é 1 MW/Hz e que sua frequência a vazio é 61 Hz. Portanto, a potência produzida pelo gerador é dada por

$$P = s_p(f_{vz} - f_{sis}) \quad (4-28)$$

de modo que

$$f_{sis} = f_{vz} - \frac{P}{s_p}$$

(a) A frequência inicial é dada por

$$\begin{aligned} f_{sis} &= f_{vz} - \frac{P}{s_p} \\ &= 61 \text{ Hz} - \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW/Hz}} = 61 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz} = 60 \text{ Hz} \end{aligned}$$

(b) Depois que a carga 2 é ligada, temos

$$\begin{aligned} f_{sis} &= f_{vz} - \frac{P}{s_p} \\ &= 61 \text{ Hz} - \frac{1800 \text{ kW}}{1 \text{ MW/Hz}} = 61 \text{ Hz} - 1,8 \text{ Hz} = 59,2 \text{ Hz} \end{aligned}$$

(c) Depois que a carga é ligada, a frequência do sistema cai para 59,2 Hz. Para restabelecer a frequência própria de operação do sistema, o operador deve reajustar o regulador, incrementando o ponto de frequência a vazio em 0,8 Hz, ou seja, elevando para 61,8 Hz. Essa ação levará a frequência do sistema de volta para 60 Hz.

Em resumo, quando um gerador está funcionando isoladamente alimentando as cargas do sistema,

1. As potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador serão os valores demandados pelas cargas conectadas.
2. O ponto de ajuste no regulador irá controlar a frequência de operação do sistema de potência.

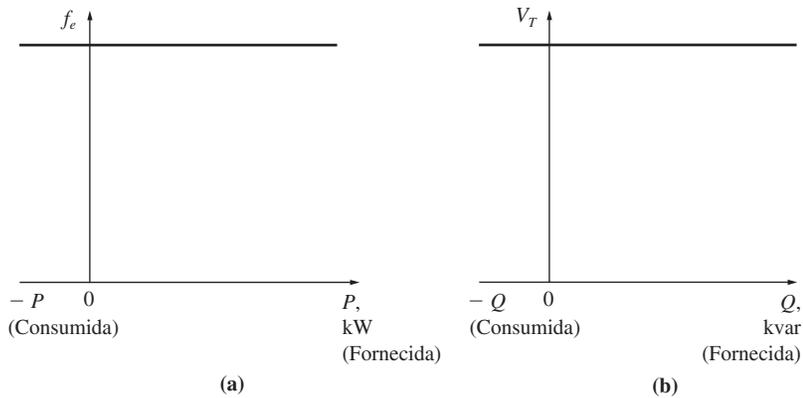


FIGURA 4-32 Curvas de barramento infinito: (a) frequência *versus* potência e (b) tensão de terminal *versus* potência reativa.

3. A corrente de campo (ou ponto de ajuste de campo no regulador) controla a tensão de terminal do sistema de potência.

Essa é a situação encontrada em lugares remotos, nos quais há geradores isolados em funcionamento.

Operação de geradores em paralelo em grandes sistemas de potência

Quando um gerador síncrono é conectado a um sistema de potência, frequentemente esse sistema é tão grande que não há *nada* que o operador do gerador possa fazer para alterar de modo significativo o sistema. Um exemplo dessa situação é a ligação de um gerador à rede de energia elétrica de um país. Essa rede é tão grande que nenhuma ação realizada no gerador será capaz de causar alguma mudança observável na frequência da rede.

Essa ideia está idealizada no conceito de barramento infinito. Um *barramento infinito* é um sistema de potência tão grande que sua tensão e sua frequência não variam, independentemente de quanta potência ativa ou reativa é retirada ou fornecida ao sistema. A característica de potência *versus* frequência de tal sistema está mostrada na Figura 4-32a e a característica de potência *versus* tensão está mostrada na Figura 4-32b.

Para compreender o comportamento de um gerador ligado a tal sistema de grande porte, examine um sistema que consiste em um gerador e um barramento infinito em paralelo alimentando uma carga. Assuma que a máquina motriz do gerador tem um mecanismo regulador, mas que o campo é controlado manualmente por uma resistência. É mais fácil explicar o funcionamento do gerador sem considerar um regulador automático de corrente de campo. Assim, nesta discussão, ignoraremos as pequenas diferenças causadas pelo regulador do campo quando um está presente. Um sistema como esse é mostrado na Figura 4-33a.

Quando um gerador é ligado em paralelo com outro gerador ou com um sistema de grande porte, *a frequência e a tensão de terminal de todas as máquinas devem ser*

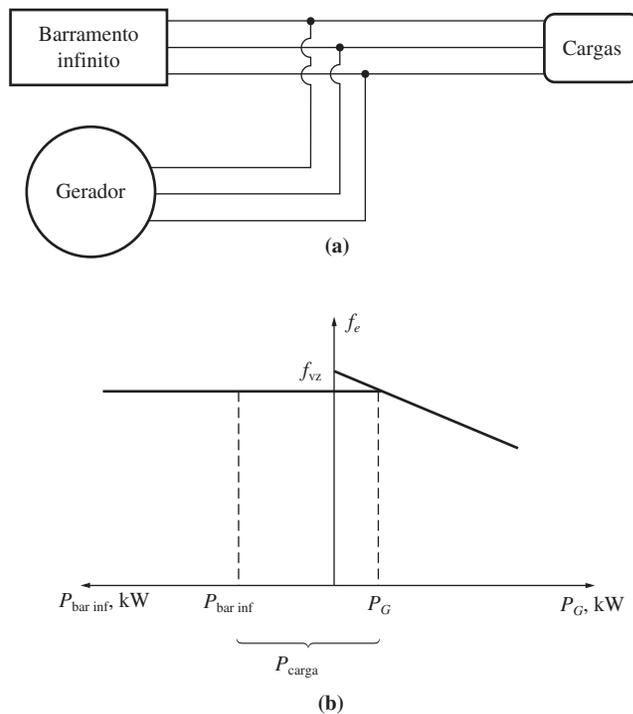


FIGURA 4-33

(a) Um gerador síncrono operando em paralelo com um barramento infinito. (b) O diagrama de frequência *versus* potência de um gerador síncrono em paralelo com um barramento infinito.

as mesmas, porque todos os seus condutores de saída estão ligados entre si. Portanto, as características de potência ativa *versus* frequência ou de potência reativa *versus* tensão podem ser plotadas lado a lado com um eixo vertical em comum. O primeiro desses dois gráficos está mostrado na Figura 4-33b.

Assuma que o gerador acabou de ser colocado em paralelo com o barramento infinito, de acordo com o procedimento descrito anteriormente. Então, o gerador estará basicamente “flutuando” na linha, fornecendo uma pequena quantidade de potência ativa e pouca ou nenhuma potência reativa. Essa situação está mostrada na Figura 4-34.

Suponha que o gerador tenha sido colocado em paralelo com a linha, mas que, em vez de ter uma frequência ligeiramente superior, estivesse com uma frequência ligeiramente inferior à frequência do sistema que já estava operando. Nesse caso, quando a colocação em paralelo estiver terminada, a situação resultante é a mostrada na Figura 4-35. Observe que aqui a frequência a vazio do gerador é inferior à frequência de operação do sistema. Nessa frequência, a potência fornecida pelo gerador é na realidade negativa. Em outras palavras, quando a frequência a vazio do gerador é inferior à frequência de operação do sistema, o gerador na realidade consome potência elétrica e funciona como um motor. Para assegurar que um gerador entre na linha fornecendo potência em vez de consumir, a frequência da máquina que está entrando deve ser ajustada para um valor superior ao da frequência do sistema que já está ope-

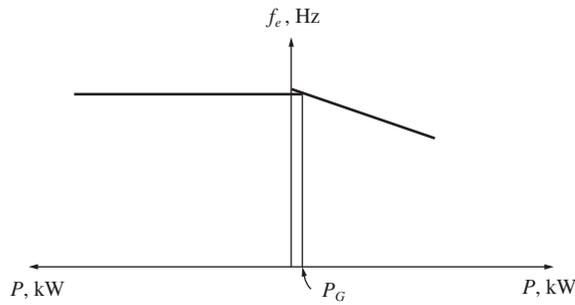


FIGURA 4-34
O diagrama de frequência *versus* potência no instante após entrar em paralelo.

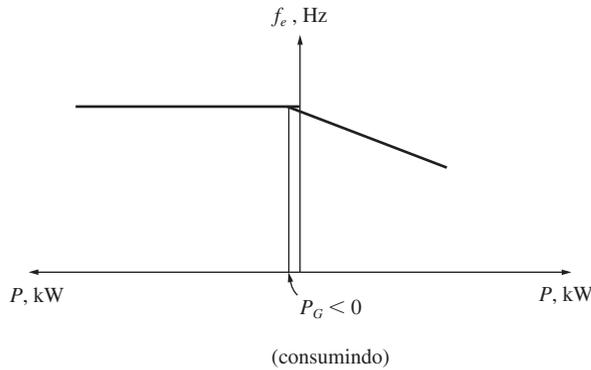


FIGURA 4-35
O diagrama de frequência *versus* potência para o caso de frequência a vazio do gerador ser ligeiramente *menor* do que a frequência do sistema antes da entrada em paralelo.

rando. Muitos geradores reais têm conectado a eles um sistema de desligamento no caso de inversão do fluxo de potência. Assim, é imperativo que, ao entrar em paralelo, o gerador esteja com sua frequência mais elevada do que a frequência do sistema que já está operando. Se o gerador que está entrando começar a consumir potência, ele será desligado da linha.

Após o gerador ter sido ligado, que acontece quando o ponto de ajuste no regulador é aumentado? O efeito dessa elevação é deslocar a frequência a vazio do gerador para cima. Como a frequência do sistema permanece inalterada (a frequência de um barramento infinito não pode mudar), a potência fornecida pelo gerador eleva-se. Isso está mostrado no diagrama da Figura 4-36a e no diagrama fasorial da Figura 4-36b. Observe no diagrama fasorial que $E_A \text{ sen } \delta$ (proporcional à potência fornecida enquanto V_T é constante) aumentou, ao passo que o valor de $E_A (= K\phi\omega)$ permanece constante, já que tanto a corrente de campo I_F quanto a velocidade de rotação ω não se alteram. Quando o ponto de ajuste no regulador é novamente aumentado, a frequência a vazio eleva-se e a potência fornecida pelo gerador aumenta. Quando a saída de potência cresce, E_A mantém-se com valor constante, ao passo que $E_A \text{ sen } \delta$ aumenta novamente.

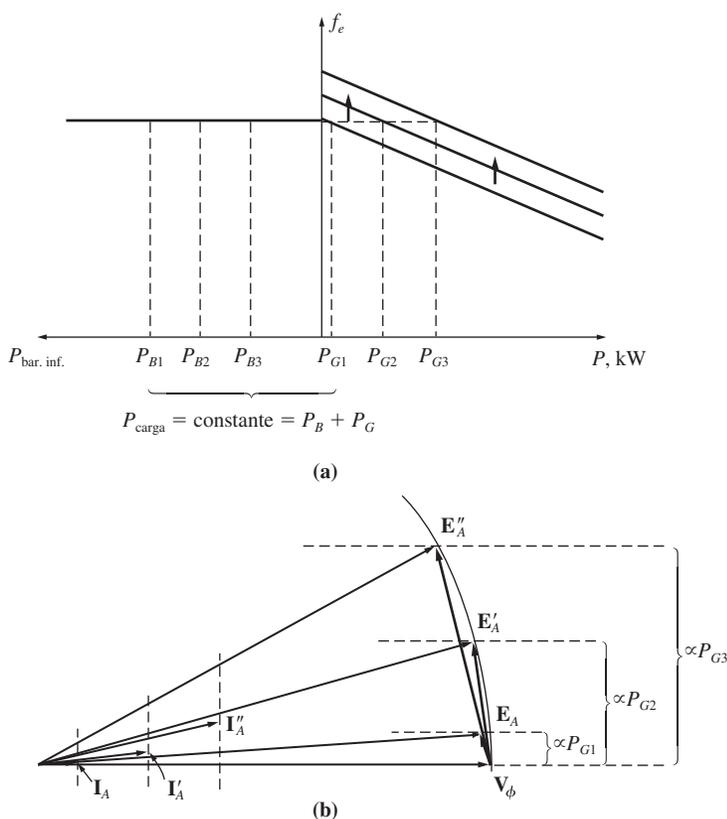


FIGURA 4-36 O efeito de aumentar o ponto de ajuste do regulador no (a) diagrama de frequência versus potência; (b) diagrama fasorial.

Que acontece nesse sistema se a saída de potência do gerador for aumentada até que exceda a potência consumida pela carga? Se isso ocorrer, a potência extra gerada fluirá de volta para o barramento infinito. Este, por definição, pode fornecer ou consumir qualquer quantidade de potência sem alteração na frequência, de modo que a potência extra será consumida.

Depois que a potência ativa do gerador foi ajustada para o valor desejado, o diagrama fasorial do gerador é similar ao da Figura 4-36b. Observe que desta vez o gerador está na realidade operando com um fator de potência ligeiramente adiantado, fornecendo potência reativa negativa. Pode-se dizer também que o gerador está consumindo potência reativa. Como o gerador pode ser ajustado para que forneça alguma potência reativa Q ao sistema? Isso pode ser feito ajustando a corrente de campo da máquina. Para compreender por que isso é verdadeiro, é necessário considerar as restrições de operação do gerador nessas condições.

A primeira restrição do gerador é que a potência deve permanecer constante quando I_f é alterada. A potência que entra em um gerador (desconsiderando as perdas) é dada pela equação $P_{\text{entrada}} = \tau_{\text{ind}} \omega_m$. Por outro lado, a máquina motriz de um

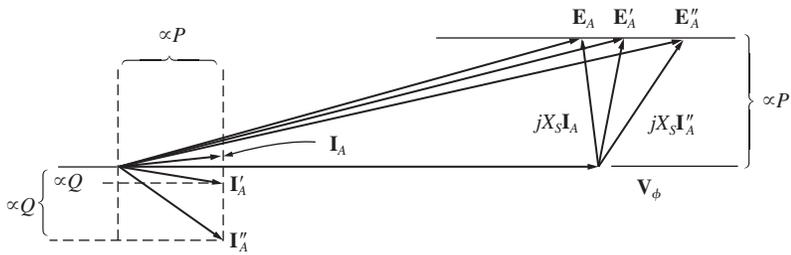


FIGURA 4-37
O efeito do aumento da corrente de campo do gerador sobre o diagrama fasorial da máquina.

gerador síncrono tem uma característica de conjugado *versus* velocidade que se mantém fixa para um dado ponto de ajuste qualquer do regulador. Essa curva altera-se somente quando o ponto de ajuste no regulador é mudado. Como o gerador está conectado a um barramento infinito, sua velocidade *não pode* se alterar. Se a velocidade do gerador não mudar e o ponto de ajuste no regulador não for alterado, a potência fornecida pelo gerador deverá permanecer constante.

