Capítulo 5 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

5.1 Introdução

A função do sistema de excitação é estabelecer a tensão interna do gerador síncrono. Em conseqüência, o sistema de excitação é responsável não somente pela tensão de saída da máquina, mas também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada. A Fig. 72 mostra o diagrama de blocos com a configuração física de um sistema de excitação típico.



Figura 72: Configuração física dos componentes do sistema de excitação

Até bem recentemente, a excitatriz da maioria dos sistemas era um gerador de corrente contínua montado no eixo do gerador. Atualmente, outros sistemas mais rápidos e que exigem menos manutenção vão aos poucos substituindo o sistema clássico.

A função do regulador de tensão é controlar a saída da excitatriz tal que a tensão gerada e a potência reativa variem da maneira desejada. Em sistemas primitivos, o operador desempenhava o papel do regulador de tensão, observando a tensão de saída e ajustando o reostato de campo da excitatriz de modo a obter as condições de saída desejadas. Atualmente, o regulador de tensão é um controlador que observa a tensão (e possivelmente outras grandezas, como potência ativa e corrente) de saída do gerador e então inicia a ação corretiva através da variação do controle da excitatriz. A velocidade de ação do regulador é fundamental do ponto de vista da estabilidade do sistema de potência.

O bloco denominado de "Controles Auxiliares" na Fig. 72 inclui funções como adição de

amortecimento ao sistema de controle, compensação de corrente reativa, estabelecimento de limites de sobre e sub-excitação, etc.

Este capítulo é composto de duas partes principais. Nas seções 5.2 e 5.3, é feita uma revisão da evolução da tecnologia de sistemas de excitação e reguladores de tensão, respectivamente. A segunda parte do capítulo, que corresponde à seção 5.4, é dedicada à modelagem e análise, do ponto de vista do controle, de um sistema de excitação convencional.

5.2 Configurações Típicas de Sistemas de Excitação

5.2.1 Sistemas Clássicos

A Fig. 73 apresenta a configuração típica de um sistema de excitação com excitatriz de corrente contínua auto-excitada.



Figura 73: Excitatriz principal com controle do reostato de campo

O regulador do sistema da Fig. 73 detecta o nível de tensão, compara-o com uma referência e, se necessário, aciona um dispositivo mecânico para controlar a resistência do reostato.

Na etapa seguinte de aperfeiçoamento do sistema da Fig. 73 a excitatriz principal, ao invés de ser auto-excitada,passou a ser excitada por uma excitatriz piloto. Isto propicia respostas bem mais rápidas que as do caso auto-excitado, já que o controle de campo da excitatriz é independente de sua tensão de saída.

Um grau maior de sofisticação foi atingido com o uso de amplificadores rotativos. Estes amplificadores permitiram o uso de reguladores de tensão estáticos, cuja saída de baixa potência pode ser amplificada de modo a induzir respostas ainda mais rápidas.

Com o aumento da capacidade nominal dos geradores síncronos, o uso de excitatrizes de corrente contínua começou a revelar algumas inconveniências, tais como:

1. Altas correntes de excitação a baixa tensão, exigindo muitas escovas;

- Dificuldades inerentes ao comutador, provocando faiscamento durante súbitas variações de carga;
- 3. Dificuldades de acoplar grandes máquinas c.c. ao eixo do gerador, que gira a altas velocidades no caso de turbo-geradores.

Os itens (1) e (2), além dos problemas que causavam em operação, também apresentavam o incoveniente de exigir um serviço de manutenção de escovas e comutador mais intenso. Quanto ao item (3), uma solução encontrada foi o uso de engrenagens de redução, cuja complexidade reduzia a confiabilidade do sistema de excitação, se comparado aos sistemas que usam o acionamento direto do eixo do gerador.

As razões citadas intensificaram os estudos de um sistema de excitação usando uma excitatriz de corrente alternada e retificadores. Inicialmente, a substituição de uma excitatriz de corrente contínua e sistema de engrenagens de redução por uma excitatriz de corrente alternada e retificadores trouxe um pequeno aumento de custo, além do problema técnico decorrente do fato de os primeiros sistemas usarem retificadores com diodos de germânio, cuja baixa tensão máxima inversa parecia ser insuficiente para satisfazer as necessidades dos grandes geradores. Ambos os incovenientes foram superados, pois logo tornou-se claro que o aumento do custo inicial era largamente compensado pela reduzida manutenção necessária, e a utilização de diodos de silício elevou a máxima tensão inversa a valores satisfatórios. Hoje, usam-se excitatrizes c.c. diretamente acopladas ao eixo do gerador para geradores até 50 MW e excitatrizes c.c. de baixa velocidade, acionadas através de engrenagens pelo eixo do gerador, até geradores de 275 MW. A partir desta capacidade nominal, têm-se usado tão somente excitatrizes de corrente alternada com retificadores.

