

Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

Antonio J.A. Simões Costa e Aguinaldo S. e Silva

Florianópolis, agosto de 2000

Capítulo 1

Introdução

1.1 Controle de Frequência e Tensão na Operação de Sistemas de Potência

Diz-se que um sistema de potência encontra-se no *estado normal de operação* quando as seguintes condições são cumpridas:

- A demanda de todas as cargas alimentadas pelo sistema é satisfeita;
- A frequência é mantida constante em seu valor nominal (60Hz).

Na apreciação destes requisitos, deve ser considerado que as cargas do sistema variam de maneira aleatória, embora lentamente e em ciclos diários, semanais e sazonais. Além disso, como a energia elétrica não pode ser armazenada, ela deve ser gerada “na medida certa” no instante em que for solicitada pela carga.

A função precípua do controle de sistemas de potência é manter o sistema operando no estado normal. Em outras palavras, trata-se de garantir um suprimento contínuo de energia respeitando-se simultaneamente certos padrões de qualidade. Estes últimos consistem basicamente em se manter a frequência constante e a tensão dentro de certos limites.

Manter a frequência constante e igual ao seu valor nominal é importante por uma série de motivos. Por exemplo, o desempenho da maioria dos motores de corrente alternada industriais é função da frequência; frequência nominal também é exigida por cargas nobres, como computadores; em certos países, o uso de relógios elétricos, cujo desempenho está obviamente ligado à frequência, é muito disseminado, etc. Mas o motivo mais importante para manter a frequência igual ao seu valor nominal é o fato de que ela é um indicador de que o balanço de potência ativa está sendo adequadamente cumprido. Isto é, a potência ativa fornecida pelos geradores do sistema é igual à potência ativa solicitada pelas cargas.

Quanto à tensão, pode-se igualmente dizer que o desempenho de vários componentes da carga (torque de motores de indução, fluxo luminoso de lâmpadas, etc) é também fortemente ligado à tensão, além do fato de que a tensão, de maneira análoga à frequência para a potência ativa, é um indicador do balanço de potência reativa. Contudo, a possibilidade de se poder contar com fontes locais de reativo (bancos de capacitores, compensadores síncronos e estáticos, reatores) e com outros meios de controle além da excitação dos geradores (“taps” de transformadores) faz com que sejam toleradas variações de tensão bem maiores do que é normalmente admitido para a frequência.

O controle de sistemas de potência é facilitado pela aplicação da propriedade de desacoplamento entre os pares de variáveis *potência ativa* (P) - *ângulo da tensão* nas barras (δ) e *potência reativa* (Q) - *magnitudes de tensão* (V). Embora teoricamente variações em P possam afetar V e mudanças em Q possam influenciar δ , dentro da faixa normal de operação estes efeitos cruzados são apenas marginais. Assim, controlando-se o torque entregue pelas

máquinas primárias aos geradores controla-se essencialmente a potência ativa e consequentemente a frequência (cujas variações estão ligadas às variações de δ). Da mesma forma, através de variações apropriadas da excitação do campo dos geradores controla-se a potência reativa gerada e consequentemente a tensão terminal da máquina.

1.2 Principais Malhas de Controle Associadas a um Gerador Síncrono

São três os principais sistemas de controle que atuam sobre o gerador síncrono:

1. Controle primário de velocidade;
2. Controle suplementar de carga-frequência, ou Controle Automático de Geração;
3. Controle da Excitação.

A Fig.1 apresenta um diagrama de blocos simplificado com os sistemas de controle de um gerador síncrono.

O controle primário de velocidade, que é local, basicamente monitora a velocidade do eixo do conjunto turbina-gerador e controla o torque mecânico da turbina de modo a fazer com que a potência elétrica gerada pela unidade se adapte às variações de carga. As constantes de tempo do controle primário são de ordem de alguns segundos.

Como a atuação do controle primário normalmente resulta em desvios de frequência, é necessário que se conte com a atuação de um outro sistema de controle para restabelecer a frequência ao seu valor nominal. Este sistema é chamado controle suplementar (ou Controle Automático da Geração) que, no caso de sistemas interligados, tem ainda a incumbência de manter o intercâmbio de potência entre concessionárias vizinhas tão próximo quanto possível dos valores previamente programados. Trata-se de um sistema de controle centralizado, executado no centro de operações das empresas, e cujas constantes de tempo são de ordem de minutos.

Finalmente, os objetivos de controle da excitação, que é local, podem ser sumarizados como: (a) manter a tensão terminal do gerador dentro de tolerâncias especificadas; (b) Regular o fluxo de reativo entre máquinas e (c) Amortecer as oscilações do rotor da máquina quando da ocorrência de perturbações no sistema. Esta última função de regulador de tensão advém do fato de que a tensão do campo do gerador afeta significativamente o torque elétrico da máquina. As constantes de tempo do sistema de controle de excitação são de ordem de milissegundos.