Se a potência fornecida permanecer constante quando a corrente de campo é alterada, então as distâncias proporcionais à potência no diagrama fasorial ($I_A \cos \theta$ e $E_A \sin \delta$) não poderão se alterar. Quando a corrente de campo cresce, o fluxo ϕ aumenta e, portanto, $E_A (= K\phi\omega)$ aumenta. Se E_A crescer, mas $E_A \sin \delta$ tiver de se manter constante, então o fasor E_A deverá “deslizar” ao longo da reta de potência constante, como está mostrado na Figura 4-37. Como V_ϕ é constante, o ângulo de $jX_s I_A$ altera-se como está mostrado e, portanto, o ângulo e o módulo de I_A mudam. Observe que, como resultado, a distância proporcional a Q ($I_A \sin \theta$) aumenta. Em outras palavras, *o aumento da corrente de campo em um gerador síncrono, operando em paralelo com um barramento infinito, faz aumentar a saída de potência reativa do gerador.*

Em resumo, quando um gerador está em paralelo com um barramento infinito:

1. A frequência e a tensão de terminal do gerador são controladas pelo sistema ao qual ele está ligado.
2. O ponto de ajuste no regulador do gerador controla a potência ativa fornecida pelo gerador ao sistema.
3. A corrente de campo do gerador controla a potência reativa fornecida pelo gerador ao sistema.

Essa situação é muito semelhante ao modo como os geradores reais operam quando são conectados a um sistema de potência de porte muito grande.

Operação de geradores em paralelo com outros geradores de mesmo porte

Quando um único gerador operava isolado, as potências ativa e reativa (P e Q) fornecidas pelo gerador eram fixas, condicionadas a serem iguais à potência demandada pela carga. A frequência e a tensão de terminal eram alteradas pelo ponto de ajuste no

regulador e pela corrente de campo. Quando um gerador operava em paralelo com um barramento infinito, a frequência e a tensão de terminal eram condicionadas a serem constantes pelo barramento infinito e as potências ativa e reativa eram alteradas pelo ponto de ajuste no regulador e pela corrente de campo. Que acontece quando um gerador síncrono é ligado em paralelo, não com um barramento infinito, mas, em vez disso, com outro gerador de mesmo porte? Qual será o efeito da alteração do ponto de ajuste no regulador e na corrente de campo?

Se um gerador for ligado em paralelo com outro do mesmo tamanho, o sistema resultante será como o mostrado na Figura 4-38a. Nesse sistema, a condição básica é que a soma das potências ativa e reativa fornecidas pelos dois geradores deva ser igual às potências P e Q demandadas pela carga. Não há nenhuma condição para a frequência do sistema ser constante nem para a potência de um dado gerador ser constante. O diagrama de potência *versus* frequência de um sistema como esse, imediatamente após G_2 ter sido colocado em paralelo com a linha, está mostrado na Figura 4-38b. Aqui, a potência total P_{tot} (que é igual a P_{carga}) é dada por

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{carga}} = P_{G1} + P_{G2} \quad (4-29a)$$

e a potência reativa total é dada por

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{carga}} = Q_{G1} = Q_{G2}$$

Que acontecerá se o ponto G_2 de ajuste no regulador de for aumentado? Quando o ponto de ajuste no regulador for aumentado, a curva de frequência *versus* potência de G_2 desloca-se para cima, como está mostrado na Figura 4-38c. Lembre-se de que a potência total fornecida à carga não deve se alterar. Na frequência original f_1 , a potência fornecida por G_1 e G_2 será agora maior do que a demanda de carga, de modo que o sistema não pode continuar a operar na mesma frequência de antes. De fato, há apenas uma frequência na qual a soma das potências que saem dos dois geradores é igual à P_{carga} . Essa frequência f_2 é mais elevada do que a frequência original de operação do sistema. Nessa frequência, G_2 fornece mais potência do que antes e G_1 fornece menos potência.

Portanto, quando dois geradores estão operando em conjunto, um aumento do ponto de ajuste no regulador de um deles

1. Eleva a frequência do sistema.
2. Eleva a potência fornecida por esse gerador e, ao mesmo tempo, reduz a potência fornecida pelo outro.

Que acontecerá se a corrente de campo de G_2 for aumentada? O comportamento resultante é análogo à situação de potência ativa e está mostrado na Figura 4-38d. Quando dois geradores estão operando em paralelo e a corrente de campo de G_2 é aumentada,

1. A tensão de terminal do sistema é aumentada.
2. A potência reativa Q fornecida por esse gerador aumenta, ao passo que a potência reativa fornecida pelo outro gerador diminui.

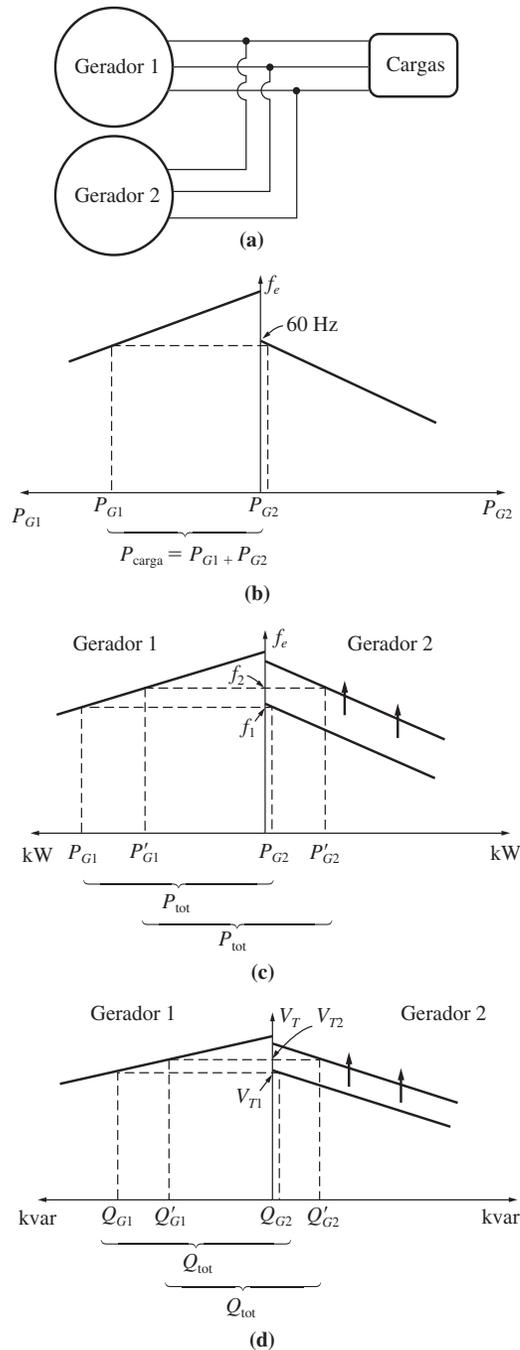


FIGURA 4-38

(a) Um gerador conectado em paralelo com outra máquina de mesmo tamanho. (b) O diagrama de frequência *versus* potência no instante em que o gerador 2 é colocado em paralelo com o sistema. (c) O efeito de aumentar o ponto de ajuste no regulador do gerador 2 sobre o sistema. (d) O efeito de aumentar a corrente de campo do gerador 2 sobre o sistema.

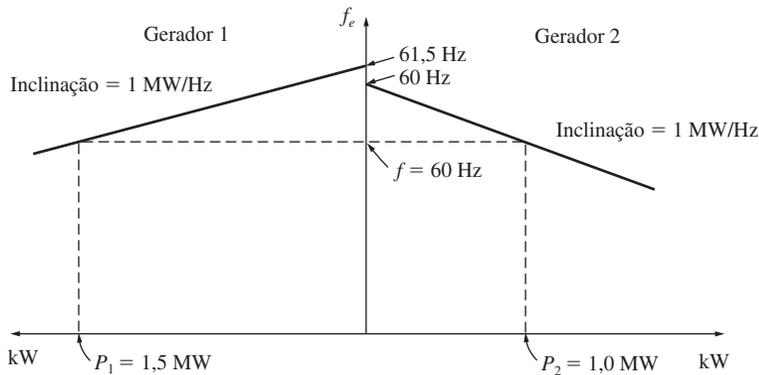


FIGURA 4-39

O diagrama de frequência *versus* potência para o sistema do Exemplo 4-6.

Se as inclinações e as frequências a vazio das curvas de queda de velocidade dos geradores (frequência *versus* potência) forem conhecidas, as potências fornecidas por cada gerador e a frequência resultante do sistema poderão ser determinadas quantitativamente. O Exemplo 4-6 ilustra como isso pode ser feito.

EXEMPLO 4-6 A Figura 4-38a mostra dois geradores alimentando uma carga. O Gerador 1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O Gerador 2 tem uma frequência a vazio de 61,0 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência *versus* frequência do sistema está mostrado na Figura 4-39.

- Em que frequência esse sistema opera e quanta potência é fornecida por cada um dos dois geradores?
- Agora, suponha que uma carga adicional de 1 MW seja adicionada a esse sistema de potência. Qual será a nova frequência do sistema e quanta potência G_1 e G_2 fornecerão?
- Com o sistema na configuração descrita na parte *b*, quais serão a frequência do sistema e as potências dos geradores se o ponto de ajuste no regulador de G_2 for incrementado em 0,5 Hz?

Solução

A potência produzida por um gerador síncrono com uma dada inclinação e uma frequência a vazio é dada pela Equação (4-28):

$$P_1 = s_{p1}(f_{vz,1} - f_{sis})$$

$$P_2 = s_{p2}(f_{vz,2} - f_{sis})$$

Como a potência total fornecida pelos geradores deve ser igual à potência consumida pelas cargas,

$$P_{carga} = P_1 + P_2$$

Essas equações podem ser usadas para responder às questões formuladas.

- (a) No primeiro caso, ambos os geradores têm uma inclinação de 1 MW/Hz e G_1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz, ao passo que G_2 tem uma frequência a vazio de 61,0 Hz. A carga total é 2,5 MW. Portanto, a frequência do sistema pode ser obtida como segue:

$$\begin{aligned} P_{\text{carga}} &= P_1 + P_2 \\ &= s_{P1}(f_{vz,1} - f_{\text{sis}}) + s_{P2}(f_{vz,2} - f_{\text{sis}}) \\ 2,5 \text{ MW} &= (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - f_{\text{sis}}) + (1 \text{ MW/Hz})(61 \text{ Hz} - f_{\text{sis}}) \\ &= 61,5 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} + 61 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} \\ &= 122,5 \text{ MW} - (2 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} \end{aligned}$$

$$\text{Portanto, } f_{\text{sis}} = \frac{122,5 \text{ MW} - 2,5 \text{ MW}}{(2 \text{ MW/Hz})} = 60,0 \text{ Hz}$$

As potências resultantes fornecidas pelos dois geradores são

$$\begin{aligned} P_1 &= s_{P1}(f_{vz,1} - f_{\text{sis}}) \\ &= (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - 60,0 \text{ Hz}) = 1,5 \text{ MW} \\ P_2 &= s_{P2}(f_{vz,2} - f_{\text{sis}}) \\ &= (1 \text{ MW/Hz})(61,0 \text{ Hz} - 60,0 \text{ Hz}) = 1 \text{ MW} \end{aligned}$$

- (b) Quando a carga é incrementada em 1 MW, seu total torna-se 3,5 MW. A nova frequência do sistema é dada agora por

$$\begin{aligned} P_{\text{carga}} &= s_{P1}(f_{vz,1} - f_{\text{sis}}) + s_{P2}(f_{vz,2} - f_{\text{sis}}) \\ 3,5 \text{ MW} &= (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - f_{\text{sis}}) + (1 \text{ MW/Hz})(61 \text{ Hz} - f_{\text{sis}}) \\ &= 61,5 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} + 61 \text{ MW} - (1 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} \\ &= 122,5 \text{ MW} - (2 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} \end{aligned}$$

$$\text{Portanto, } f_{\text{sis}} = \frac{122,5 \text{ MW} - 3,5 \text{ MW}}{(2 \text{ MW/Hz})} = 59,5 \text{ Hz}$$

As potências resultantes são

$$\begin{aligned} P_1 &= s_{P1}(f_{vz,1} - f_{\text{sis}}) \\ &= (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - 59,5 \text{ Hz}) = 2,0 \text{ MW} \\ P_2 &= s_{P2}(f_{vz,2} - f_{\text{sis}}) \\ &= (1 \text{ MW/Hz})(61,0 \text{ Hz} - 59,5 \text{ Hz}) = 1,5 \text{ MW} \end{aligned}$$

- (c) Se o ponto de ajuste no regulador de G_2 for incrementado em 0,5 Hz, a nova frequência do sistema será

$$\begin{aligned} P_{\text{carga}} &= s_{P1}(f_{vz,1} - f_{\text{sis}}) + s_{P2}(f_{vz,2} - f_{\text{sis}}) \\ 3,5 \text{ MW} &= (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - f_{\text{sis}}) + (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - f_{\text{sis}}) \\ &= 123 \text{ MW} - (2 \text{ MW/Hz})f_{\text{sis}} \\ f_{\text{sis}} &= \frac{123 \text{ MW} - 3,5 \text{ MW}}{(2 \text{ MW/Hz})} = 59,75 \text{ Hz} \end{aligned}$$

As potências resultantes são

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 = s_{P1}(f_{vz,1} - f_{\text{sis}}) \\ &= (1 \text{ MW/Hz})(61,5 \text{ Hz} - 59,75 \text{ Hz}) = 1,75 \text{ MW} \end{aligned}$$

Observe que a frequência do sistema elevou-se, a potência fornecida por G_2 elevou-se e a potência fornecida por G_1 baixou.

Quando dois geradores de tamanhos semelhantes estão operando em paralelo, uma mudança no ponto de ajuste no regulador de um deles altera ambas a frequência do sistema e o compartilhamento de potência entre eles. Normalmente, seria desejável ajustar apenas uma dessas grandezas de cada vez. Como é possível ajustar o compartilhamento de potência do sistema, independentemente da frequência do sistema e vice-versa?