Os tipos de excitatrizes alternadas usando retificadores que estão em uso ou em fase de testes são os seguintes:

- Excitatriz de campo rotativo com retificador a diodo estático;
- Excitatriz de armadura rotativa com retificadores a diodos rotativos (sistema sem escovas);
- Excitação estática, com potência de excitação obtida através de transformador e utilizando tiristores estáticos;
- Sistema de excitação sem escovas, com tiristores montados no eixo. Analisemos, em particular, cada um dos sistemas acima.

5.2.2 Excitatriz de Campo Rotativo com Retificadores Estáticos

O esquema básico de um sistema de excitação usando retificador estático é mostrado na Fig. 74, sendo esta montagem típica para um gerador de 500 MW.

Na Fig. 74, uma ponte de tiristores controla a excitação da excitatriz principal. Obtêm-se resposta rápida graças à excitatriz de alta freqüência e tensão constante. Como o regulador de tensão controla o disparo dos tiristores, a resposta do sistema de excitação é muito rápida.

O retificador de excitação é, em geral, montado em uma série de cubículos, cada um deles sendo uma unidade trifásica completa, conectada em ponte. Os cubículos são então conecta-

dos em paralelo para fornecer a capacidade de corrente necessária, sendo possível desconectar qualquer cubículo, no lado alternado ou contínuo, sem interferência com a operação dos demais. Esta estrutura modular permite a manutenção com o retificador em serviço. Contudo, estudos demonstraram que a ocorrência de defeitos nos retificadores é tão rara que projetos mais recentes abandonaram a estrutura modular, o que permite maior compactação do retificador.



Figura 74: Sistema de excitação usando retificador estático

O sistema de retificação estática, embora elimine o comutador e escovas associados à excitatriz de corrente contínua, ainda tem o incoveniente de manter os anéis deslizantes do gerador, que também apresentam problemas de manutenção.

5.2.3 Sistemas de Excitação sem Escovas

Com os sistemas de excitação a gerador de corrente contínua ou com excitatriz de corrente alternada mais retificadores, a potência de excitação deve ser transferida de um equipamento - excitatriz c.c, retificador - para o campo do gerador, exigindo para isto anéis coletores e escovas. O projeto destes dispositivos torna-se mais difícil com o aumento de potência de excitação necessária ou, em outras palavras, com o aumento da capacidade nominal dos geradores. Estes problemas de projeto estão principalmente ligados ao resfriamento dos anéis coletores e à vida útil das escovas. Uma maneira encontrada para resolvê-los foi a utilização de excitatrizes c.c. de baixa velocidade acionadas pelo eixo do gerador através de um mecanismo de transmissão. Isto, contudo, implicava em uma redução de confiabilidade.

Para solucionar o problema satisfatoriamente, pensou-se em eliminar definitivamente os anéis coletores e as escovas a eles associados (*brushless excitation system*). Isto já havia sido feito em aplicações menores, tais como motores para aviões, dando resultados satisfatórios. Em 1960, engenheiros da Westinghouse Electric Corporation introduziram o sistema sem escovas para geradores síncronos de grandes potências.

Seção 5.2 Configurações Típicas de Sistemas de Excitação

A Fig. 75 mostra esquematicamente o sistema de excitação sem escovas simplificado. O sistema mostrado consiste de uma excitatriz de corrente alternada e um retificador rotativo montado no mesmo eixo do turbo-gerador. Também montado no mesmo eixo está um gerador a ímã permanente, cujo sinal de saída é retificado e comparado, no regulador de tensão, com o sinal retificado da tensão terminal. O erro resultante alimenta o campo da excitatriz de corrente alternada, a qual se assemelha a uma máquina de corrente contínua sem comutador, com enrolamento de campo no estator e armadura no rotor. A saída da armadura rotativa da excitatriz de corrente alternada é conduzida ao longo do eixo para o retificador rotativo, a saída do qual, por sua vez, alimenta o campo do gerador, ainda ao longo do eixo.



