



Capítulo I

Fatores limítrofes, arranjos e aterramento de geradores

Por Geraldo Rocha e Paulo Lima*

As retiradas de geradores do sistema de potência devido a curto-circuitos, operação anormal ou operação indevida do sistema de proteção são bastante onerosas quando ocorrem. Por isso, os geradores síncronos são expostos constantemente a severas condições de operação e um sistema completo de proteção é necessário para evitar danos às unidades geradoras quando sujeitas a tais condições.

Os atuais relés de proteção digital provêm de uma vasta gama de funções de proteção, no entanto, a correta definição das necessidades de cada máquina e a definição de seus ajustes requerem conhecimento do engenheiro de proteção.

Limites de geração

Os fluxos de potência ativa e reativa de um sistema são relativamente independentes. Para uma linha de transmissão conectando dois sistemas, o fluxo de potência ativa é proporcional à abertura angular entre as tensões de cada terminal. Este fluxo é no sentido do terminal com ângulo mais adiantado para o terminal com ângulo mais atrasado.

Já para potência reativa, o fluxo

dependerá principalmente do módulo da tensão. Este fluxo será do terminal com maior módulo de tensão para o de menor módulo de tensão. A frequência de operação do sistema depende do balanço de potência ativa e a tensão do sistema depende do balanço de potência reativa.

Os geradores síncronos possuem a capacidade de gerar potência ativa e gerar (operação sobrecitado) ou consumir (operação subexcitado) potência reativa.

Reguladores automáticos de velocidade instalados em turbinas proporcionam o controle de geração de potência ativa e, conseqüentemente, o controle de frequência. Já os reguladores automáticos de tensão proporcionam o controle da geração/consumo de potência reativa por meio de um controle em malha fechada, comparando a tensão do terminal da máquina com um valor de referência.

Muitos fatores limitam a geração de potência ativa e reativa. Esses fatores incluem os limites térmicos, relacionados com a curva de capacidade dos geradores determinadas pelo fabricante, limites de tensão e limites de estabilidade do sistema.

Limites térmicos

Existem três tipos de limites térmicos do gerador: o limite da corrente da armadura, que está diretamente relacionado à potência nominal do gerador, o limite da corrente de campo e o limite do núcleo de ferro do estator.

Na Figura 1, os três limites térmicos de um gerador estão representados. Assumindo que a potência é medida em p.u. (por unidade), um semi-ciclo de raio unitário pode ser traçado e representa o limite de capacidade máxima teórica de um gerador (GTMC). Esse limite corresponde à potência em MVA do gerador.

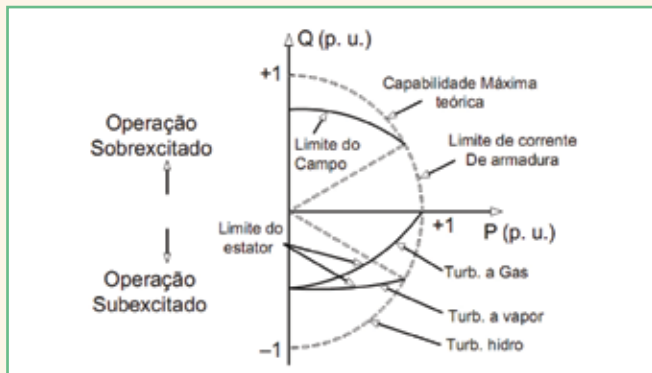


Figura 1 – Capabilidade máxima teórica.

Limite de corrente de armadura

O limite de corrente de armadura resulta das perdas elétricas do cobre do estator. Existe uma máxima corrente de regime permanente permitida para que o gerador opere sem que ocorra sobreaquecimento. No plano P-Q, o limite de corrente de armadura é definido como um círculo de raio equivalente à potência em MVA do gerador e centro na origem (curva BC na Figura 2).