A resposta é muito simples. Um aumento no ponto de ajuste do regulador de um dos geradores eleva a potência dessa máquina e também eleva a frequência do sistema. A diminuição no ponto de ajuste do regulador do outro gerador diminui a potência daquela máquina e também diminui a frequência do sistema. Portanto, para ajustar o compartilhamento de potência sem alterar a frequência do sistema, *aumente o ponto de ajuste no regulador de um dos geradores e simultaneamente diminua o ponto de ajuste no regulador do outro gerador* (veja a Figura 4-40a). De modo similar, *para ajustar a frequência do sistema sem alterar o compartilhamento de potência, simultaneamente aumente ou diminua os pontos de ajuste de ambos os reguladores* (veja Figura 4-40b).

Os ajustes de potência reativa e de tensão de terminal operam de forma semelhante. Para alterar o compartilhamento de potência reativa sem mudar V_T , *simultaneamente, aumente a corrente de campo de um gerador e diminua a corrente de campo do outro* (veja a Figura 4-40c). Para alterar a tensão de terminal sem afetar o compartilhamento de potência reativa, *simultaneamente, aumente ou diminua as correntes de campo* (veja a Figura 4-40d).

Em resumo, no caso de dois geradores operando em conjunto:

1. O sistema está condicionado a que a potência total fornecida pelos dois geradores em conjunto deva ser igual à quantidade consumida pela carga. Nem f_{sis} nem V_T estão condicionados a serem constantes.
2. Para ajustar o compartilhamento de potência ativa entre os geradores sem alterar f_{sis} , simultaneamente, aumente o ponto de ajuste no regulador de um gerador e diminua o ponto de ajuste no regulador do outro gerador. A máquina, cujo ponto de ajuste no seu regulador foi incrementado, assumirá uma parte maior da carga.
3. Para ajustar f_{sis} sem alterar o compartilhamento de potência ativa, simultaneamente, aumente ou diminua os pontos de ajuste em ambos os reguladores.
4. Para ajustar o compartilhamento de potência reativa entre os geradores sem alterar V_T , simultaneamente, aumente a corrente de campo de um gerador e diminua a corrente de campo do outro gerador. A máquina, cuja corrente de campo aumentou, assumirá uma parte maior da carga reativa.
5. Para ajustar V_T sem alterar o compartilhamento de potência reativa, simultaneamente, aumente ou diminua as correntes de campo de ambos os geradores.

No caso de qualquer gerador que está entrando em paralelo com outras máquinas, é muito importante que ele tenha uma característica *descendente* de frequência *versus* potência. Se dois geradores tiverem características planas ou quase planas, o compartilhamento de potência entre eles poderá variar amplamente com mínimas alterações da velocidade a vazio. Esse problema está ilustrado na Figura 4-41. Observe que mesmo mudanças mínimas de f_{vz} em um dos geradores causam alterações muito grandes no compartilhamento de potência. Para assegurar um bom controle desse

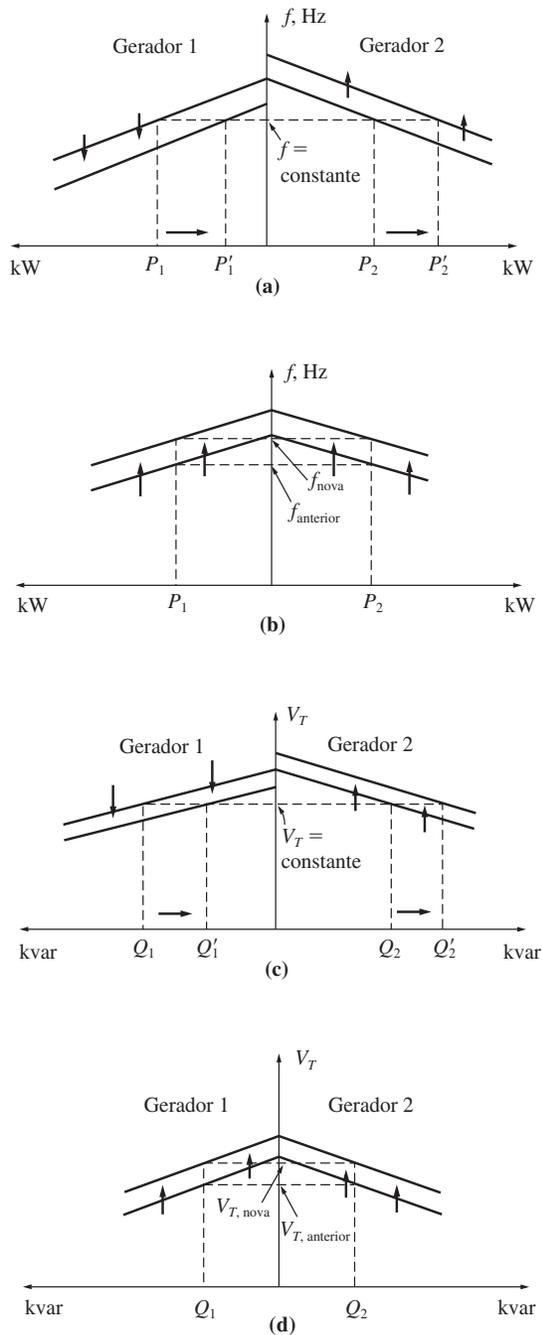


FIGURA 4-40

(a) Alteração do compartilhamento de potência sem afetar a frequência do sistema. (b) Alteração da frequência do sistema sem afetar o compartilhamento de potência. (c) Alteração do compartilhamento de potência reativa sem afetar a tensão de terminal. (d) Alteração da tensão de terminal sem afetar o compartilhamento de potência reativa.

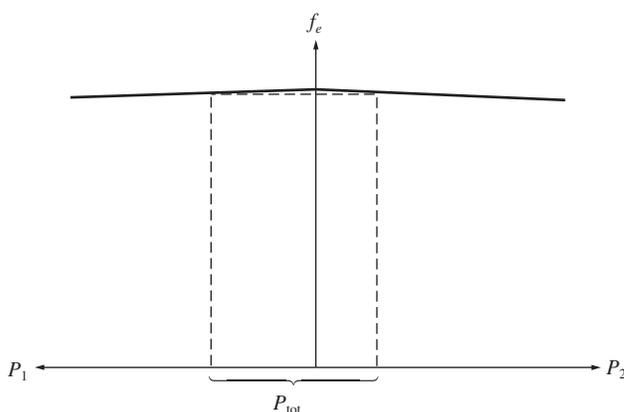


FIGURA 4-41

Dois geradores síncronos com características planas de frequência *versus* potência. Uma mudança mínima na frequência a vazio de qualquer uma dessas máquinas poderia causar enormes variações no compartilhamento de potência.

compartilhamento entre os geradores, eles devem ter quedas de velocidade na faixa de 2 a 5%.

4.10 TRANSITÓRIOS EM GERADORES SÍNCRONOS

Quando o conjugado no eixo aplicado a um gerador ou a carga de saída de um gerador mudam repentinamente, há sempre um transitório que perdura por um período finito de tempo antes que o gerador retorne ao regime permanente. Por exemplo, quando um gerador síncrono é colocado em paralelo com um sistema de potência já em funcionamento, ele está inicialmente girando mais rápido e tem uma frequência maior do que a do sistema de potência. Após ter entrado em paralelo, há um período transitório antes que o gerador entre em regime permanente com a linha e opere com a frequência dessa linha, ao mesmo tempo em que passa a fornecer uma pequena quantidade de potência à carga.

Para ilustrar essa situação, consulte a Figura 4-42. A Figura 4-42a mostra os campos magnéticos e o diagrama fasorial do gerador no instante imediatamente anterior à sua entrada em paralelo com o sistema de potência. Aqui, o gerador que está entrando alimenta uma carga a vazio, sua corrente de estator é zero, $\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi$ e $\mathbf{B}_R = \mathbf{B}_{\text{liq}}$.

No instante exato $t = 0$, a chave que liga o gerador ao sistema de potência é fechada. Isso causa o surgimento de uma corrente de estator. Como o rotor do gerador ainda está girando mais rapidamente do que a velocidade do sistema, ele continuará a se mover à frente da tensão \mathbf{V}_ϕ do sistema. O conjugado induzido no eixo do gerador é dado por

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{liq}} \quad (3-60)$$

O sentido desse conjugado é oposto ao sentido do movimento e aumenta proporcionalmente ao incremento do ângulo de fase entre \mathbf{B}_R e \mathbf{B}_{liq} (ou \mathbf{E}_A e \mathbf{V}_ϕ). Esse conjuga-

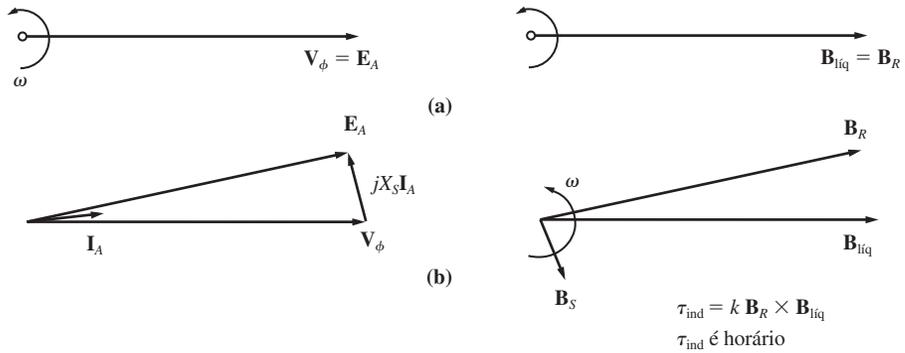


FIGURA 4-42

(a) O diagrama fasorial e os campos magnéticos de um gerador no instante de entrar em paralelo com um sistema de potência de grande porte. (b) O diagrama fasorial e os campos magnéticos logo após (a). Aqui, o rotor adiantou-se ao campo magnético líquido, produzindo um conjugado horário. Esse conjugado está desacelerando o rotor até a velocidade síncrona do sistema de potência.

do *oposto ao sentido do movimento* desacelera o gerador até que ele finalmente esteja girando na velocidade síncrona do restante do sistema de potência.

De modo similar, se o gerador estivesse girando com uma velocidade *menor* do que a velocidade síncrona quando ao entrar em paralelo com o sistema de potência, o rotor estaria atrasado em relação aos campos magnéticos e um conjugado *no sentido do movimento* seria induzido no eixo da máquina. Esse conjugado aceleraria o rotor até que ele novamente girasse na velocidade síncrona.

Estabilidade de transitórios em geradores síncronos

Aprendemos anteriormente que o limite de estabilidade estática de um gerador síncrono é a potência máxima que o gerador pode fornecer em qualquer circunstância. Essa potência máxima é dada pela Equação (4-21):

$$P_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \quad (4-21)$$

e o respectivo conjugado máximo é

$$\tau_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_S} \quad (4-30)$$

Teoricamente, antes de se tornar instável, o gerador deveria ser capaz de fornecer potência e conjugado até atingir esses valores. Na prática, entretanto, a carga máxima que pode ser alimentada pelo gerador é limitada a um nível muito inferior devido ao seu *limite de estabilidade dinâmica*.

Para compreender a razão dessa limitação, considere novamente o gerador da Figura 4-42. Se o conjugado aplicado pela máquina motriz (τ_{ap}) for repentinamente aumentado, o eixo do gerador começará a acelerar e o ângulo de conjugado δ aumentará, como foi descrito. Na medida em que o ângulo δ aumenta, o conjugado induzido

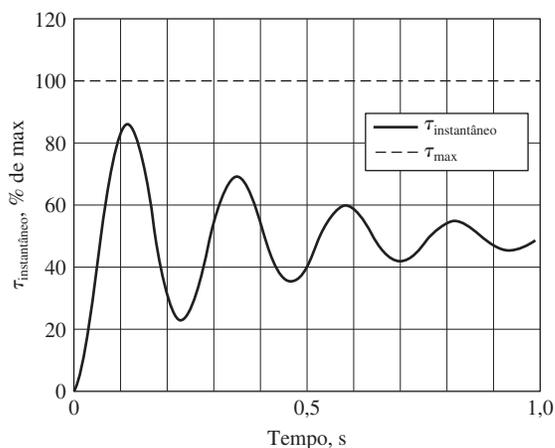


FIGURA 4-43

A resposta dinâmica quando um conjugado aplicado igual a 50% de τ_{\max} é repentinamente adicionado a um gerador síncrono.

τ_{ind} do gerador crescerá até que um ângulo δ seja atingido, no qual τ_{ind} será igual e oposto a τ_{ap} . Esse é o ponto de funcionamento em regime permanente do gerador para a nova carga. Entretanto, o rotor do gerador tem uma inércia elevada, de modo que seu ângulo de conjugado δ na realidade *ultrapassa* a posição de regime permanente e gradualmente acomoda-se segundo uma oscilação amortecida, como está mostrado na Figura 4-43. A forma exata dessa oscilação pode ser determinada resolvendo uma equação diferencial não linear, que está além dos objetivos deste livro. Para mais informação, veja a Referência 4, p. 345.

O ponto importante na Figura 4-43 é que, *se em qualquer ponto da resposta transitória o conjugado instantâneo ultrapassar τ_{\max} , o gerador síncrono será instável*. A amplitude das oscilações depende de quão repentinamente o conjugado adicional é aplicado ao gerador síncrono. Se ele for adicionado muito gradativamente, a máquina deverá ser capaz de quase alcançar o limite de estabilidade estática. Por outro lado, se a carga for adicionada repentinamente, a máquina será estável apenas até um limite muito mais baixo, que é de cálculo muito complicado. Para mudanças muito abruptas de conjugado ou carga, o limite de estabilidade dinâmica pode ser inferior à metade do limite de estabilidade estática.

Transitórios de curto-circuito em geradores síncronos

Indubitavelmente, a condição transitória mais grave que pode ocorrer em um gerador síncrono é a situação em que os três terminais do gerador são repentinamente colocados em curto. Em um sistema de potência, tal curto é denominado uma *falta*. Há diversas componentes de corrente presentes em um gerador síncrono em curto; essas componentes serão descritas a seguir. Os mesmos efeitos ocorrem em transitórios menos graves, tais como alterações de carga. Contudo, no caso extremo de um curto-circuito eles são muito mais óbvios.