Figura 75: Sistema de excitação sem escovas

A grande dificuldade que teve de ser superada para o desenvolvimento do sistema de excitação sem escovas foi a intensidade dos esforços centrífugos a que os retificadores e seus dispositivos de proteção estariam sujeitos. Também foi necessário que as excitatrizes de corrente alternada fornecessem a mesma tensão que as excitatrizes de corrente contínua anteriores e também tivessem uma constante de tempo baixa. O desenvolvimento da tecnologia dos retificadores a semicondutores tornou possível a fabricação de retificadores capazes de resistir aos esforços rotacionais. Além disso, o uso de freqüências mais altas para as excitatrizes a.c. aumentou o nível da tensão de excitação e reduziu a constante de tempo.

5.2.4 Excitação Estática Utilizando Tiristores

Os sistemas de excitação foram muito beneficiados pelo rápido desenvolvimento dos tiristores durante a década de 60. O uso de tiristores reduziu consideravelmente o tempo de resposta do sistema de excitação e a transistorização do sistema de regulação de tensão melhorou as qualidades de "field forcing" (força do campo). A Fig. 76 mostra um diagrama de blocos do sistema.

A rapidez de resposta do sistema é devida ao fato de que os únicos retardamentos exis-

tentes são na filtragem da tensão terminal e no disparo dos tiristores, sendo que um valor típico de atraso para este último equipamento é 3.3 ms a 50 Hz. Outra vantagem é a redução do comprimento total da unidade geradora, pois não há excitatrizes piloto ou principal. Isto diminui o problema mecânico de alinhamento de eixos e mancais. Por outro lado, permanecem os problemas inerentes à presença dos anéis deslizantes do rotor do gerador.



Figura 76: Excitação estática com tiristores

5.2.5 Excitação sem Escovas Utilizando Tiristores

Seria muito desejável aliar às facilidades de manutenção do sistema sem escovas a rapidez de resposta obtida quando o regulador de tensão comanda o circuito de disparo dos tiristores através dos quais é alimentado o campo do gerador. Porisso, pensou-se em utilizar um sistema de excitação sem escovas e a tiristores, projeto ainda não totalmente desenvolvido. Os problemas principais da montagem são: os esforços centrífugos sobre os tiristores e equipamento associado, como fazer o disparo de tiristores rotativos e a supressão do campo, quando for necessário.

O disparo dos tiristores rotativos que está sendo testado é feito através de um transformador de pulso rotativo, sendo necessária a amplificação dos pulsos sobre o eixo. Quanto à supressão de campo, é uma possibilidade facilmente realizável nos sistemas de excitação convencionais, onde uma chave de campo e um resistor de descarga dão condições de reduzir rapidamente a corrente de campo do gerador, no caso de defeito grave (por exemplo, curtocircuito), minimizando os danos no estator provocados pelas correntes de defeito ou sobretensão. Isto é feito conectando-se o resistor em paralelo com o campo e desligando-se a excitatriz e retificadores. No sistemas sem escovas, contudo, é impossível a inclusão de equipamento volumoso como são o resistor de descarga e a chave de campo. Com diodos, a desexcitação pode ser conseguida suprimindo-se o campo da excitatriz tão rapidamente quanto for possível. Com tiristores, há a possibilidade de usar-se a capacidade de inversão transitória dos

Seção 5.3 Reguladores de Tensão

tiristores para dar uma supressão de campo tão boa quanto a dos sistemas convencionais.

5.3 Reguladores de Tensão



Figura 77: Diagrama de blocos do Sistema de Regulação de Tensão

5.3.1 Funções do Regulador de Tensão

A Fig. 77 apresenta um diagrama de blocos típico de um sistema de regulação de tensão para geradores. As principais funções de um regulador automático de tensão são:

- 1. Controlar a tensão terminal da máquina, dentro dos limites prescritos;
- Regular a divisão de potência reativa entre máquinas que operam em paralelo, particularmente quando estas estão em barra comum, gerando a mesma tensão terminal, isto é, sem transformador;
- Controlar de perto a corrente de campo, para manter a máquina em sincronismo com o sistema, quando esta opera a fator de potência unitário ou adiantado;
- Aumentar a excitação sob condições de curto-circuito no sistema, para manter a máquina em sincronismo com os demais geradores do sistema;
- Amortecer oscilações de baixa freqüência que podem trazer problemas de estabilidade dinâmica.

Os reguladores são necessários em compensadores síncronos (cuja finalidade é controlar tensão), em hidro-geradores (paramanter a tensão baixa no caso de súbita perda de carga e conseqüente sobre-velocidade) e em turbo-geradores sujeitos a grandes variações de carga. Na verdade, os reguladores de tensão são indispensáveis para manter a estabilidade dos geradores

síncronos.