1.3 O Problema da Estabilidade de Sistemas de Potência

1.3.1 Definições e Exemplo

O termo “estabilidade de sistemas de potência” é aplicável a sistemas de potência em corrente alternada para denotar uma condição em que as várias máquinas síncronas do sistema permanecem mutuamente em sincronismo. “Instabilidade”, por outro lado, denota uma condição

Seção 1.3 O Problema da Estabilidade de Sistemas de Potência

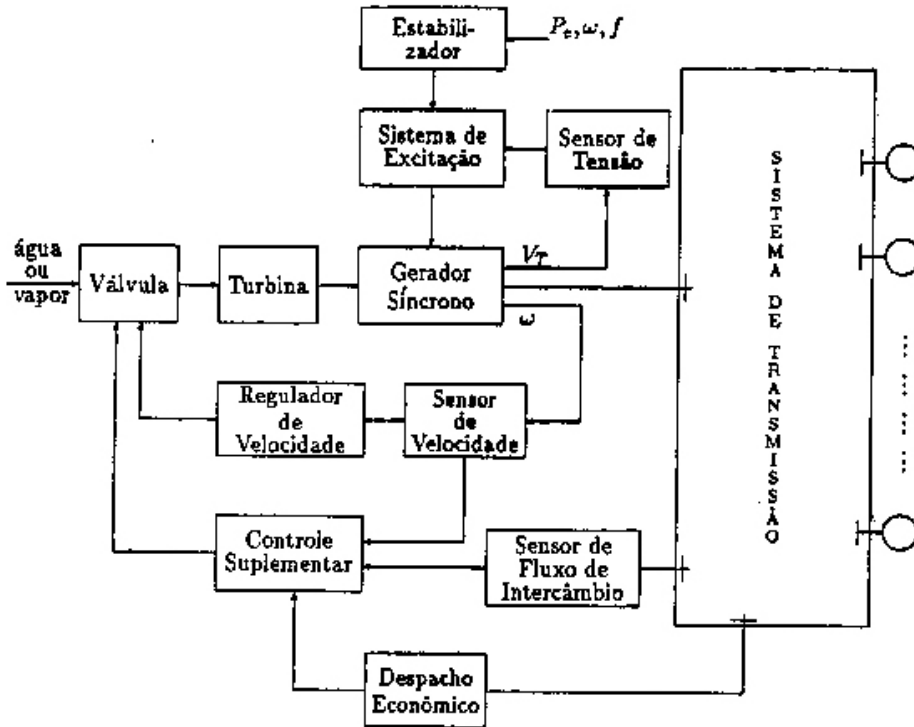


Figura 1: Principais malhas de controle associadas a um gerador síncrono.

que envolve perda de sincronismo.

Para ilustrar o problema de estabilidade de sistemas de potência, considere o sistema da Fig. 2, formado por um gerador síncrono alimentando um motor síncrono através de um circuito composto de uma reatância indutiva série, X_L . As máquinas são representadas por tensões constantes atrás de reatâncias (estas últimas serão reatâncias síncronas ou transitórias, dependendo do estudo em que se tem interesse).

Se

$$X \triangleq X_G + X_L + X_M \quad (1.1)$$

e como

$$\dot{I} = (\dot{E}_G - \dot{E}_M) / jX \quad (1.2)$$

Capítulo 1 Introdução

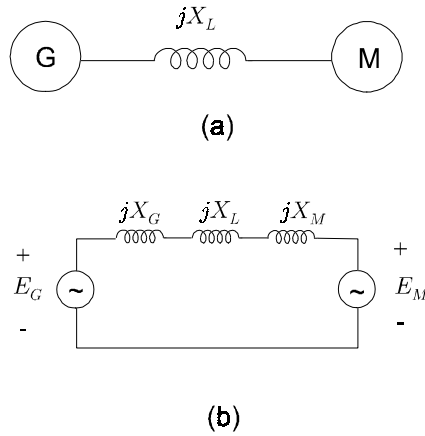


Figura 2: (a) Sistema gerador síncrono alimentando motor; (b) Circuito equivalente.

pode ser mostrado a partir do diagrama fasorial da Fig. 3 que a potência de saída do gerador (que é igual à potência de entrada do motor, já que não se consideram perdas), é dada por

$$P = \frac{E_G E_M}{X} \text{sen} \delta \quad (1.3)$$

onde δ é o deslocamento angular entre os dois rotores. A curva potência-ângulo é mostrada na Fig. 4. A máxima potência que pode ser transmitida em regime com a reatância dada X e as tensões internas E_G e E_M é

$$P_{max} = \frac{E_G E_M}{X} \quad (1.4)$$

que ocorre para $\delta = 90$ graus. Este valor máximo pode ser aumentado tanto através da elevação das tensões internas quanto reduzindo-se a reatância X .