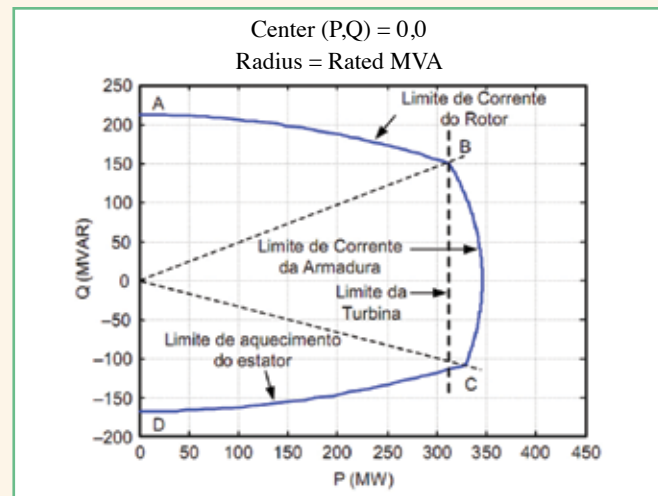


Figura 2 – Curva de capacidade de um gerador.

Limite da corrente de campo

As perdas elétricas do cobre do enrolamento do rotor impõem o limite de corrente de campo. A relação entre a potência ativa e reativa para uma dada corrente de campo descreve um círculo (curva AB na Figura 2) com centro na parte negativa do eixo Q (MVAR).

Consideramos o modelo com corrente de campo constante e desprezamos os efeitos da saliência de pólos (assumimos que $X_d = X_q$) e resistência do estator.

Para esta configuração, descrevemos um círculo de centro e raio conforme segue:

$$\text{Centro}(P, Q) = 0, -\frac{V_t^2}{X_d}$$

$$\text{Raio} = \frac{E_q \cdot V_t}{X_d}$$

E_q e V_t são a tensão interna do gerador e a tensão no terminal do gerador, respectivamente.

O ponto B, mostrado na Figura 2, representa a potência nominal de placa do gerador.

Limite do núcleo de ferro do estator

O limite do núcleo de ferro do fim do estator impõe o limite térmico na região de subexcitação (curva CD na Figura 2). O fluxo magnético principal do gerador é um fluxo radial, portanto, paralelo às lâminas do estator. No entanto, o fluxo de dispersão é um fluxo axial perpendicular às lâminas do estator, o que resulta correntes parasitas que sobreaquecem o pacote de lâminas estatóricas. Fato este que é agravado na operação subexcitada do gerador, pois a corrente de campo é baixa e o fluxo de dispersão é alto.

Literaturas mostram que este limite é descrito por um círculo de centro no semi-eixo positivo de Q e raio conforme segue:

$$\text{Centro}(P, Q) = 0, K_1 \cdot \frac{V_t^2}{X_d}$$

$$\text{Raio} = K_1 \frac{V_t}{X_d}$$

Em que:

$$K_1 = -\frac{N_a \cdot N_f - N_f^2}{N_f^2 + N_a^2 - 2 \cdot N_a \cdot N_f}$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{K_f(N_f^2 + N_a^2 - 2 \cdot N_a \cdot N_f)}}$$

N_f e N_a representam o número de espiras do enrolamento de campo e armadura, respectivamente; $\Delta\theta$ é a máxima sobretemperatura permitida; K_f é uma

constante proporcional que relaciona a energia térmica com o quadrado do fluxo magnético.

Limites de tensão

A tensão terminal do gerador é restrita a operar em uma faixa determinada pelos limites do gerador ou do transformador elevador.

Para uma máquina de polos lisos ou de polos salientes, essa faixa é de ± 5 da tensão nominal. Já os transformadores precisam atender a dois requisitos de tensão para qualquer tap primário ou secundário.

Limites de estabilidade

Outro limitador para a potência gerada por uma unidade geradora é o limite de estabilidade do sistema. Os sistemas elétricos de potência normalmente operam próximos da frequência nominal, em que todos os geradores conectados a este sistema operam na mesma velocidade média.

Existe um balanço constante entre a potência ativa gerada e a consumida sob condições normais de operação. Mudanças na carga e na configuração do sistema geram pequenas perturbações no sistema de potência.