A qualidade de um regulador de tensão é influenciada pela zona morta, que é a faixa de tensão na qual não se espera nenhuma resposta do regulador. Em outras palavras, a sensibilidade de um regulador pode ser insuficiente para permitir resposta a pequenas variações de tensão. Um regulador de tensão com zona morta não cumprirá à função (3) a grandes valores de ângulo de carga. Igualmente, a função (4) requer grande sensibilidade e rapidez de resposta.

5.4 Modelagem e Análise de um Sistema de Excitação Convencional

5.4.1 Modelagem

Considere o sistema de excitação com amplificador rotativo esquematizado na Fig. 78, cujo diagrama de blocos está representado na Fig. 79. Na seqüência, serão desenvolvidos os modelos e sua representação sob a forma de função de transferência para cada um dos componentes do sistema.



Figura 78: Sistema de excitação com amplificador rotativo

Transformadores de Potencial e Retificadores

A função de transferência do conjunto TPs+retificadores, frequentemente referido simplesmente como filtro, será considerada como sendo de primeira ordem, isto é, é caracterizada por um ganho e uma constante de tempo. A saída do filtro é uma tensão contínua proporcional à tensão terminal, e a sua entrada é a tensão terminal da máquina. Assim:





Figura 79: Diagrama de blocos para um sistema de excitação convencional.

$$\frac{v_{dc}(s)}{v_t(s)} = \frac{K_R}{1 + sT_R}$$
(5.181)

onde K_R é um ganho, em geral unitário, e T_R é uma pequena constante de tempo. Usualmente, $0 \le T_R \le 0,06$.

Amplificador Rotativo

Um amplificador rotativo típico é em geral representado por uma função de transferência de primeira ordem, cujo ganho será representado por K_A e cuja constante de tempo será denotada por T_A . Em geral, $25 \le K_A \le 50$, e $0,06 \le T_A \le 0,20$. Além disso, é necessário que sejam considerados no modelo limites máximo e mínimo sobre a saída do amplificador, de modo que grandes sinais de erro na entrada do regulador não produzam saídas que excedam limitações práticas. A representação sob a forma do blocos do amplificador é mostrada na Fig. 80.

Excitatriz

A aplicação da lei das malhas de Kirchhoff ao circuito de campo da excitatriz na Fig. 77 fornece:

$$N\frac{d\phi_F}{dt} + Ri = v_{fd} + v_R \tag{5.182}$$

onde ϕ_F é o fluxo magnético que enlaça o enrolamento de campo. Na Eq. (5.182), estão presentes 4 variáveis, mas estamos interessados em relacionar apenas a variável de entrada v_R com a tensão da armadura da excitatriz, v_{fd} . Isto é, torna-se necessário expressar as demais variáveis em termos de v_{fd} .

Supondo que a velocidade do eixo é constante, a relação entre ϕ_F e v_{fd} é:

$$v_{fd} = k \phi_{ef} \tag{5.183}$$

onde ϕ_{ef} é o fluxo magnético no entreferro da excitatriz. Se denotamos por ϕ_{disp} o fluxo de dispersão, então podemos escrever:

$$\phi_F = \phi_{ef} + \phi_{disp}$$

Capítulo 5 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS



Figura 80: Representação de um amplificador rotativo.

Faremos a consideração que o fluxo de dispersão pode ser determinado como uma fração constante do fluxo de campo, independentemente da condição de operação. Consequentemente, também poderemos considerar que o mesmo se aplica ao fluxo no entreferro. Se $1/\sigma$ representa a fração do fluxo de campo que atravessa o entreferro, isto é:

$$\phi_F = \sigma \phi_{ef}$$

então, da Eq. (5.183):

$$\phi_F = \left(\frac{\sigma}{k}\right) \times v_{fd} \tag{5.184}$$

Definindo $T_E \stackrel{\Delta}{=} (N \sigma)/k$, podemos agora re-escrever a Eq. (5.182) como:

$$T_E \frac{dv_{fd}}{dt} + R \, i = v_{fd} + v_R \tag{5.185}$$

Na Eq. (5.185), resta ainda expressar a corrente em termos de v_{fd} . A relação entre estas duas variáveis é dada pela característica de saturação da excitatriz, representada na Fig. 81. Seja $S'_E(v_{fd})$ a função não-linear tal que $S'_E(v_{fd}) \times v_{fd}$ representa o acréscimo de corrente de campo, Δi , exigido pela saturação para se produzir a tensão da armadura v_{fd} . Então, se R_{ef} é a inclinação da linha do entreferro da máquina, a corrente total necessária para produzir v_{fd} será dada por:

$$i = \frac{1}{R_{ef}} \times v_{fd} + S'_{E}(v_{fd}) \times v_{fd}$$
(5.186)