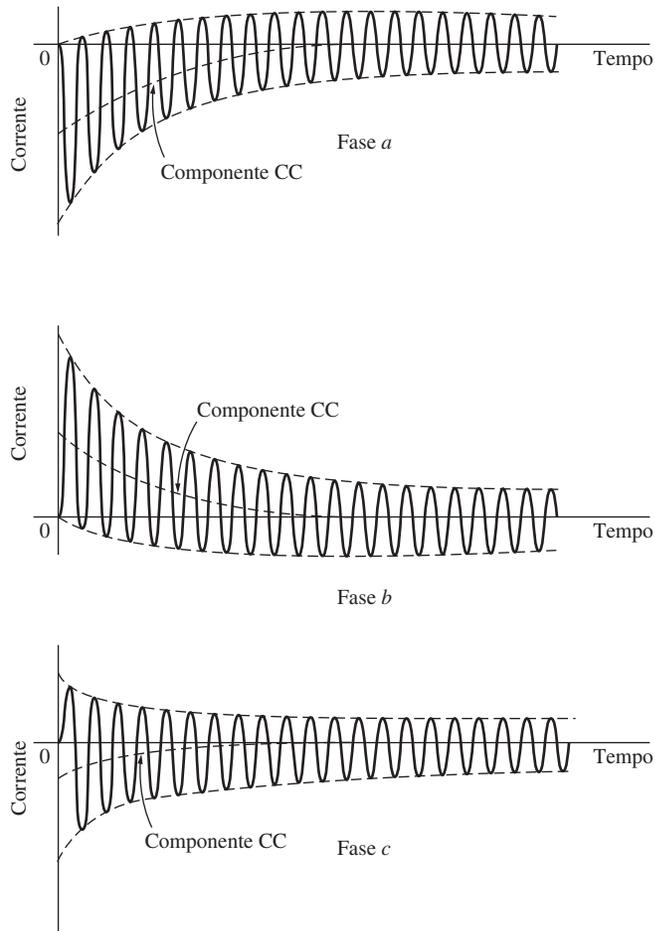


FIGURA 4-44

As correntes totais de falta em função do tempo, durante uma falta trifásica nos terminais de um gerador síncrono.

Quando uma falta ocorre em um gerador síncrono, o fluxo de corrente resultante nas fases do gerador pode ser como está mostrado na Figura 4-44. A corrente em cada fase mostrada na Figura 4-42 pode ser representada como uma componente CC transitória sobreposta a uma componente CA simétrica. A componente CA simétrica isolada está mostrada na Figura 4-45.

Antes da falta, estavam presentes no gerador somente tensões e correntes CA, ao passo que, após a falta, estarão presentes correntes CA e também CC. De onde surgiram as correntes CC? Lembre-se que o gerador síncrono é basicamente indutivo – ele é modelado por uma tensão gerada interna em série com a reatância síncrona. Lembre-se também que *uma corrente não pode mudar instantaneamente em um indutor*. Quando ocorre a falta, a componente CA de corrente salta para um valor

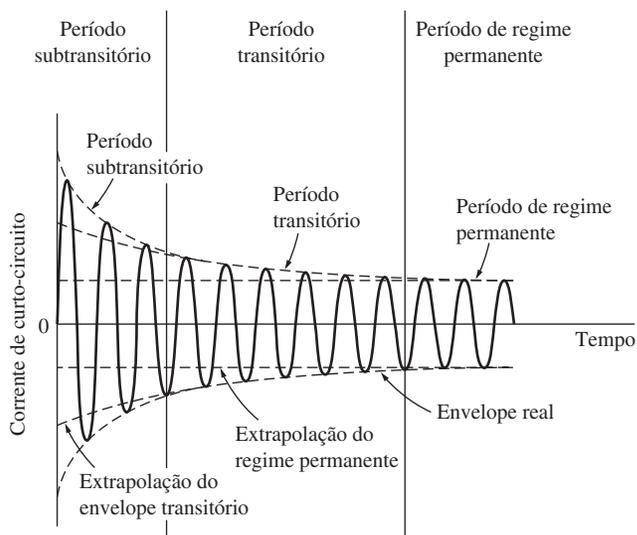


FIGURA 4-45

A componente CA simétrica da corrente de falta.

muito elevado, mas a corrente total não pode mudar nesse instante. A componente de corrente CC é grande o suficiente para que a soma das componentes CA e CC imediatamente após a falta seja igual à corrente CA que fluía imediatamente antes da falta. Como no momento da falta os valores instantâneos de corrente são diferentes em cada fase, o valor da componente CC da corrente será diferente em cada fase.

Essas componentes CC de corrente caem muito rapidamente, mas inicialmente seus valores são em média 50 ou 60% da corrente CA no instante imediatamente após a ocorrência da falta. Portanto, a corrente total inicial é tipicamente 1,5 ou 1,6 vezes maior que a componente CA tomada isoladamente.

A componente CA simétrica da corrente está mostrada na Figura 4-45. Ela pode ser dividida a grosso modo em três intervalos. Após a ocorrência da falta, durante aproximadamente o primeiro ciclo a corrente CA é muito elevada e cai muito rapidamente. Esse intervalo de tempo é denominado *período subtransitório*. Depois que ele termina, a corrente continua a cair a uma taxa menor, até que no fim atinge um estado permanente. O intervalo de tempo em que ela cai a uma taxa menor é denominado *período transitório* e o período que se segue após ter atingido o estado permanente é denominado *período de regime permanente*.

Se o valor eficaz da componente CA de corrente for plotada em função do tempo em uma escala semilogarítmica, será possível observar os três períodos da corrente de falta. Esse gráfico está mostrado na Figura 4-46. Partindo de um gráfico como esse, pode-se determinar as constantes de tempo do decaimento em cada período.

A corrente CA eficaz que flui no gerador durante o período subtransitório é denominada *corrente subtransitória* e é representada pelo símbolo I'' . Essa corrente é causada pelos enrolamentos amortecedores nos geradores síncronos (veja o Capítulo 5 para uma discussão sobre enrolamentos amortecedores). A constante de tempo da corrente subtransitória recebe o símbolo T'' e pode ser determinada a

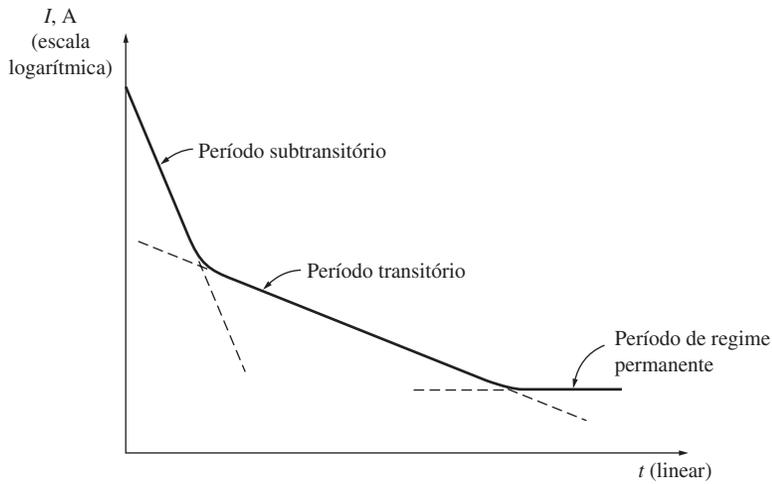


FIGURA 4-46

Gráfico semilogarítmico do valor da componente CA da corrente de falta em função do tempo. As constantes de tempo subtransitória e transitória do gerador podem ser determinadas a partir de um gráfico como esse.

partir da inclinação da corrente subtransitória no gráfico da Figura 4-46. Frequentemente, essa corrente pode ter 10 vezes o valor da corrente de falta de regime permanente.

A corrente CA eficaz que flui no gerador durante o período transitório é denominada *corrente transitória* e é representada pelo símbolo I' . Ela é causada por uma componente CC de corrente induzida no *circuito de campo* no instante do curto-circuito. Essa corrente de campo eleva a tensão gerada interna e causa um aumento da corrente de falta. Como a constante de tempo do circuito de campo CC é muito maior do que a constante de tempo dos enrolamentos amortecedores, o período transitório dura muito mais do que o período subtransitário. Essa constante de tempo recebe o símbolo T' . Frequentemente, a corrente eficaz média durante o período transitório chega a 5 vezes a corrente de falta de regime permanente.

Após o período transitório, a corrente de falta chega a condição de regime permanente. A corrente de regime permanente durante uma falta é representada pelo símbolo I_{ss} . Seu valor é dado aproximadamente pela componente de frequência fundamental da tensão gerada interna E_A , no interior da máquina, pela reatância síncrona:

$$I_{ss} = \frac{E_A}{X_S} \quad \text{regime permanente} \quad (4-31)$$

O valor eficaz da corrente CA de falta de um gerador síncrono varia continuamente em função do tempo. Se I'' for a componente subtransitória da corrente no instante da falta, se I' for a componente transitória da corrente no instante da falta e se I_{ss} for a corrente de falta de regime permanente, o valor eficaz da corrente, em qualquer instante após a ocorrência da falta nos terminais do gerador, será

$$I(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I_{ss})e^{-t/T'} + I_{ss} \quad (4-32)$$

É costume definir reatâncias subtransitória e transitória para uma máquina síncrona como uma maneira conveniente de descrever as componentes subtransitória e transitória da corrente de falta. A *reatância subtransitória* de um gerador síncrono é definida como a razão entre a componente fundamental da tensão gerada interna e a componente subtransitória da corrente no início da falta. Ela é dada por

$$X'' = \frac{E_A}{I''} \quad \text{subtransitória} \quad (4-33)$$

De modo similar, a *reatância transitória* de um gerador síncrono é definida como a razão entre a componente fundamental de E_A e a componente transitória de corrente I' no início da falta. Esse valor de corrente é encontrado pela extrapolação da região transitória da Figura 4-46 até o tempo zero:

$$X' = \frac{E_A}{I'} \quad \text{transitória} \quad (4-34)$$

Para os propósitos de dimensionamento dos equipamentos de proteção, frequentemente assume-se que a corrente subtransitória é E_A/X'' e a corrente transitória é E_A/X' , porque esses são os valores máximos que as respectivas correntes podem assumir.

Observe que a discussão anterior sobre faltas supôs que todas as três fases entravam em curto-circuito simultaneamente. Se a falta não envolver igualmente todas as três fases, então métodos mais complexos de análise são necessários para seu entendimento. Esses métodos (conhecidos como componentes simétricas) estão além dos objetivos deste livro.

EXEMPLO 4-7 Um gerador síncrono trifásico de 100 MVA, 13,5 kV, 60 Hz e ligado em Y, está operando na tensão nominal e a vazio quando uma falta trifásica acontece em seus terminais. Suas reatâncias por unidade em relação à própria base da máquina são

$$X_S = 1,0 \quad X' = 0,25 \quad X'' = 0,12$$

e suas constantes de tempo são

$$T' = 1,10\text{s} \quad T'' = 0,04\text{s}$$

A componente CC inicial dessa máquina é em média 50% da componente CA inicial.

- Qual é a componente CA de corrente desse gerador no instante imediatamente após a ocorrência da falta?
- Qual é a corrente total (CA mais CC) que circula no gerador imediatamente após a ocorrência da falta?
- Qual será a componente CA de corrente após dois ciclos? Após 5 s ?

Solução

A corrente de base desse gerador é dada pela equação

$$\begin{aligned} I_{L, \text{base}} &= \frac{S_{\text{base}}}{\sqrt{3} V_{L, \text{base}}} & (2-95) \\ &= \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3}(13,8 \text{ kV})} = 4184 \text{ A} \end{aligned}$$

As correntes subtransitória, transitória e de regime permanente, por unidade e em ampères, são

$$I'' = \frac{E_A}{X''} = \frac{1,0}{0,12} = 8,333$$

$$= (8,333)(4184 \text{ A}) = 34.900 \text{ A}$$

$$I' = \frac{E_A}{X'} = \frac{1,0}{0,25} = 4,00$$

$$= (4,00)(4184 \text{ A}) = 16.700 \text{ A}$$

$$I_{ss} = \frac{E_A}{X'} = \frac{1,0}{1,0} = 1,00$$

$$= (1,00)(4184 \text{ A}) = 4184 \text{ A}$$

(a) A componente CA inicial de corrente é $I'' = 34.900 \text{ A}$.

(b) A corrente total (CA mais CC) no início da falta é

$$I_{\text{tot}} = 1,5I'' = 52.350 \text{ A}$$

(c) A componente CA de corrente em função do tempo é dada pela Equação (4-32):

$$I(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I_{ss})e^{-t/T'} + I_{ss} \quad (4-32)$$

$$= 18.200e^{-t/0,04 \text{ s}} + 12.516e^{-t/1,1 \text{ s}} + 4184 \text{ A}$$

Após dois ciclos, $t = 1/30$ se a corrente total é

$$I\left(\frac{1}{30}\right) = 7910 \text{ A} + 12.142 \text{ A} + 4184 \text{ A} = 24.236 \text{ A}$$

Após dois ciclos, a componente transitória de corrente é claramente a maior e isso ocorre no período transitório do curto-circuito. Aos 5 s, a corrente desceu até

$$I(5) = 0 \text{ A} + 133 \text{ A} + 4184 \text{ A} + 4317 \text{ A}$$

Isso faz parte do período de regime permanente do curto-circuito.

4.11 ESPECIFICAÇÕES NOMINAIS DE UM GERADOR SÍNCRONO

Há certos limites básicos para a velocidade e a potência que podem ser obtidos de um gerador síncrono. Esses limites são expressos como *especificações* ou *características nominais* da máquina. O propósito das especificações nominais é o de proteger o gerador de danos, devido ao uso impróprio dessa máquina. Com essa finalidade, cada máquina tem uma série de especificações nominais listadas em uma placa de identificação fixada nela.

Especificações nominais típicas de uma máquina síncrona são *tensão*, *frequência*, *velocidade*, *potência aparente*, (*quilovolts-ampères*), *fator de potência*, *corrente de campo* e *fator de serviço*. Essas especificações nominais e as relações entre elas serão discutidas nas seções seguintes.

Especificações nominais de tensão, velocidade e frequência

A frequência nominal de um gerador síncrono depende do sistema de potência ao qual ele está conectado. As frequências comumente usadas atualmente nos sistemas

de potência são 50 Hz (na Europa, Ásia, etc.), 60 Hz (nas Américas) e 400 Hz (em aplicações de controle e de propósitos especiais). Uma vez conhecida a frequência de operação, haverá apenas uma velocidade de rotação possível para um dado número de polos. A relação fixa entre frequência e velocidade é dada pela Equação (3-34):

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (3-34)$$

como foi anteriormente descrito.

Talvez a especificação nominal mais óbvia seja a de tensão, com a qual um gerador é projetado para operar. A tensão de um gerador depende do fluxo, da velocidade de rotação e da construção mecânica da máquina. Para uma dada velocidade e um dado tamanho mecânico, quanto mais alta for a tensão desejada, maior será o fluxo requerido da máquina. Entretanto, o fluxo não pode ser aumentado indefinidamente, porque sempre há uma corrente de campo máxima permitida.

Outra consideração para estabelecer a tensão máxima permitida é a tensão de ruptura da isolamento do enrolamento – as tensões normais de operação não devem se aproximar demais da tensão de ruptura.