A Figura 3 descreve um gerador conectado a um sistema elétrico de potência.

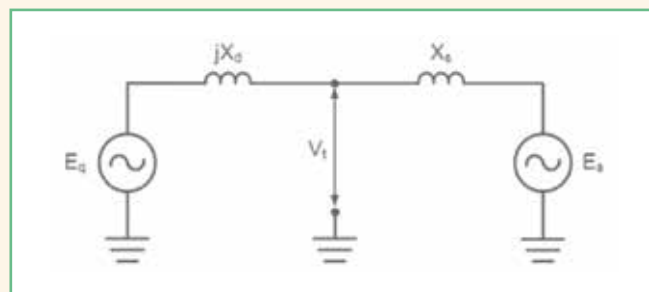


Figura 3 – Diagrama simplificado do sistema de potência.

O sistema elétrico é representado por meio do equivalente de Thévenin, pela tensão E_s e pela impedância X_s .

O limite de estabilidade estática de uma máquina síncrona é definido como a máxima potência que pode ser transmitida entre o barramento de geração e o barramento de consumo, sem perda de sincronismo.

Para o sistema apresentado na Figura 3, a potência elétrica transferida P_e é:

$$P_e = \frac{E_q \cdot E_s}{X_d + X_s} \sin \delta$$

Em que δ é a diferença angular entre a tensão interna da máquina e a tensão do sistema.

A máxima potência transferida é dada para $\delta = 90^\circ$. Para ângulos maiores que 90° , tem-se um decréscimo na potência transferida e conseqüente perda de estabilidade do sistema. A Figura 4 ilustra o exposto:

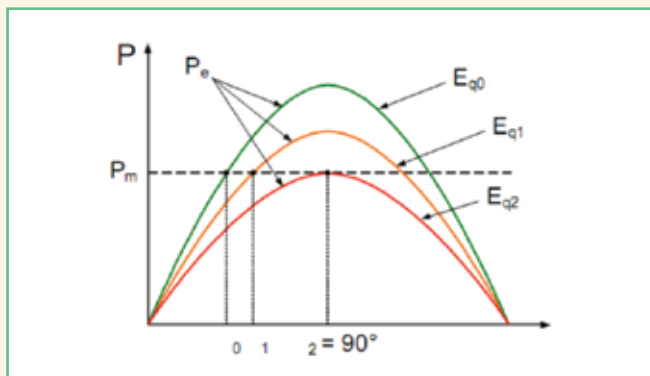


Figura 4 – Ângulos de potência para diversos níveis de excitação.

Nota-se também que, pela figura, para uma mesma potência mecânica, níveis de tensão de excitação diferentes podem aproximar a operação do gerador do limite de estabilidade do sistema.

Para o caso do modelo de excitação constante, pode-se traçar um círculo no plano P-Q, que irá definir o limite de estabilidade do sistema com os seguintes parâmetros:

$$Centro(P, Q) = 0, \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d} \right)$$

$$Centro(P, Q) = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d} \right)$$

Tipicamente, quando o sistema é forte (X_s é baixo), o limite de estabilidade está fora da curva de capacidade do gerador. Contudo, se o sistema é fraco (X_s é alto), o limite de estabilidade pode infringir a curva de capacidade do gerador na região de subexcitação.

Arranjos de geração

Existem inúmeras configurações de arranjos possíveis para unidades geradoras de energia elétrica. Esses arranjos devem ser observados e analisados pelo engenheiro de proteção, pois influenciará na escolha de funções de proteção adequadas e nos ajustes da proteção.

Como exemplo, um gerador e um transformador elevador associado podem ser conectados como uma unidade de geração e um ou dois transformadores de serviço auxiliares (TSA) podem também fazer parte desta configuração.