Definindo-se

$$K_E \stackrel{\Delta}{=} \frac{R}{R_{ef}} - 1$$

e utilizando-se a Eq. (5.186), podemos finalmente re-escrever a Eq. (5.182) em termos apenas de v_{fd} e v_R como:

$$T_E \frac{dv_{fd}}{dt} + K_E v_{fd} = v_R - S_E(v_{fd})v_{fd}$$
(5.187)

onde $S_E(v_{fd}) = R \times S'_E(v_{fd})$. Aplicando-se a transformada de Laplace à Eq. (5.187) com



Figura 81: Curva de Saturação de uma excitatriz de corrente contínua

condições iniciais nulas e explicitando-se v_{fd} , obtêm-se:

$$v_{fd}(s) = \frac{v_R - S_E \, v_{fd}}{K_E + s \, T_E} \tag{5.188}$$

O diagrama de blocos correspondente à Eq. (5.188) está representado na Fig. 82. Observe da definição de K_E que esta constante pode assumir valores negativos, dependendo do ajuste de base do reostato de campo da excitatriz (Ver Fig. 77).

Gerador

O modelo de gerador a ser desenvolvido a seguir aplica-se, a rigor, apenas para a condição de máquina a vazio. Entretanto, se forem desprezados os efeitos de ângulo sobre a tensão terminal (ver o modelo de Heffron e Phillips, na Seção 5.3), o mesmo modelo poderá ser usado como uma aproximação de primeira ordem para o gerador sob carga.

Considere portanto a máquina operando a vazio. Sejam $r_f \in L_f$, respectivamente, a resistência e a indutância do enrolamento de campo do gerador, ao qual está aplicada a tensão da armadura da excitatriz, e que é percorrido pela corrente i_f . A equação das tensões no circuito de campo do gerador fornece:

$$v_{fd} = r_f \ i_f + L_f \ \frac{di_f}{dt} \tag{5.189}$$



Figura 82: Diagrama de blocos para excitratriz.

Por outro lado, sabe-se que, a vazio, a tensão terminal da máquina é igual à tensão interna E_q , que nestas condições é dada por:

$$v_t = E_q = w M_f i_f$$

onde w é a velocidade da máquina e M_f é a indutância mútua entre os enrolamentos de campo e de armadura do gerador. Explicitando i_f na equção acima e definindo:

$$T_G \stackrel{\Delta}{=} \frac{L_f}{r_f}$$
$$K_G \stackrel{\Delta}{=} \frac{w M_f}{r_f}$$

é possível re-escrever a Eq. (5.189) como:

$$T_G \ \frac{dv_t}{dt} + v_t = K_G \ v_{fd}, \tag{5.190}$$

de onde se obtêm a função de transferência do gerador como:

$$\frac{v_t(s)}{v_{fd}(s)} = \frac{K_G}{1 + s T_G}$$
(5.191)

Observa-se que, na condição de máquina a vazio, a constante de tempo T_G definida acima nada mais é do que a *constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto* do gerador, denotada por T'_{do} na teoria de máquinas síncronas. Se o modelo acima for aplicado como uma aproximação para o caso de máquina em carga, contudo, T_G terá um valor menor que a constante T'_{do} do gerador (ver Seção 5.3).

Diagrama de Blocos Detalhado do Sistema de Excitação

A partir dos modelos de função de transferência desenvolvidos acima para cada um dos componentes do sistema de excitação, é possível re-desenhar o diagrama de blocos da Fig. 79 conforme mostrado na Fig. 83.



Seção 5.4 Modelagem e Análise de um Sistema de Excitação Convencional

Figura 83: Diagrama de blocos detalhado para o sistema de excitação típico.