Pode-se operar um gerador, especificado para uma dada frequência nominal, em uma frequência diferente? Por exemplo, é possível operar um gerador de 60 Hz em 50 Hz? A resposta é um sim *qualificado*, desde que certas condições sejam preenchidas. Basicamente, o problema é que existe um limite para o fluxo máximo que se pode atingir em uma dada máquina. Como $E_A = K\phi\omega$, irá ocorrer uma alteração no valor máximo possível de E_A quando a velocidade variar. Especificamente, se um gerador de 60 Hz operar em 50 Hz, a tensão de funcionamento deve ter seu *valor nominal diminuído* para 50/60, ou 83,3%, de seu valor original. Exatamente o efeito oposto ocorre quando um gerador de 50 Hz opera em 60 Hz.

Especificações nominais de potência aparente e fator de potência

Há dois fatores que determinam o limite de potência das máquinas elétricas. Um deles é o conjugado mecânico no eixo da máquina e o outro é o aquecimento dos enrolamentos da máquina. Na prática, o eixo de um motor ou gerador síncrono é mecanicamente robusto o suficiente para que a máquina opere em regime permanente com uma potência muito maior do que sua potência nominal. Resulta que, na prática, o que define os limites para o regime permanente é o aquecimento dos enrolamentos da máquina.

Há dois enrolamentos em um gerador síncrono e cada um deve ser protegido do superaquecimento. Esses dois enrolamentos são o enrolamento de armadura e o enrolamento de campo. A corrente de armadura máxima aceitável determina a potência aparente nominal de um gerador, porque a potência aparente S é dada por

$$S = 3V_\phi I_A \quad (4-35)$$

Se a tensão nominal for conhecida, a corrente de armadura máxima aceitável determinará os quilovolts-ampères nominais do gerador:

$$S_{\text{nominal}} = 3V_{\phi, \text{nominal}} I_{A, \text{máx}} \quad (4-36)$$

ou

$$S_{\text{nominal}} = \sqrt{3}V_{L, \text{nominal}} I_{L, \text{máx}} \quad (4-37)$$

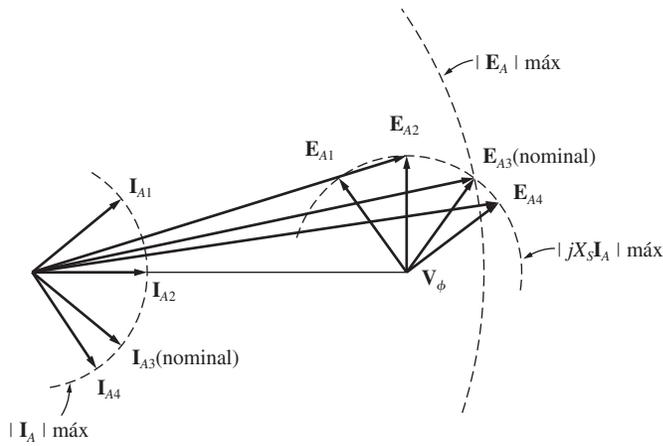


FIGURA 4-47
 O modo como o limite de corrente de campo do rotor determina o fator de potência nominal de um gerador.

É importante entender que, para o aquecimento dos enrolamentos de armadura, o fator de potência da corrente de armadura é irrelevante. O efeito de aquecimento das perdas no cobre do estator é dado por

$$P_{PCE} = 3I_A^2 R_A \tag{4-38}$$

e independe do ângulo da corrente em relação a V_ϕ . Como o ângulo de corrente é irrelevante para o aquecimento da armadura, o valor nominal da potência dessas máquinas é dado em quilovolts-ampères em vez de quilowatts.

O outro enrolamento de interesse é o enrolamento de campo. As perdas no cobre do campo são dadas por

$$P_{PCR} = I_F^2 R_F \tag{4-39}$$

Assim, o aquecimento máximo permitido define uma corrente de campo máxima para a máquina. Como $E_A = K\phi\omega$, essa equação determina o valor máximo aceitável para E_A .

O efeito de ter uma I_F máxima e uma E_A máxima traduz-se diretamente em um restrição no menor fator de potência aceitável para o gerador quando ele está funcionando com os quilovolts-ampères nominais. A Figura 4-47 mostra o diagrama fasorial de um gerador síncrono, com a corrente de armadura e a tensão nominais. A corrente pode assumir muitos ângulos diferentes, como mostrado. A tensão gerada interna E_A é a soma de V_ϕ e $jX_S I_A$. Observe que, para alguns ângulos de corrente possíveis, a E_A requerida excede $E_{A, \max}$. Se o gerador operasse com esses fatores de potência e corrente nominal de armadura, o enrolamento de campo queimaria.

O ângulo de I_A que requer a E_A máxima possível, enquanto V_ϕ mantém-se no valor nominal, fornece o fator de potência nominal do gerador. É possível operar o gerador com um fator de potência menor (maior atraso) do que o valor nominal, mas somente cortando os quilovolts-ampères fornecidos pelo gerador.

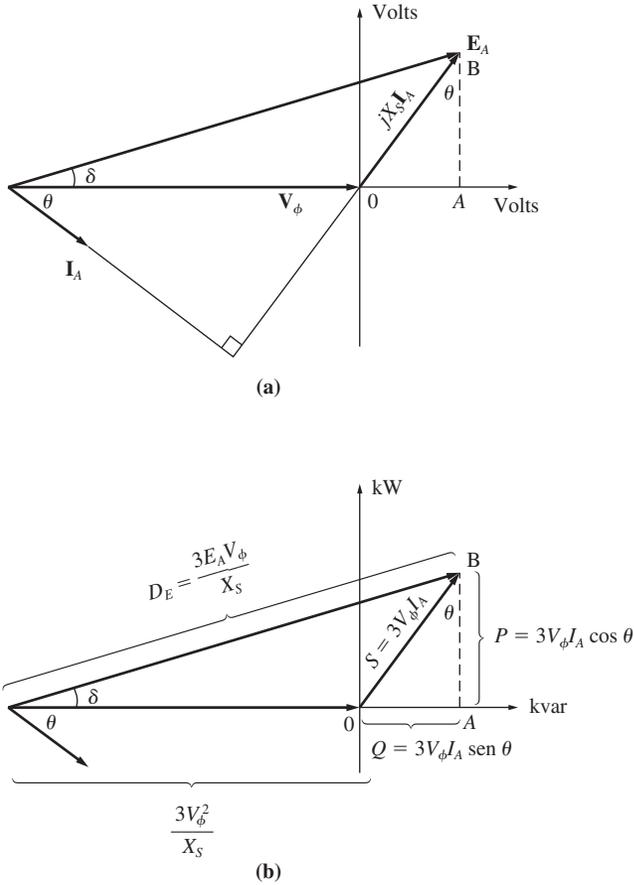


FIGURA 4-48 Desenvolvimento da curva de capacidade de um gerador síncrono. (a) O diagrama fasorial do gerador; (b) as respectivas unidades de potência.

Curvas de capacidade do gerador síncrono

Em um gerador síncrono, os limites de aquecimento do estator e do rotor juntamente com qualquer limitação externa podem ser expressos em forma gráfica por um *diagrama de capacidade*. Um diagrama de capacidade é um gráfico da potência complexa $S = P + jQ$. É obtido do diagrama fasorial do gerador, assumindo que V_ϕ é constante com a tensão nominal da máquina.

A Figura 4-48a mostra o diagrama fasorial de um gerador síncrono operando com um fator de potência atrasado e na tensão nominal. Um conjunto ortogonal de eixos é desenhado no diagrama, tendo sua origem na ponta de V_ϕ e com unidades em volts. Nesse diagrama, o segmento vertical AB tem um comprimento $X_S I_A \cos \theta$ e o segmento horizontal OA tem um comprimento $X_S I_A \sin \theta$.

A saída de potência ativa do gerador é dada por

$$P = 3V_\phi I_A \cos \theta \tag{4-17}$$

A saída de potência reativa é dada por

$$Q = 3V_\phi I_A \text{ sen } \theta \quad (4-19)$$

e a saída de potência aparente é dada por

$$S = 3V_\phi I_A \quad (4-35)$$

Desse modo, os eixos vertical e horizontal dessa figura podem ser redesenhados em termos de potências ativa e reativa (Figura 4-48b). O fator de conversão necessário para alterar a escala dos eixos de volts para volts-ampères (unidades de potência) é $3V_\phi/X_S$:

$$P = 3V_\phi I_A \cos \theta = \frac{3V_\phi}{X_S} (X_S I_A \cos \theta) \quad (4-40)$$

$$Q = 3V_\phi I_A \text{ sen } \theta = \frac{3V_\phi}{X_S} (X_S I_A \text{ sen } \theta) \quad (4-41)$$

e

Nos eixos de tensão, a origem do diagrama fasorial está em $-V_\phi$ no eixo horizontal, de modo que a origem do diagrama de potência está em

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3V_\phi}{X_S} (-V_\phi) \\ &= -\frac{3V_\phi^2}{X_S} \end{aligned} \quad (4-42)$$

A corrente de campo é proporcional ao fluxo da máquina e o fluxo é proporcional a $E_A = K\phi\omega$. O comprimento correspondente a E_A no diagrama de potência é

$$D_E = -\frac{3E_A V_\phi}{X_S} \quad (4-43)$$

A corrente de armadura I_A é proporcional a $X_S I_A$, e o comprimento correspondente a $X_S I_A$ no diagrama de potência é $3V_\phi I_A$.

A curva final de capacidade do gerador síncrono está mostrada na Figura 4-49. Trata-se de um gráfico de P versus Q , com a potência ativa P no eixo horizontal e a potência reativa Q no eixo vertical. Linhas de corrente de armadura I_A constante aparecem como linhas de $S = 3V_\phi I_A$ constante, as quais são círculos concêntricos em torno da origem. Linhas de corrente de campo constante correspondem a linhas de E_A constante, as quais são mostradas como círculos de raio $3E_A V_\phi / X_S$ centrados no ponto

$$Q = -\frac{3V_\phi^2}{X_S} \quad (4-42)$$

O limite da corrente de armadura aparece como um círculo correspondendo à I_A nominal ou aos quilovolts-ampères nominais. O limite da corrente de campo aparece como um círculo correspondendo a I_F ou E_A nominais. *Qualquer ponto que estiver simultaneamente dentro desses dois círculos é um ponto de operação seguro para o gerador.*

É também possível mostrar no diagrama outros tipos de restrição, tais como a potência máxima da máquina motriz e o limite de estabilidade estática. Uma curva de capacidade que reflete também a potência máxima da máquina motriz está mostrada na Figura 4-50.

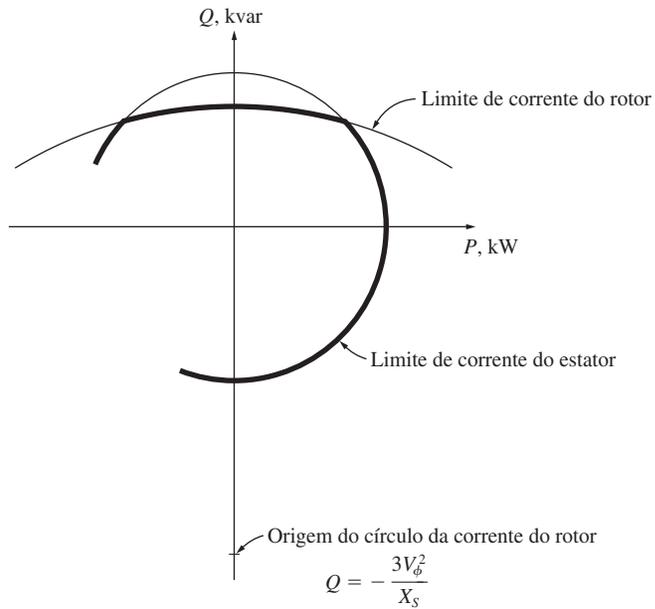


FIGURA 4-49
Curva de capacidade resultante do gerador.

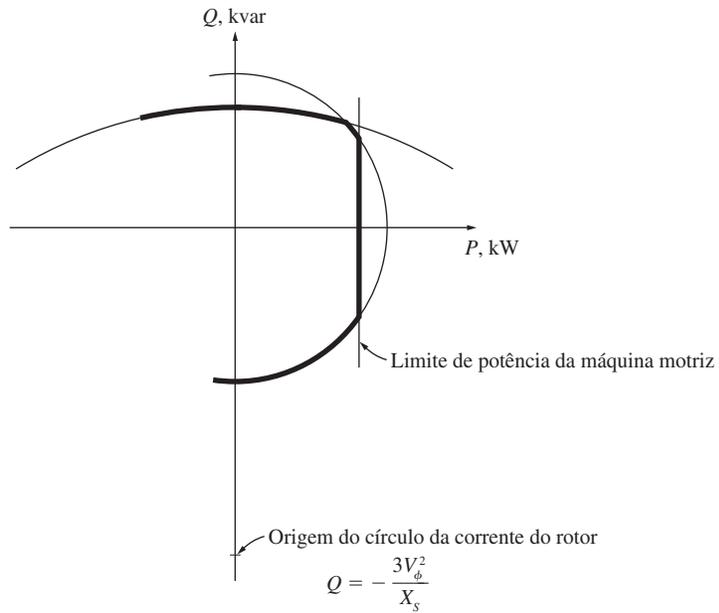


FIGURA 4-50
Um diagrama de capacidade que mostra o limite de potência da máquina motriz.

EXEMPLO 4-8 Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma especificação nominal de 50 kVA, com FP 0,8 atrasado. Sua reatância síncrona é $1,0 \Omega$ por fase. Assuma que esse gerador está ligado a uma turbina a vapor, capaz de fornecer até 45 kW. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW.

- Construa a curva de capacidade desse gerador, incluindo o limite de potência da máquina motriz.
- Esse gerador fornecer uma corrente de linha de 56 A, com FP 0,7 atrasado? Por que sim ou por que não?
- Qual é o valor máximo de potência reativa que esse gerador pode produzir?
- Se o gerador fornecer 30 kW de potência ativa, qual será o valor máximo de potência reativa que pode ser fornecido simultaneamente?

Solução

A corrente máxima desse gerador pode ser encontrada a partir da Equação (4-36):

$$S_{\text{nominal}} = 3V_{\phi, \text{nominal}} I_{A, \text{max}} \quad (4-36)$$

A tensão V_{ϕ} dessa máquina é

$$V_{\phi} = \frac{V_T}{\sqrt{3}} = \frac{480 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 277 \text{ V}$$

Assim, a corrente máxima de armadura é

$$I_{A, \text{max}} = \frac{S_{\text{nominal}}}{3V_{\phi}} = \frac{50 \text{ kVA}}{3(277 \text{ V})} = 60 \text{ A}$$

Com essas informações, é possível agora responder às questões.