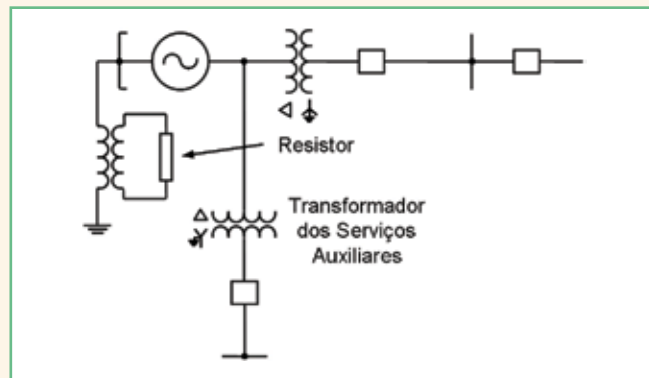


Figura 5 – Gerador conectado diretamente ao transformador elevador.

Observe que o transformador de serviço auxiliar influencia na quantidade de enrolamentos de restrição necessária para a proteção diferencial global. O método de aterramento do neutro do gerador e o tipo de conexão do enrolamento do transformador elevador mostrados são típicos para este arranjo.

O método de aterramento do neutro do gerador afeta a sensibilidade dos relés de proteção para detecção de faltas à terra no estator. Podem também existir requisitos especiais de operação e desempenho devido à interconexão no nível da distribuição que afetam o sistema de proteção. Nos próximos arranjos mostrados nas Figuras 6 e 7, dois ou mais geradores compartilham um transformador.

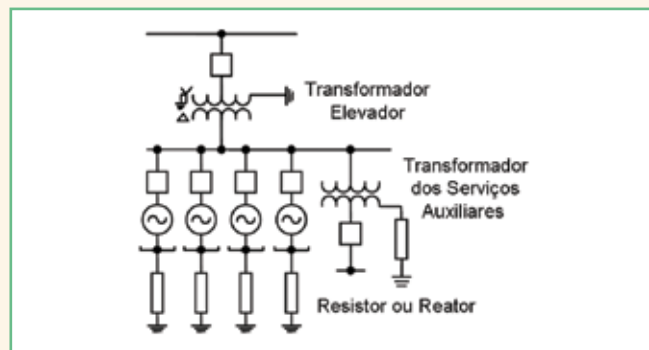


Figura 6 – Vários geradores conectados a um único transformador elevador.

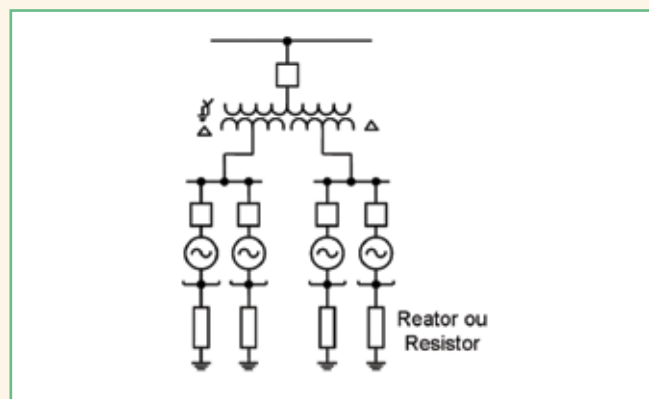


Figura 7 – Vários geradores conectados a um único transformador elevador.

Tipicamente, as duas maneiras mostradas são encontradas em PCHs ou em geradores com turbinas a combustão.

Pequenas unidades geradoras podem ser conectadas diretamente ao sistema de distribuição sem a necessidade de conexão por meio de um transformador elevador. A norma IEEE 1547-2003 “IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems” traz recomendações para este tipo de conexão e é aplicável a uma capacidade agregada máxima de 10 MVA.

Um arranjo típico para pequenos geradores conectados diretamente ao sistema de distribuição está exemplificado na Figura 8.