5.4.2 Análise da Estabilidade do Sistema de Excitação Convencional

Nesta seção, aplicaremos técnicas de análise de estabilidade de sistemas lineares ao sistema de excitação da Fig. 83. Para tal, é obviamente necessário se desprezar os blocos não-lineares (limitadores do amplificador e saturação da excitatriz). Se isto for feito, é fácil se verificar que a função de transferência *em malha aberta* para o sistema é dada por:

$$KGH(s) = \frac{K_A K_G K_R}{(1 + s T_A)(K_E + s T_E)(1 + s T_G)(1 + s T_R)}$$
(5.192)

Considere os seguintes valores para os parâmetros do sistema:

e K_A é o parâmetro a ser ajustado. Substituindo-se os valores numéricos, obtêm-se:

$$KGH(s) = \frac{400 K_A}{(s+10)(s-0,1)(s+1)(s+20)}$$

O lugar geométrico das raízes do sistema em malha fechada pode ser obtido a partir de KGH(s), para K_A variando de 0 a ∞ , e está mostrado na Fig. 84.

Ainda utilizando-se KGH(s), obtêm-se a equação característica do sistema em malha



Figura 84: Lugar geométrico das raízer para o sistema de excitação

fechada como:

$$s^4 + 30,9 s^3 + 226,9 s^2 + 177 s + \bar{K} = 0$$

onde

$$\bar{K} \stackrel{\Delta}{=} 400 K_A - 20$$

A partir da equação característica acima, podemos construir o arranjo de Routh-Hurwitz para investigar a faixa de valores de \bar{K} que é compatível com a operação estável do sistema:

$$\begin{array}{cccccccc} s^4 & 1 & 226,9 & \bar{K} \\ s^3 & 30,9 & 177 \\ s^2 & 221,2 & \bar{K} \\ s^1 & 177-0,14\bar{K} \\ s^0 & \bar{K} \end{array}$$

As condições para estabilidade são:

$$\begin{array}{rcl} 0,14K<177 &\Rightarrow K<1266 &\Rightarrow K_A<3,21\\ \bar{K}>0 &\Rightarrow 400K_A-20>0 &\Rightarrow K_A>0,05 \end{array}$$

Portanto:

$$3,21 > K_A > 0,05$$

Em conclusão, verifica-se que as restrições de estabilidade do sistema em malha fechada impõem uma faixa bastante restrita para variação do ganho do amplificador. O ganho máximo admissível é bastante baixo, e em geral não satisfaz às restrições de precisão em regime permanente. Há três possíveis soluções para este impasse:

- Aumentar a resistência do campo da excitatriz, de modo a deslocar o pólo correspondente para a esquerda;
- 2. Deslocar o pólo do gerador mais para a esquerda;
- 3. Projetar um compensador para o sistema.

Destas opções, a única realmente viável na prática é a terceira. É possível se utilizar, por exemplo, um compensador de atraso de fase em série com o amplificador, de modo a se ter um ganho suficientemente alto em regime permanente para garantir boa precisão, o qual é reduzido em condições transitórias por efeito do compensador, de modo a manter a estabilidade. A estratégia que é tradicionalmente usada, entretanto, preconiza a utilização de um compensador de características derivativas em uma malha de realimentação secundária, conforme mostrado na Fig. 85. O projeto deste compensador será abordado na seção seguinte.



Figura 85: Sistema de excitação com compensador.

5.5 Projeto de Compensador para Sistemas de Excitação

O efeito da realimentação com características derivativas é o de alterar a forma do lugar das raízes, de modo a aumentar a faixa admissível de valores de ganho K_A . Os valores do ganho K_F e da constante de tempo T_F devem ser obtidos através da utilização de técnicas específicas de projeto, como a que será descrita a seguir, baseada no uso do Lugar Geométrico das Raízes

Capítulo 5 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

3.

A Fig. 86a apresenta o diagrama de blocos do sistema de excitação compensado após terem sido desconsideradas as não-linearidades de saturação e do limitador do amplificador. As partes (*b*) e (*c*) da mesma figura apresentam dois estágios de redução do mesmo diagrama. Da Fig. 86c, verifica-se que a função de transferência *do canal direto* do sistema pode ser escrita na forma:

$$KG(s) = \frac{K_A K_G}{T_A T_E T_G} \times \frac{1}{(s + \frac{1}{T_A})(s + \frac{K_E}{T_E})(s + \frac{1}{T_G})}$$
(5.193)

enquanto que a função de transferência do canal de realimentação é dada por:

$$H(s) = \frac{\frac{K_F T_G}{K_G T_F} s(s + \frac{1}{T_G})(s + \frac{1}{T_R}) + \frac{K_R}{T_R}(s + \frac{1}{T_F})}{(s + \frac{1}{T_F})(s + \frac{1}{T_R})}$$
(5.194)