- A potência aparente máxima permitida é 50 kVA, o que permite especificar a corrente de armadura máxima segura. O centro dos círculos de E_A está em

$$\begin{aligned} Q &= -\frac{3V_{\phi}^2}{X_S} \\ &= -\frac{3(277 \text{ V})^2}{1,0 \Omega} = -230 \text{ kvar} \end{aligned} \quad (4-42)$$

O tamanho máximo de E_A é dado por

$$\begin{aligned} E_A &= V_{\phi} + jX_S I_A \\ &= 277 \angle 0^\circ \text{ V} + (j1,0 \Omega)(60 \angle -36,87^\circ \text{ A}) \\ &= 313 + j48 \text{ V} = 317 \angle 8,7^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Portanto, o valor da distância proporcional a E_A é

$$\begin{aligned} D_E &= \frac{3E_A V_{\phi}}{X_S} \\ &= \frac{3(317 \text{ V})(277 \text{ V})}{1,0 \Omega} = 263 \text{ kvar} \end{aligned} \quad (4-43)$$

A potência de saída máxima disponível para uma potência de máquina motriz de 45 kW é aproximadamente

$$\begin{aligned} P_{\text{max, saída}} &= P_{\text{max, entrada}} - P_{\text{perdas mec}} - P_{\text{perdas núcleo}} \\ &= 45 \text{ kW} - 1,5 \text{ kW} - 1,0 \text{ kW} = 42,5 \text{ kW} \end{aligned}$$

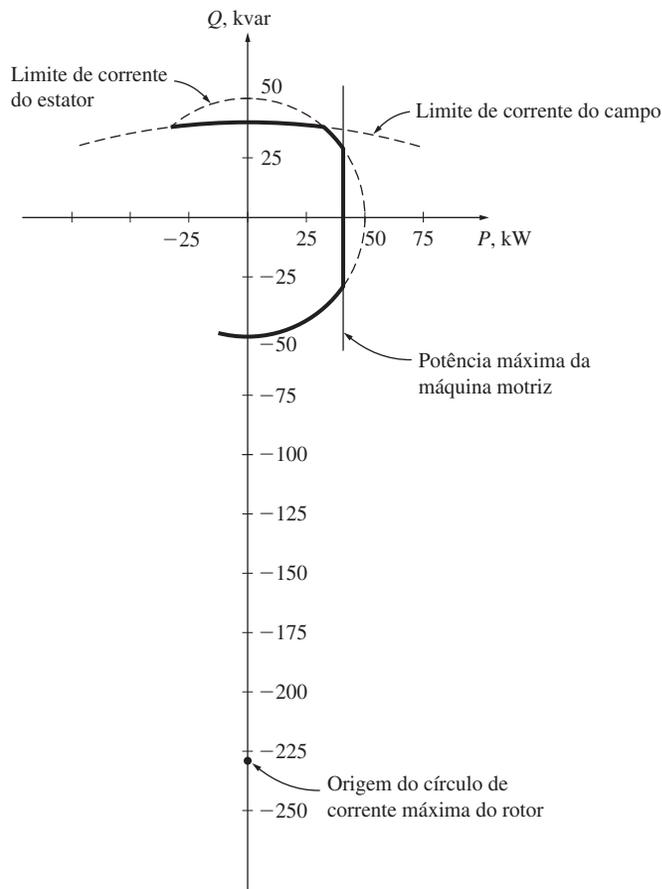


FIGURA 4-51

O diagrama de capacidade para o gerador do Exemplo 4-8.

(Esse valor é aproximado, porque as perdas I^2R e as perdas suplementares não foram consideradas.) O diagrama de capacidade resultante está mostrado na Figura 4-51.

(b) Uma corrente de 56 A, com FP 0,7 atrasado produz uma potência ativa de

$$\begin{aligned} P &= 3V_{\phi} I_A \cos \theta \\ &= 3(277 \text{ V})(56 \text{ A})(0,7) = 32,6 \text{ kW} \end{aligned}$$

e uma potência reativa de

$$\begin{aligned} Q &= 3V_{\phi} I_A \sin \theta \\ &= 3(277 \text{ V})(56 \text{ A})(0,714) = 33,2 \text{ kvar} \end{aligned}$$

Plotando esse ponto no diagrama de capacidade, vemos que ele está localizado de forma segura dentro da curva de I_A máxima, mas fora da curva de I_F máxima. Portanto, esse ponto *não* corresponde a uma condição segura de operação.

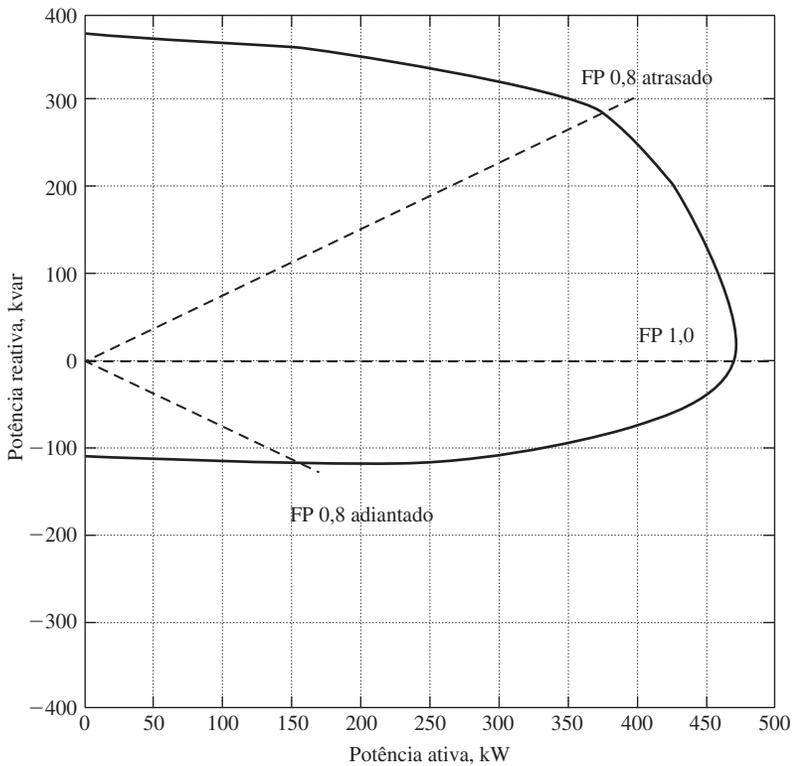


FIGURA 4-52
 Curva de capacidade de um gerador síncrono real com especificação nominal de 470 kVA.
 (Cortesia da Marathon Electric Company.)

- (c) Quando a potência ativa fornecida pelo gerador é zero, a potência reativa que o gerador pode produzir será máxima. Esse ponto está bem no topo da curva de capacidade. A potência Q que o gerador pode fornecer nesse ponto é

$$Q = 263 \text{ kvar} - 230 \text{ kvar} = 33 \text{ kvar}$$

- (d) Se o gerador estiver produzindo 30 kW de potência ativa, a potência reativa máxima que o gerador poderá fornecer será 31,5 kvar. Esse valor pode ser encontrado entrando no diagrama de capacidade com o valor 30 kW e subindo pela linha de quilowatts constantes até que algum limite seja alcançado. O fator limitante nesse caso é a corrente de campo – a armadura estará em segurança até o valor de 39,8 kvar.

A Figura 4-52 mostra uma curva de capacidade típica de um gerador síncrono real. Observe que os limites da curva não formam um círculo perfeito nesse caso de gerador real. Isso é verdadeiro porque os geradores síncronos com polos salientes apresentam efeitos adicionais que não foram incluídos no modelo. Esses efeitos estão descritos no Apêndice C.

Operação de curta duração e fator de serviço

Durante o funcionamento em regime permanente, o limite mais importante de um gerador síncrono é o aquecimento dos seus enrolamentos de armadura e de campo. Entretanto, o limite de aquecimento ocorre usualmente em um ponto que está muito abaixo do que o gerador é capaz de magnética e mecanicamente fornecer. De fato, frequentemente um gerador síncrono típico é capaz de fornecer até 300% de sua potência nominal durante um curto período de tempo (até que seus enrolamentos queimem). Essa capacidade de fornecer potência acima do valor nominal é usada para fornecer surtos de potência momentâneos durante a partida do motor e com outros transitórios semelhantes de carga.

Um gerador também pode funcionar com potências acima dos valores nominais durante períodos mais longos de tempo, desde que os enrolamentos não aqueçam demais antes que a carga excessiva seja retirada. Por exemplo, um gerador que fornece 1 MW indefinidamente pode ser capaz de fornecer 1,5 MW durante um par de minutos sem danos sérios, e por períodos de tempo cada vez mais longos com níveis de potência gradativamente menores. Entretanto, no final, a carga deverá ser removida, caso contrário, os enrolamentos sobreaquecerão. Quanto maior for a potência acima do valor nominal, menor será o tempo que a máquina poderá suportar.

A Figura 4-53 ilustra esse efeito. Essa figura mostra o tempo em segundos necessário para que uma sobrecarga cause dano térmico a uma máquina elétrica típica, cujos enrolamentos estavam em uma temperatura normal de operação antes que ocorresse a sobrecarga. Nessa máquina em particular, uma sobrecarga de 20% pode ser tolerada por 1000 segundos, uma sobrecarga de 100% pode ser tolerada por cerca de 30 segundos e uma sobrecarga de 200% pode ser tolerada por cerca de 10 segundos antes que ocorra um dano.

A elevação máxima de temperatura que uma máquina pode suportar depende da *classe de isolamento* de seus enrolamentos. A seguir, temos quatro classes padronizadas de isolamento: A, B, F e H. Mesmo que haja alguma variação nas temperaturas aceitáveis, dependendo da construção particular de uma máquina e do método de medição da temperatura, essas classes correspondem geralmente a elevações de temperatura de 60, 80, 105 e 125°C, respectivamente, acima da temperatura ambiente. Quanto mais elevada for a classe de isolamento de uma dada máquina, maior será a potência que ela poderá fornecer sem sobreaquecer seus enrolamentos.

Em um motor ou gerador, o sobreaquecimento dos enrolamentos é um problema *muito sério*. Uma antiga regra prática diz que, para cada aumento de 10°C acima da temperatura nominal dos enrolamentos, a vida útil média de uma máquina é reduzida à metade (veja a Figura 3-20). Os materiais modernos de isolamento são menos suscetíveis de ruptura do que os materiais antigos, mas os aumentos de temperatura ainda reduzem drasticamente a vida útil das máquinas. Por essa razão, uma máquina síncrona não deve ser sobrecarregada, a não ser que isso seja absolutamente necessário.

Uma questão relacionada com o problema de sobreaquecimento é: quão exato é o valor da potência que desejamos obter de uma máquina? Antes da instalação, dispõe-se apenas de uma estimativa aproximada da carga. Devido a isso, as máquinas para aplicações gerais costumam apresentar o chamado *fator de serviço*. O fator de serviço é definido como a razão entre a potência máxima real da máquina e a sua especificação nominal de placa. Um gerador com um fator de serviço de 1,15 pode, na realidade, funcionar indefinidamente com 115% da carga nominal sem sofrer danos.

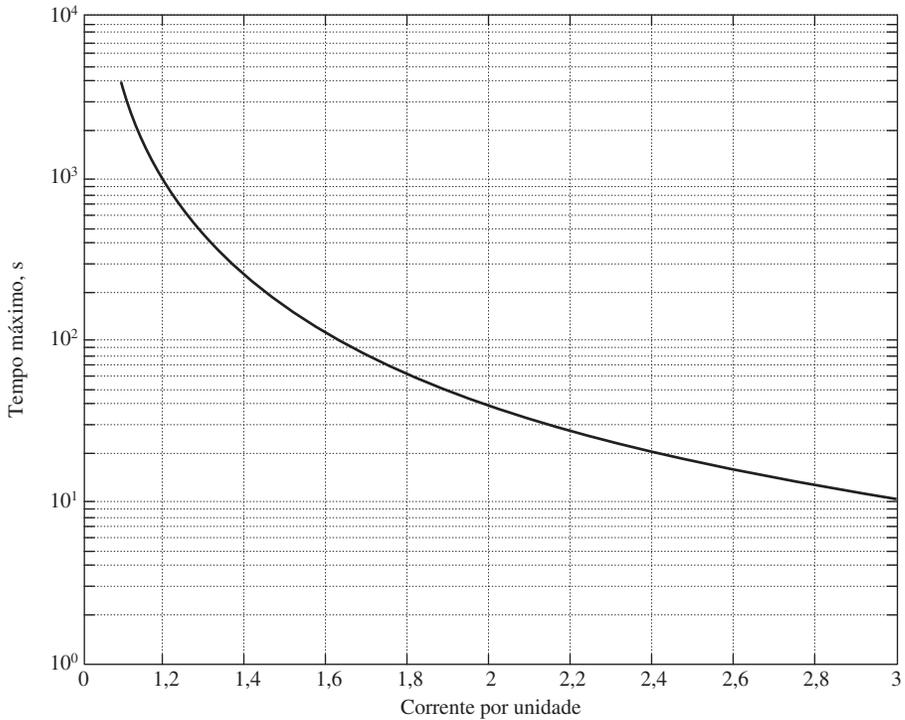


FIGURA 4-53 Curva de dano térmico de uma máquina síncrona típica, assumindo que os enrolamentos já estão na temperatura de operação quando a sobrecarga é aplicada. (Cortesia da Marathon Electric Company.)

O fator de serviço de uma máquina propicia uma margem de erro para o caso de cargas estimadas impropriamente.

4.12 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Um gerador síncrono é um dispositivo usado para converter energia mecânica, produzida por uma máquina motriz, em energia elétrica CA com tensão e frequência específicas. O termo *síncrono* refere-se ao fato de que a frequência elétrica dessa máquina está vinculada ou sincronizada com a velocidade mecânica do eixo de rotação. O gerador síncrono é usado para produzir a maior parte da energia elétrica usada no mundo inteiro.

A tensão gerada interna dessa máquina depende da velocidade do eixo de rotação e da intensidade do fluxo de campo. A tensão de fase da máquina difere da tensão gerada interna, devido aos efeitos da reação de armadura do gerador e também devido à resistência e à reatância internas dos enrolamentos de armadura. A tensão de terminal do gerador é igual à tensão de fase ou está relacionada com esta por um fator $\sqrt{3}$, dependendo se a máquina está ligada em Δ ou em Y.