Métodos de aterramento de geradores

O guia IEEE C62.92.2 – “IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems Part II – Grounding of Synchronous Generator Systems” discute os fatores que devem ser considerados na seleção da classe de aterramento e a aplicação dos métodos de aterramento. As duas principais classes de aterramento consideradas neste fascículo estão aqui relacionadas:

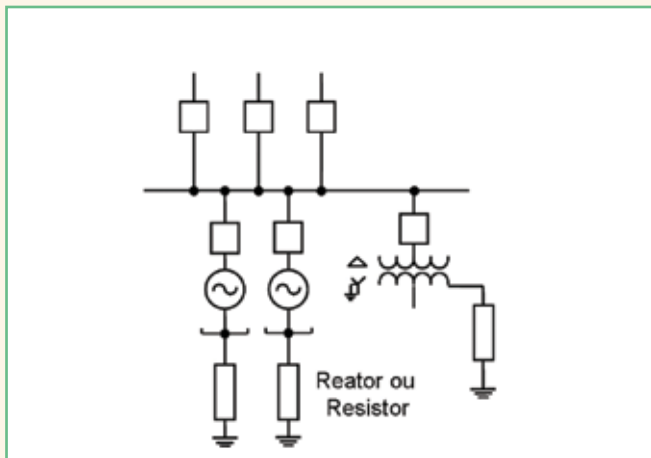


Figura 8 – Arranjo típico para pequenos geradores.

- Aterrado com alta resistência
- Aterrado com baixa resistência

O principal objetivo do aterramento de geradores é a proteção do gerador e equipamentos associados contra danos causados por condições elétricas anormais. O tipo da classe de aterramento selecionado

depende da importância relativa para o usuário de cada um dos cinco objetivos:

- Minimizar os danos de faltas à terra internas;
- Limitar o stress mecânico para faltas à terra externas;
- Limitar sobretensões temporárias e transitórias;
- Propiciar a detecção de faltas à terra;
- Permitir a coordenação da proteção do gerador com os requisitos de outros equipamentos.

Aterramento por alta resistência

Neste tipo de aterramento, um resistor com valor ôhmico baixo é conectado ao secundário de um transformador de distribuição monofásico. A resistência efetiva vista no neutro do gerador é a resistência colocada no secundário do transformador de distribuição refletida ao primário. A Figura 9 mostra este tipo de aterramento.

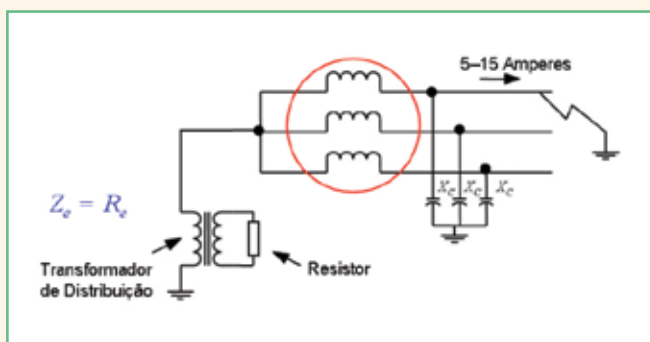


Figura 9 – Aterramento por alta resistência.

O valor do resistor é escolhido para limitar as sobretensões transitórias e a máxima corrente de falta fase-terra entre 5 A e 15 A.

Em geral, o valor nominal da tensão primária do transformador de distribuição é de 1,5 vezes a tensão nominal fase-neutro do gerador.

O valor nominal kVA do transformador de distribuição depende se o sistema de proteção vai gerar um alarme ou dar trip quando uma falta à terra for detectada e deverá ser dimensionado para suportar a corrente de curto-circuito fase-terra nos terminais do gerador síncrono durante o tempo total de eliminação da falta.

A potência aparente do transformador é igual à potência dissipada no resistor de aterramento. As tensões secundárias do transformador de distribuição mais utilizadas são de 120 V e 240 V.

Um relé de sobretensão sensível, sintonizado com

a frequência fundamental, é conectado ao secundário para fornecer proteção contra faltas à terra no estator em aproximadamente 90% do enrolamento. Isso significa que uma falta à terra em 10% do enrolamento, próximo ao neutro, não será detectada. Contudo, existem outras técnicas de proteção para detectar essas faltas.