Portanto, a função de transferência em malha aberta será dada por:

$$KGH(s) = \frac{K_A K_G}{T_A T_E T G} \times \frac{s(s + \frac{1}{T_G})(s + \frac{1}{T_R}) + (\frac{K_R K_G T_F}{T_R T_G K F})(s + \frac{1}{T_F})}{(s + \frac{1}{T_A})(s + \frac{K_E}{T_E})(s + \frac{1}{T_G})(s + \frac{1}{T_F})(s + \frac{1}{T_R})}$$
(5.195)

Substituindo-se os valores numéricos para os parâmetros conhecidos, com exceção de K_A , e considerando-se K_G e T_F como parâmetros a determinar, teremos:

$$KGH(s) = \frac{20K_AK_F}{T_F} \times \frac{s(s+1)(s+20) + 20(\frac{T_F}{K_F})(s+\frac{1}{T_F})}{(s+10)(s-0,1)(s+1)(s+\frac{1}{T_F})(s+20)}$$
(5.196)

Para um dado T_F , todos os pólos de KGH(s) na Eq. (5.196) estarão fixados. Neste caso, portanto, a forma do Lugar das Raízes dependerá somente da posição dos zeros de KGH(s), os quais são as raízes de:

$$s(s+1)(s+20) + 20(\frac{T_F}{K_F})(s+\frac{1}{T_F}) = 0$$

ou, equivalentemente:

$$0 = 1 + \left(\frac{20T_F}{K_F}\right) \times \frac{\left(s + \frac{1}{T_F}\right)}{s(s+1)(s+20)}$$
(5.197)

Definindo-se:

$$K \stackrel{\Delta}{=} \frac{20T_F}{K_F}$$
$$a \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{T_F}$$

³ Anderson P. e Fouad A., "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, págs. 271-284









Figura 86: Sistema de excitação com compensador baseado em realimentação derivativa, desprezando-se as não-linearidades.

a Eq. (5.197) pode ser escrita como:

$$1 + K \frac{s+a}{s(s+1)(s+20)} = 0$$
(5.198)

É importante ter em mente que as soluções da Eq. (5.198) fornecem os *zeros* da função de transferência em malha *aberta* (FTMA) do sistema de excitação. A forma em que foi escrita a equação facilita a análise da posição destes zeros em função dos valores do parâmetro *a* utilizando o método dos lugar das raízes. Observando-se o valor dos "pólos" na Eq. (5.198), vê-se claramente que ficam definidos os seguintes intervalos de interesse para o parâmetro *a* (tendo por base sua definição, considera-se que obviamente a > 0):

- *Caso I*: $0 < a \le 1$;
- *Caso II* : $1 < a \le 20$;
- Caso III : a > 20.

As Figs. 87A, 87B e 87C mostram o lugar dos zeros para os casos I, II e III, respectivamente. No caso I, verifica-se que um zero da FTMA, o qual chamaremos z_1 , ficará necessariamente confinado à região entre a origem e -a. Os demais zeros (z_2 e z_3) poderão ser reais ou complexos conjugados, dependendo do valor de $K = 20T_F/K_F$. Em qualquer caso, entretanto, z_1 atrairá sempre um pólo em malha fechada do sistema de excitação, conforme indicado nas Figs. 87D e 87G. Como este pólo real ficará sempre entre o pólo em malha aberta +0, 1 e z_1 , ele dominará a resposta dinâmica em malha fechada do sistema, que será portanto demasiado lenta.

Nos casos II eIII, por outro lado, a escolha conveniente de K poderá produzir dois zeros complexos conjugados, além de um zero real, conforme se pode inferir das Figs. 87B e 87C. A diferença entre os dois casos é que, no primeiro, as assíntotas a $\pm 90^{\circ}$ localizam-se no semiplano esquerdo do plano complexo, enquanto que, no segundo, as mesmas ficarão localizadas no semiplano direito.

Em resumo, verifica-se que a escolha de a correspondente ao caso I é inviável, pelas razões já apontadas. Restam portanto os casos II e III, para os quais há duas situações possíveis:

- Todos os zeros reais;
- Um par de zeros complexos mais um zero real.

Os lugares geométricos das raízes da função de transferência em malha fechada para estes casos correspondem às Figs. 87*E*, 87*F*, 87*H* e 87*K*. A análise das figuras mostra que nos dois primeiros a resposta do sistema continua a ser dominada por uma raiz muito próxima à origem, em razão da presença do zero real z_1 . Dos dois casos restantes, claramente o caso *H* é o melhor, já que há a possibilidade de deslocar o pólo em malha fechada mais para a esquerda do que no caso *K*.