Suponha que o sistema está operando em regime no ponto A. A potência mecânica de entrada do gerador e a potência mecânica de saída do motor (se corrigidas pelas perdas rotacionais) serão iguais à potência elétrica P .

Considere então um pequeno incremento de carga no eixo do motor. Haverá em consequência um torque líquido no rotor do motor que tende a retardá-lo, de modo que sua velocidade decresce temporariamente. Disto resulta um aumento no ângulo δ e um conseqüente incremento na potência de entrada para o motor, até que finalmente entrada e saída alcancem novamente o equilíbrio, sendo o novo ponto de operação representado por B na Fig. 4. (Foi suposto que a velocidade do gerador permanece constante. Na realidade o gerador desacelerará momentaneamente, até que o seu regulador de velocidade atue no sentido de aumentar a potência mecânica de entrada, de modo a equilibrar o aumento da potência elétrica de saída).

Seção 1.3 O Problema da Estabilidade de Sistemas de Potência

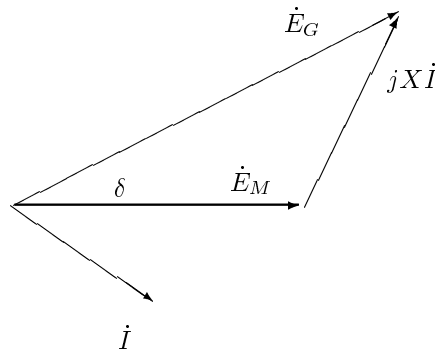


Figura 3: Diagrama fasorial para sistema gerador-motor.

Suponha que a carga do motor é aumentada de maneira gradual até que seja atingido o ponto C . Qualquer aumento adicional de carga, a partir do ponto C , acarretará um aumento no ângulo δ como antes, mas agora este último não provocará aumento na potência de entrada. Ao invés disso, ocorrerá um decréscimo na entrada, o que aumentará ainda mais a diferença entre entrada e saída, retardando o motor mais rapidamente. O motor sairá finalmente de sincronismo. O valor P_{max} é portanto o *Limite de Estabilidade Estática* do sistema. O sincronismo será perdido se se tentar transmitir mais potência do que este valor.

Se um grande incremento de carga for adicionado subitamente ao motor, este poderá perder o sincronismo mesmo se a nova carga não exceder o limite estático. Neste caso, a saída de potência mecânica do motor torna-se muito maior que a entrada de potência elétrica, e a diferença é suprida pelo decréscimo de energia cinética. O motor desacelera, resultando em um aumento no ângulo δ e um conseqüente aumento da entrada. Se a nova carga não excede P_{max} , δ aumenta para o valor correspondente à operação estática, em que entrada = saída. Mas, quando δ atinge este valor, o motor está girando a uma velocidade muito baixa, e seu momento de inércia impede que sua velocidade aumente de imediato para o valor normal. Assim, δ aumenta mais, ultrapassando o valor adequado. Além deste ponto, o torque líquido é de aceleração, e a velocidade do motor aumenta, aproximando-se do valor normal. Antes disso, contudo, é possível que o ângulo δ tenha aumentado tanto que o ponto de operação não somente ultrapassou o pico da curva potência-ângulo, mas deslocou-se de tal maneira sobre a curva que a entrada decresce para um valor menor que a saída (além do ponto D na Fig. 4). O torque resultante passa a ser de novo de desaceleração e a velocidade, ainda menor que a normal, decresce ainda mais. O sistema torna-se portanto instável.

Se, contudo, o incremento súbito de carga não é tão grande, o motor poderá recuperar sua velocidade nominal antes que δ atinja um valor demasiado alto. Neste caso, o torque líquido será ainda de aceleração e provocará um decréscimo em δ , que se aproximará do valor adequado. Em razão da inércia, δ ultrapassará ainda este valor, ocorrendo diversas oscilações em torno do novo ponto de operação. Estas oscilações serão finalmente amortecidas devido à presença de torques de amortecimento, aqui desprezados. Este movimento oscilatório amortecido caracteriza operação estável.

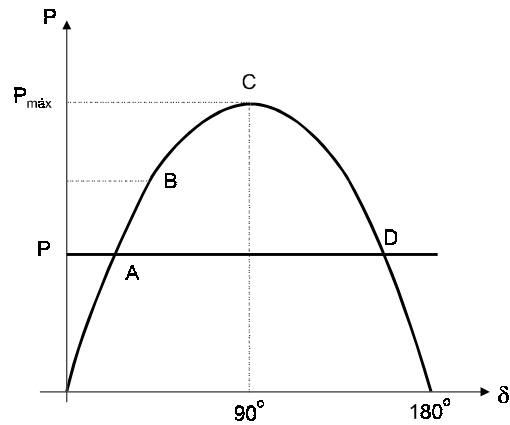


Figura 4: Curva potência-ângulo para o sistema gerador-motor.