Aterramento por baixa resistência

Neste tipo de aterramento, a corrente de falta à terra pode ser limitada em qualquer valor, porém normalmente ela varia desde várias centenas de amperes até 1,5 vezes a corrente nominal do gerador. O limite superior está relacionado à potência nominal requerida para o resistor, uma vez que valores nominais elevados de potência resultam em altos custos.

A desvantagem desta prática é a utilização de uma resistência de valor elevado, projetada para atuar no mesmo nível da tensão nominal do gerador síncrono. No caso de geradores de baixa tensão não há este problema.

Se o projetista quiser limitar a corrente a um valor máximo, I_{max} , o resistor de aterramento é calculado como:

$$R_e = E / I_{max}$$

Em que E é a tensão nominal fase-neutro do gerador.

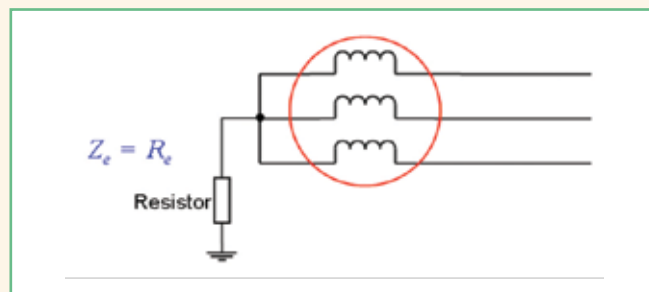


Figura 10 – Aterramento por baixa resistência.

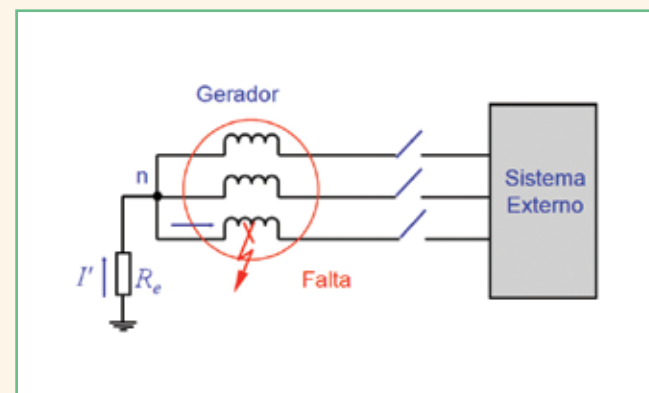


Figura 11 – A corrente de falta permanece por um período mesmo após a desconexão do gerador do sistema.

A principal desvantagem do aterramento de baixa impedância do gerador é que, para uma falta interna tal como a mostrada na Figura 11, mesmo após a abertura do dispositivo principal de desconexão da máquina, a corrente continua fluindo para a falta e por meio do enrolamento do gerador.

Isso ocorre pois, mesmo após o gerador ter sido desconectado, o campo da máquina permanece magnetizado e o rotor gira por vários segundos, induzindo tensão no enrolamento do estator. A tensão induzida no enrolamento com defeito pode ser grande o suficiente para que uma corrente significativa circule durante um período de tempo relativamente longo, até que a tensão induzida caia a zero. Dependendo do porte da máquina síncrona, a corrente se extingue na faixa de 5 s a 10 s. A exposição prolongada a uma corrente de falta pode danificar o núcleo de ferro do estator e o resistor de aterramento.

O resistor de aterramento deve ser especificado de forma a suportar esta corrente por tantos segundos quanto for necessário para que toda a tensão da máquina seja reduzida a zero.

Os requisitos de potência ativa combinados com os requisitos de isolamento podem tornar o método de aterramento com baixa-resistência relativamente caro.

**GERALDO ROCHA é engenheiro eletricitista e especialista em proteção de sistemas elétricos. É atualmente engenheiro de aplicação da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

PAULO LIMA é graduado em engenharia elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos, atua na SEL desde 2012 como engenheiro de aplicação e suporte e como professor da Universidade SEL.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em
www.osetoreletrico.com.br

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados
para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br