Portanto, a função de transferência em malha aberta a ser utilizada será:



Figura 87: Lugares geométricos das raízes para os zeros da funçãode transferência em malha aberta (A, B e C), e pólos em malha fechada da função, supondo 3 zeros reias (D, E e F), e 2 zeros complexos e 1 real (G, H e K).

Capítulo 5 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

$$KGH(s) = \frac{20K_AK_F}{T_F} \times \frac{s^3 + 21s^2 + 20(1 + \frac{T_F}{K_F})s + \frac{20}{K_F}}{(s+10)(s-0,1)(s+1)(s+\frac{1}{T_F})(s+20)}$$
(5.199)

com $1 < \frac{1}{T_F} < 20$ ou, equivalentemente, $0.05 < T_F < 1$.

Estudos adicionais baseados em simulação e na construção de diagramas adicionais de lugar geométrico das raízes para diferentes valores de T_F na faixa acima permitem determinar os valores mais adequados para K_F e T_F . Nos estudos de simulação, são analisadas figuras de mérito como tempo de resposta, sobre-sinal, etc., enquanto que no lugar das raízes procurase obter as localizações mais favoráveis para os pólos em malha fechada no plano-s. Para o conjunto de parâmetros dados do presente exemplo, conclui-se que o melhor desempenho é obtido para $K_F = 0,02$ e $T_F = 0,6$.

5.6 Exercícios

- 1. Construa o diagrama de blocos de um sistema de excitação típico, com excitatriz de corrente contínua, para o qual os seguintes parâmetros são dados: Constante de tempo do amplificador = 0.2 s Constante de tempo da excitatriz = 0.4 s Constante K_E , função da resistência de campo da excitatriz auto-excitatriz = - 0,1 Constante de tempo do bloco de 1a. ordem que representa o gerador = 2,0 s Ganho do bloco de 1a. ordem que representa o gerador = 1,0Constante de tempo do filtro $\approx 0, 0 s$ Ganho do filtro = 1,0a) Encontre a função de transferência em malha aberta do sistema de excitação, sem considerar a presenca de malhas de realimentação secundárias; b) Esboce o lugar das raízes para o sistema, supondo variável o ganho do amplificador e sem considerar qualquer malha de estabilização; c) Encontre o máximo valor admissível de ganho do amplificador para que o sistema seja estável. 2. Suponha que, para o sistema do exercício 1, é introduzida uma malha de estabilização
- baseada na realimentação da tensão da armadura da excitatriz através de uma função de transferência do tipo $sKF/(1 + sT_F)$, onde $T_F = 0, 1 s$ e $K_F = 0, 01$. Re-estude o problema da estabilidade da malha de controle de excitação e as restrições sobre o ganho do amplificador.
- 3. Considere o diagrama de blocos da Fig. 88, que corresponde a um sistema compensado de controle de tensão, para a condição de máquina a vazio, de um gerador síncrono. As constantes de tempo da excitatriz, T_E , e transitória de eixo direto em circuito aberto, T'_{do} , são iguais respectivamente a $0,05 \ s \ e \ 6,0 \ s$.

a) Admita inicialmente que as freqüências $1/T_1$ e $1/T_2$ associadas ao compensador são



Figura 88: Sistema de excitação para Exercício 3.

muito menores que as freqüências de corte da excitatriz e do gerador de modo que, nas freqüências de interesse, o efeito do compensador possa ser traduzido simplesmente por uma modificação do ganho da excitatriz para um valor de ganho transitório $K'_E = K_E(T_1/T_2)$. Determine então o ganho transitório K'_E da excitatriz para o qual a razão de amortecimento do sistema em malha fechada é E = 0, 5. b) Considere agora que, nas condições de regime permanente, deseja-se um erro estático ao degrau de 0, 5%. Se $T_2 = 2, 5 s$, qual deve ser o valor de T_1 para que se preserve o ganho transitório do item (a) e se garanta a precisão desejada?

- 4. Considere o sistema de excitação cujos parâmetros são dados na seção 5.4.2. Adicionalmente, suponha que $K_A = 40$. Esboce o lugar das raízes para o sistema cuja função de transferência em malha aberta é dada na Eq. (5.199) supondo que $T_F = 0, 3$ e para valores de K_F variando entre 0, 02 e 0, 10.
- 5. Esboce o lugar das raízes para o sistema de excitação da seção 5.5 supondo K_A variável e $T_F = 0, 3, K_F = 0, 05$.