O modo pelo qual um gerador síncrono opera em um sistema de potência real depende das restrições que lhe são impostas. Quando um gerador trabalha isolado, as potências ativa e reativa que devem ser fornecidas são determinadas pela carga aplica-

da. Além disso, a corrente de campo e o ponto de ajuste de operação no regulador de velocidade controlam a frequência e a tensão de terminal, respectivamente. Quando o gerador é ligado a um barramento infinito, a frequência e a tensão são fixadas, de modo que o ponto de ajuste de operação no regulador e a corrente de campo controlam o fluxo de potências ativa e reativa do gerador. Nos sistemas reais que contêm geradores de tamanhos aproximadamente iguais, os pontos de ajuste de operação nos reguladores afetam ambos, fluxo de potência e frequência. Além disso, a corrente de campo afeta a tensão de terminal e também o fluxo de potência reativa.

A capacidade de produção de potência elétrica de um gerador síncrono é limitada basicamente pelo aquecimento no interior da máquina. Quando os enrolamentos do gerador sobreaquecem, a vida da máquina pode ser seriamente encurtada. Como há dois enrolamentos diferentes (armadura e campo), há duas restrições diferentes que se aplicam ao gerador. O aquecimento máximo permitido nos enrolamentos de armadura determina o valor máximo de quilovolts-ampères que a máquina é capaz de fornecer. Por outro lado, o aquecimento máximo permitido nos enrolamentos de campo determina o valor máximo de E_A . Os valores máximos de E_A e I_A em conjunto determinam o fator de potência nominal do gerador.

PERGUNTAS

- 4.1 Por que a frequência de um gerador síncrono está sincronizada com a velocidade de rotação do eixo?
- 4.2 Por que a tensão de um alternador cai abruptamente quando lhe é aplicada uma carga atrasada?
- 4.3 Por que a tensão de um alternador sobe quando lhe é aplicada uma carga adiantada?
- 4.4 Desenhe os diagramas fasoriais e as relações de campo magnético para um gerador síncrono que está operando com (a) fator de potência unitário, (b) fator de potência atrasado, (c) fator de potência adiantado.
- 4.5 Explique como a impedância síncrona e a resistência de armadura podem ser determinadas em um gerador síncrono.
- 4.6 Por que o valor nominal da tensão de um gerador de 60 Hz deverá ser diminuído se ele for usado em 50 Hz? De quanto deverá ser essa diminuição?
- 4.7 Você esperaria que um gerador de 400 Hz fosse maior ou menor que um gerador de 60 Hz com as mesmas características nominais de potência e tensão? Por quê?
- 4.8 Que condições são necessárias para colocar em paralelo dois geradores síncronos?
- 4.9 Por que o gerador que entra em paralelo com um sistema de potência deve ser colocado com uma frequência superior à do sistema que já está em operação?
- 4.10 O que é um barramento infinito? Que restrições ele impõe a um gerador que é colocado em paralelo com ele?
- 4.11 Como se pode controlar o compartilhamento de potência ativa entre dois geradores, sem que a frequência do sistema seja afetada? Como é possível controlar o compartilhamento de potência reativa entre dois geradores, sem que a tensão de terminal do sistema seja afetada?
- 4.12 Como se pode ajustar a frequência de um sistema de potência de grande porte, sem que o compartilhamento de potência entre os geradores do sistema seja afetado?
- 4.13 Como é possível ampliar os conceitos da Seção 4.9 para calcular a frequência do sistema e o compartilhamento de potência entre três ou mais geradores operando em paralelo?
- 4.14 Por que o sobreaquecimento é um assunto sério em um gerador?

- 4.15 Explique em detalhes o conceito que fundamenta as curvas de capacidade.
- 4.16 O que são especificações nominais de curta duração? Por que elas são importantes na operação regular de geradores?

PROBLEMAS

- 4.1 Em uma cidade da Europa, é necessário fornecer 1000 kW de potência em 60 Hz. As únicas fontes de potência disponíveis operam em 50 Hz. Decide-se gerar a potência por meio de um conjunto de motor-gerador consistindo em um motor síncrono que aciona um gerador síncrono. Quantos polos deve ter cada uma das duas máquinas para que a potência de 50 Hz seja convertida em 60 Hz?
- 4.2 Um gerador síncrono de 13,8 kV, 50 MVA, fator de potência de 0,9 atrasado, 60 Hz, ligado em Y e de quatro polos tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura de $0,2 \Omega$. Em 60 Hz, as perdas por atrito e ventilação são 1 MW e as perdas no núcleo são 1,5 MW. O circuito de campo tem uma tensão CC de 120 V e a I_F máxima é 10 A. A corrente do circuito de campo é ajustável no intervalo de 0 a 10 A. A CAV desse gerador está mostrada na Figura P4-1.

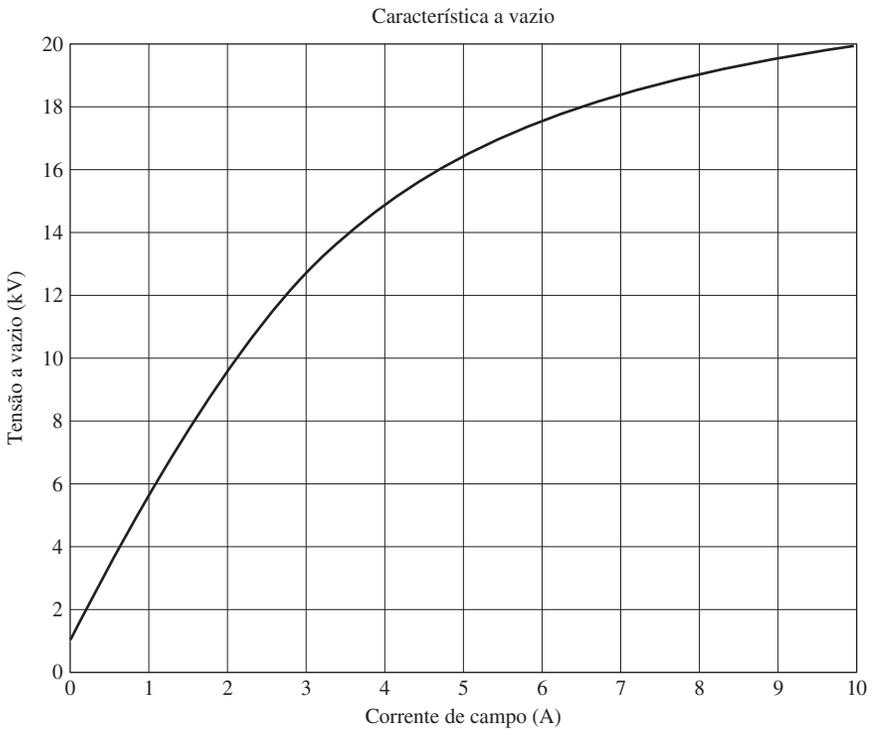


FIGURA P4-1
Curva característica a vazio para o gerador do Problema 4-2.

- (a) Qual é o valor da corrente de campo necessário para tornar a tensão de terminal V_T (ou tensão de linha V_L) igual a 13,8 kV, quando o gerador está operando a vazio?
- (b) Qual é o valor da tensão gerada interna E_A quando o gerador está funcionando nas condições nominais?

- (c) Qual é a tensão de fase V_ϕ desse gerador em condições nominais?
 - (d) Quando o gerador está operando em condições nominais, quanta corrente de campo é necessária para tornar a tensão de terminal V_T igual a 13,8 kV?
 - (e) Suponha que esse gerador esteja operando em condições nominais quando a carga é removida sem que a corrente de campo seja alterada. Qual seria a tensão de terminal do gerador?
 - (f) Em regime permanente, quanta potência e quanto conjugado a máquina motriz deve ser capaz de fornecer para operar em condições nominais?
 - (g) Construa a curva de capacidade para esse gerador.
- 4.3** Assuma que a corrente de campo do gerador do Problema 4-2 foi ajustada para o valor de 5 A.
- (a) Qual será a tensão de terminal desse gerador se ele for conectado a uma carga em Δ com uma impedância de $24 \angle 25^\circ \Omega$?
 - (b) Desenhe o diagrama fasorial desse gerador.
 - (c) Qual é a eficiência do gerador nessas condições?
 - (d) Agora assuma que outra carga idêntica ligada em Δ é colocada em paralelo com a primeira. Que acontece com o diagrama fasorial do gerador?
 - (e) Depois do acréscimo de carga, qual será a nova tensão de terminal?
 - (f) O que deve ser feito para que a tensão de terminal retorne a seu valor original?
- 4.4** Assuma que a corrente de campo do gerador do Problema 4-2 tenha sido ajustada para ter a tensão nominal (13,8 kV) em condições de plena carga em cada uma das seguintes perguntas.
- (a) Qual é a eficiência do gerador nas condições nominais?
 - (b) Qual será a regulação de tensão do gerador se ele for carregado com os quilovolts-ampères nominais e uma carga de FP 0,9 atrasado?
 - (c) Qual será a regulação de tensão do gerador se ele for carregado com os quilovolts-ampères nominais e uma carga de FP 0,9 adiantado?
 - (d) Qual será a regulação de tensão do gerador se ele for carregado com os quilovolts-ampères nominais e uma carga de fator de potência unitário?
 - (e) Use o MATLAB para plotar a tensão de terminal do gerador em função da carga para os três fatores de potência.
- 4.5** Assuma que a corrente de campo do gerador do Problema 4-2 foi ajustada para ter tensão nominal quando o gerador está carregado com corrente nominal e fator de potência unitário.
- (a) Qual é o ângulo de conjugado δ do gerador quando ele está fornecendo a corrente nominal com fator de potência unitário?
 - (b) Qual é a potência máxima que esse gerador pode fornecer a uma carga com fator de potência unitário quando a corrente de campo é ajustada para o valor atual?
 - (c) Quando esse gerador está funcionando a plena carga com fator de potência unitário, quão próximo ele está do limite de estabilidade estática da máquina?
- 4.6** A tensão interna gerada E_A de um gerador síncrono trifásico ligado em Δ , 60 Hz e 2 polos é 14,4 kV e a tensão de terminal V_T é 12,8 kV. A reatância síncrona dessa máquina é 4Ω e a resistência de armadura pode ser ignorada.
- (a) Se o ângulo de conjugado do gerador for $\delta = 18^\circ$, quanta potência será fornecida por esse gerador?
 - (b) Qual é o fator de potência do gerador?
 - (c) Desenhe o diagrama fasorial nessas circunstâncias.
 - (d) Ignorando as perdas desse gerador, qual conjugado deve ser aplicado ao eixo pela máquina motriz nessas condições?

- 4.7** Um gerador síncrono ligado em Y de 100 MVA, 14,4 kV, 50 Hz, dois polos e FP 0,8 atrasado tem uma reatância síncrona por unidade de 1,1 e uma resistência de armadura por unidade de 0,011.
- (a) Quais são as suas reatância síncrona e resistência de armadura em ohms?
 - (b) Qual é o valor da tensão interna gerada E_A nas condições nominais? Qual é o ângulo de conjugado δ nessas condições?
 - (c) Ignorando as perdas desse gerador, que conjugado deve ser aplicado no seu eixo pela máquina motriz a plena carga?
- 4.8** Um gerador de turbina hidráulica, ligado em Y, de 200 MVA, 12 kV, 50 Hz, 20 polos e FP 0,85 atrasado tem uma reatância síncrona por unidade de 0,9 e uma resistência de armadura por unidade de 0,1. O gerador está operando em paralelo com um sistema de potência de grande porte (barramento infinito).
- (a) Qual é a velocidade de rotação do eixo desse gerador?
 - (b) Qual é o valor da tensão gerada interna E_A em condições nominais?
 - (c) Qual é o ângulo de conjugado do gerador em condições nominais?
 - (d) Quais são os valores da reatância síncrona e da resistência de armadura do gerador em ohms?
 - (e) Se a corrente de campo for mantida constante, qual será a potência máxima possível de se obter desse gerador? Quanta potência ou conjugado de reserva esse gerador possui a plena carga?
 - (f) Com a potência máxima absoluta possível, quanta potência reativa esse gerador poderá fornecer ou consumir? Desenhe o diagrama fasorial correspondente. (Assuma que I_f permanece inalterada.)
- 4.9** A máquina motriz de um gerador síncrono trifásico de 480 V, 250 kVA, 60 Hz, dois polos e FP 0,8 atrasado tem uma velocidade a vazio de 3650 rpm e uma velocidade de plena carga de 3570 rpm. Ele está operando em paralelo com um gerador síncrono de 480 V, 250 kVA, 60 Hz, quatro polos e FP 0,85 atrasado, cuja máquina motriz tem uma velocidade a vazio de 1800 rpm e uma velocidade de plena carga de 1780 rpm. As cargas alimentadas pelos dois geradores consistem em 300 kW, com FP 0,8 atrasado.
- (a) Calcule as quedas de velocidade dos geradores 1 e 2.
 - (b) Encontre a frequência de operação do sistema de potência.
 - (c) Qual é a potência que fornecida por cada um dos geradores desse sistema?
 - (d) Que os operadores dos geradores devem fazer para ajustar a frequência de operação em 60 Hz?
 - (e) Se a tensão da corrente de linha for 460 V, que os operadores dos geradores devem fazer para corrigir a tensão baixa de terminal?
- 4.10** Três geradores síncronos fisicamente idênticos estão operando em paralelo. Todos eles apresentam uma potência nominal de 100 MW com FP 0,8 atrasado. A frequência a vazio do gerador A é 61 Hz e sua queda de velocidade é de 3%. A frequência a vazio do gerador B é 61,5 Hz e sua queda de velocidade é de 3,4%. A frequência a vazio do gerador C é 60,5 Hz e sua queda de velocidade é de 2,6%.
- (a) Se uma carga total consistindo em 230 MW for alimentada por esse sistema de potência, qual será a frequência do sistema e como a potência será compartilhada entre os três geradores?
 - (b) Faça um gráfico mostrando a potência produzida por cada gerador em função da potência total fornecida a todas as cargas (você poderá usar MATLAB para criar esse gráfico). Com qual carga um dos geradores ultrapassa sua potência nominal? Qual gerador ultrapassa primeiro sua potência nominal?

- (c) O compartilhamento de potência em (a) é aceitável? Por que sim ou não?
- (d) Que ações um operador poderia realizar para melhorar o compartilhamento da potência ativa entre esses geradores?

4.11 Uma fábrica de papel instalou três geradores de vapor (caldeiras) para fornecer vapor aos processos de fabricação e também para usar o vapor excedente como fonte de energia. Como há uma capacidade extra disponível, a fábrica instalou três geradores a turbina de 10 MW para tirar proveito dessa situação. Cada máquina é um gerador síncrono ligado em Y de 4160 V, 12,5 MVA, 60 Hz, fator de potência de 0,8 atrasado e dois polos. Eles apresentam uma reatância síncrona de 1,10 Ω e uma resistência de armadura de 0,03 VΩ. Os geradores 1 e 2 têm uma característica de potência *versus* frequência com inclinação s_p de 5 MW/Hz e o gerador 3 tem uma inclinação de 6 MW/Hz.