Para um dado incremento de carga, há um limite superior para a carga que o motor suporta sem sair de sincronismo. Este é o *Limite de Estabilidade Transitória* do sistema para as condições dadas. Este limite está sempre abaixo do limite estático mas, ao contrário do último, pode ter valores distintos, dependendo da natureza e intensidade da perturbação, que pode ser um súbito incremento de carga, ou súbito aumento de reatância (causado, por exemplo, pela desconexão de um circuito de linhas em paralelo, em decorrência de manobra normal), ou ainda um curto-circuito, que se constitui na perturbação mais severa. O efeito de curtos-circuitos é geralmente determinado em todos os estudos de estabilidade. Um curto trifásico na linha que conecta o gerador ao motor, por exemplo, provocará o surgimento de um torque de aceleração no gerador e um torque de desaceleração no motor. O sincronismo será perdido, exceto se o curto for rapidamente removido.

Para outros tipos de curtos-circuitos (monofásicos, bifásicos, bifásicos para terra), ou para curtos em um de dois circuitos em paralelo, subsistirá ainda algum torque de sincronização, mas com redução da amplitude da curva potência-ângulo em comparação com as condições de antes da falta. A estabilidade do sistema dependerá nestes casos não somente do sistema, mas também do tipo de defeito, posição do defeito, rapidez de abertura de disjuntores, religamento, etc. Para qualquer perturbação especificada, a questão da manutenção ou não do sincronismo depende do valor da potência que estava sendo transmitida antes da ocorrência da falta. Há assim um valor de potência transmitida para cada perturbação especificada, que é o limite de estabilidade transitória, acima do qual o sistema é instável.

1.3.2 Estabilidade Transitória x Estabilidade Dinâmica

Dois tipos de estudos de estabilidade são normalmente conduzidos nas empresas de energia elétrica. Os fenômenos que se seguem à ocorrência de uma grande e súbita perturbação em um sistema de potência são normalmente associados ao termo “Estabilidade Transitória” e a

Seção 1.4 Importância dos Estudos de Controle e Estabilidade

solução é obtida no domínio do tempo. O período de tempo sob estudo pode variar de uma fração de segundo, quando a estabilidade da primeira oscilação é determinada, para períodos superiores a 10 segundos, nos casos em que a estabilidade para múltiplas oscilações deve ser examinada.

O termo “Estabilidade Dinâmica” é empregado para descrever a resposta de um sistema a pequenas perturbações ou a controles automáticos mal ajustados. O problema pode ser resolvido tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

1.3.3 Efeitos dos Controles sobre a Estabilidade

O fato de que as constantes de tempo da malha de excitação são significativamente menores do que as constantes de tempo das malhas de regulação de velocidade tornam o controle de excitação muito mais efetivo no que diz respeito à manutenção da estabilidade do que o controle de velocidade. As exigências sobre o controle de excitação em estudos de estabilidade transitória são normalmente rapidez de resposta e um alto valor de tensão máxima (“ceiling”). O objetivo é tentar reduzir a magnitude das primeiras oscilações aumentando a potência de sincronização.

No caso de estabilidade dinâmica, espera-se que o controle de excitação propicie não apenas o reforço da potência de sincronização, mas também um aumento do amortecimento de oscilações decorrentes de uma pequena perturbação. Em alguns casos, a rapidez de resposta exigida em problemas de estabilidade transitória (e que caracteriza os sistemas de excitação tiristorizados modernos para hidrogeradores) pode ser conflitante com a manutenção da estabilidade dinâmica, como será visto em capítulo subsequente.

1.4 Importância dos Estudos de Controle e Estabilidade

Em uma concessionária típica de geração e transmissão de energia elétrica, os estudos de controle e estabilidade são importantes em diversos setores dentro da empresa. Na operação, por exemplo, é freqüente a realização de estudos de análise de estabilidade para os quais são importantes ajustes adequados dos diversos controladores do sistema. É portanto necessário que os engenheiros que atuam neste setor disponham de meios para projetar adequadamente os parâmetros dos diversos controladores, bem como detenham os conhecimentos necessários para analisar os resultados de simulações dinâmicas do sistema e propor alterações em ajustes previamente estabelecidos.

Em estudos de planejamento da expansão, torna-se cada vez mais importante a consideração de restrições de estabilidade para as diversas configurações de geração, carga e topologia da rede contempladas para a expansão futura do sistema.

Finalmente, nas áreas ligadas à geração térmica e hidráulica, estudos visando obter os ajustes mais eficazes para parâmetros de reguladores de velocidade e de controladores ligados aos sistemas de excitação constituem-se em tarefas regulares dos engenheiros atuantes nestes setores das empresas.