- (a) Se a frequência a vazio de cada um dos três geradores for ajustada para 61 Hz, quanta potência as três máquinas fornecerão quando a frequência real do sistema for 60 Hz?
- (b) Qual é a máxima potência que os três geradores podem fornecer nessa condição, sem que a potência nominal de algum deles seja excedida? Em que frequência ocorre esse limite? Quanta potência cada gerador fornece nesse ponto?
- (c) Que deverá ser feito para que os três geradores produzam as suas potências ativas e reativas nominais, na frequência de funcionamento de 60 Hz?
- (d) Quais seriam as tensões geradas internas dos três geradores nessa condição?

4.12 Suponha que você fosse um engenheiro que estivesse projetando uma nova facilidade de cogeração de energia elétrica para uma planta, que está com disponibilidade de vapor excedente dos processos. Você pode escolher entre dois geradores a turbina de 10 MW ou um único gerador a turbina de 20 MW. Quais seriam as vantagens e desvantagens de cada opção?

4.13 Um gerador síncrono trifásico ligado em Y, 25 MVA, 12,2 kV, 60 Hz, dois polos e FP 0,9 atrasado foi submetido a um ensaio a vazio. Sua tensão de entreferro foi extrapolada obtendo-se os seguintes resultados:

Ensaio a vazio					
Corrente de campo, A	320	365	380	475	570
Tensão de linha, kV	13,0	13,8	14,1	15,2	16,0
Tensão de entreferro extrapolada, kV	15,4	17,5	18,3	22,8	27,4

A seguir, o ensaio de curto-circuito foi realizado com os seguintes resultados:

Ensaio de curto-circuito					
Corrente de campo, A	320	365	380	475	570
Corrente de armadura, A	1040	1190	1240	1550	1885

A resistência de armadura é 0,6 Ω por fase.

- (a) Encontre a reatância síncrona não saturada do gerador em ohms por fase e em ohms por unidade.
- (b) Encontre a reatância síncrona X_s saturada aproximada com uma corrente de campo de 380 A. Expresse a resposta em ohms por fase e por unidade.
- (c) Encontre a reatância síncrona saturada aproximada com uma corrente de campo de 475 A. Expresse a resposta em ohms por fase e por unidade.

- (d) Encontre a razão de curto-circuito desse gerador.
- (e) Qual é a tensão interna gerada desse gerador nas condições nominais?
- (f) Que corrente de campo é necessária para obter a tensão nominal com a carga nominal?
- 4.14** Durante um ensaio de curto-circuito, um gerador síncrono ligado em Y produziu uma corrente de armadura de curto-circuito de 100 A por fase, para uma corrente de campo de 2,5 A. Com a mesma corrente de campo, a tensão de linha a vazio foi medida como 440 V.
- (a) Calcule a reatância síncrona saturada nessas condições.
- (b) Se a resistência de armadura for $0,3 \Omega$ por fase e o gerador fornecer 60 A para uma carga puramente resistiva ligada em Y, de 3Ω por fase e para essa corrente de campo, determine a regulação de tensão nessas condições de carga.
- 4.15** Um gerador síncrono trifásico, ligado em Y, tem especificações nominais de 120 MVA, 13,8 kV, com FP 0,8 atrasado e 60 Hz. Sua reatância síncrona é $1,2 \Omega$ por fase e sua resistência de armadura é $0,1 \Omega$ por fase.
- (a) Qual é sua regulação de tensão?
- (b) Quais seriam as especificações nominais de tensão e potência aparente desse gerador se ele funcionasse em 50 Hz, com as mesmas perdas de armadura e campo que ele tinha em 60 Hz?
- (c) Qual seria a regulação de tensão do gerador em 50 Hz?

Os Problemas 4-16 a 4-26 referem-se a um gerador síncrono de seis polos, ligado em Y, com especificações nominais de 500 kVA, 3,2 kV, FP 0,9 atrasado e 60 Hz. Sua resistência de armadura R_A é $0,7 \Omega$. As perdas no núcleo desse gerador nas condições nominais são 8 kW e as perdas por atrito e ventilação são 10 kW. As características a vazio e de curto-circuito estão mostradas na Figura P4-2.

- 4.16** (a) Qual é a reatância síncrona saturada desse gerador nas condições nominais?
- (b) Qual é a reatância síncrona não saturada desse gerador?
- (c) Plote a reatância síncrona saturada do gerador como função da carga.
- 4.17** (a) Quais são a corrente e a tensão gerada interna nominais desse gerador?
- (b) Que corrente de campo é exigida pelo gerador para operar com a tensão, a corrente e o fator de potência nominais?
- 4.18** Qual é a regulação de tensão desse gerador com a corrente e o fator de potência nominais?
- 4.19** Se o gerador estiver funcionando nas condições nominais e a carga for subitamente removida, qual será a tensão de terminal?
- 4.20** Quais são as perdas elétricas do gerador nas condições nominais?
- 4.21** Se essa máquina estiver operando nas condições nominais, qual conjugado de entrada deverá ser aplicado ao eixo do gerador? Expresse sua resposta em newtons-metros e em libras-pés.
- 4.22** Qual é o ângulo de conjugado δ desse gerador nas condições nominais?
- 4.23** Assuma que a corrente de campo do gerador é ajustada para fornecer 3200 V nas condições nominais. Qual é o limite de estabilidade estática do gerador? (*Nota:* Você pode ignorar R_A para facilitar esse cálculo.) Quão próxima está a condição de plena carga desse gerador do limite de estabilidade estática?
- 4.24** Assuma que a corrente de campo do gerador é ajustada para fornecer 3200 V nas condições nominais. Plote a potência fornecida pelo gerador em função do ângulo de conjugado δ .

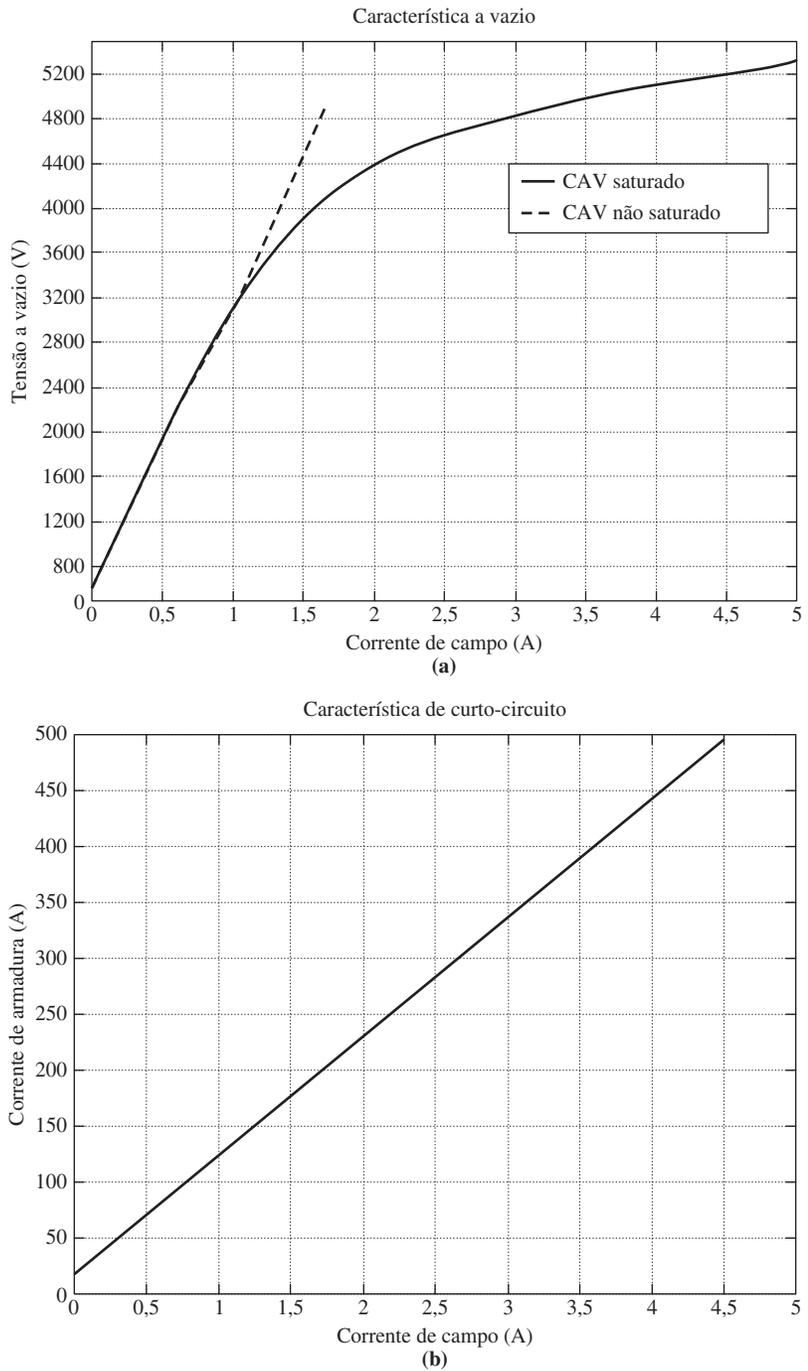


FIGURA P4-2
 (a) Curva característica a vazio do gerador dos Problemas 4-16 a 4-26. (b) Curva característica de curto-circuito do gerador dos Problemas 4-16 a 4-26.

- 4.25** Assuma que a corrente de campo do gerador seja ajustada de modo que o gerador forneça a tensão nominal com a corrente e o fator de potência de carga nominais. Se a corrente de campo e o valor da corrente de carga forem mantidos constantes, como a tensão de terminal se alterará quando o fator de potência da carga variar de FP 0,9 atrasado a FP 0,9 adiantado? Faça um gráfico da tensão de terminal *versus* o ângulo de impedância da carga.
- 4.26** Assuma que o gerador é conectado a um barramento infinito de 3200 V e que a sua corrente de campo foi ajustada de modo que forneça potência e fator de potência nominais ao barramento. Você pode ignorar a resistência de armadura R_A ao responder às seguintes perguntas.
- (a) Que acontecerá às potências ativas e reativas fornecidas por esse gerador se o fluxo de campo (e, portanto, E_A) for reduzido em 5%?
 - (b) Plote a potência ativa fornecida por esse gerador em função do fluxo ϕ quando o fluxo varia de 80 a 100% do fluxo nas condições nominais.
 - (c) Plote a potência reativa fornecida por esse gerador em função do fluxo ϕ quando o fluxo varia de 80 a 100% do fluxo nas condições nominais.
 - (d) Plote a corrente de linha fornecida pelo gerador em função do fluxo ϕ quando o fluxo varia de 80 a 100% do fluxo nas condições nominais.
- 4.27** Dois geradores síncronos trifásicos idênticos de 2,5 MVA, 1200V, com FP 0,8 atrasado e 60 Hz são ligados em paralelo para alimentar uma carga. Ocorre que as máquinas motorizadas dos dois geradores têm características de queda de velocidade diferentes. Quando as correntes de campo dos dois geradores são iguais, um entrega 1200 A com FP 0,9 atrasado, ao passo que o outro entrega 900 A com FP 0,75 atrasado.
- (a) Quais são as potências ativa e reativa fornecidas por cada gerador à carga?
 - (b) Qual é o fator de potência total da carga ?
 - (c) De que forma a corrente de campo de cada gerador deve ser ajustada para que eles operem com o mesmo fator de potência ?
- 4.28** Uma estação geradora em um sistema de potência consiste em quatro geradores síncronos operando em paralelo de 300 MVA, 15 kV e FP 0,85 atrasado, com características de queda de velocidade idênticas. Os reguladores das máquinas motorizadas dos geradores são ajustados para produzir uma queda de 3 Hz desde a condição a vazio até a plena carga. Três desses geradores estão cada um fornecendo 200 MW de forma constante (*geradores de potência fixa*) em uma frequência de 60 Hz, ao passo que o quarto gerador (*gerador de potência variável*) lida com todas as alterações incrementais de carga do sistema, ao mesmo tempo que mantém a frequência do sistema em 60 Hz.
- (a) Em um dado instante, a carga total do sistema é 650 MW em uma frequência de 60 Hz. Quais são as frequências a vazio de cada um dos geradores do sistema?
 - (b) Se a carga do sistema subir para 725 MW e o ponto de ajuste no regulador do gerador não for alterado, qual será a nova frequência do sistema?
 - (c) Para que valor a frequência a vazio do gerador de potência variável deve ser ajustada para que a frequência do sistema retorne a 60 Hz?
 - (d) Se o sistema operar nas condições descritas na parte (c), que aconteceria se um sistema de proteção desconectasse o gerador de potência variável da linha?
- 4.29** Um gerador síncrono de 100 MVA, 14,4 kV, FP 0,8 atrasado e ligado em Y tem uma resistência de armadura desprezível e uma reatância síncrona de 1,0 por unidade. O gerador está ligado em paralelo com um barramento infinito de 60 Hz e 14,4 kV, mas é capaz de fornecer ou consumir quaisquer quantidades de potências ativa e reativa sem que haja alterações de frequência ou de tensão de terminal.
- (a) Qual é a reatância síncrona do gerador em ohms?
 - (b) Qual é a tensão gerada interna E_A desse gerador nas condições nominais?

- (c) Qual é a corrente de armadura I_A dessa máquina nas condições nominais?
- (d) Suponha que o gerador esteja operando inicialmente nas condições nominais. Se a tensão gerada interna E_A for diminuída em 5%, qual será a nova corrente de armadura I_A ?
- (e) Repita a parte (d) para diminuições de 10, 15, 20 e 25% em E_A .
- (f) Plote o valor da corrente de armadura I_A em função de E_A . (Você pode usar MATLAB para desenhar esse gráfico.)

REFERÊNCIAS

1. Chaston, A. N.: *Electric Machinery*, Reston Publishing, Reston, Va., 1986.
2. Del Toro, V.: *Electric Machines and Power Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
3. Fitzgerald, A. E. e C. Kingsley, Jr.: *Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company, Nova York, 1952.
4. Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr. e S. D. Umans: *Electric Machinery*, 5ª ed., McGraw-Hill Book Company, Nova York, 1990.
5. Kosow, Irving L.: *Electric Machines and Transformers*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1972.
6. Liwshitz-Garik, Michael e Clyde Whipple: *Alternating-Current Machinery*, Van Nostrand, Princeton, N.J., 1961.
7. McPherson, George: *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*, Wiley, Nova York, 1981.
8. Slemon, G. R. e A. Straughen: *Electric Machines*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.
9. Werninck, E. H. (ed.): *Electric Motor Handbook*, McGraw-Hill Book Company, London, 1978.