



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH - 10  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

## **INTERLIGAÇÃO DA GAIOLA AMORTECEDORA – TER OU NÃO TER, EIS A QUESTÃO**

**Alvaro José Noé Fogaça\***

**COPEL GERAÇÃO**

### **RESUMO**

A operação segura das unidades geradoras sempre foi uma preocupação basilar das áreas de manutenção das empresas de geração de energia elétrica. Manter em operação máquinas que corram riscos elevados de desprendimento ou rompimento de partes do rotor é um procedimento inaceitável.

Muitos dos geradores atualmente em operação no Brasil possuem a gaiola amortecedora completa, isto é, possuem conexões que interligam a gaiola amortecedora entre os pólos. Normalmente, estas conexões são flexíveis e não apresentam outra fixação ao rotor além da própria interligação às barras da gaiola que fazem parte de cada pólo. Também em muitos destes geradores é comum o aparecimento de deformações e/ou trincas nas conexões flexíveis de interligação, colocando em risco o enrolamento estatórico pela sua proximidade com as cabeças de bobina e com a superfície interna do núcleo estatórico. O rompimento de uma destas conexões pode destruir o gerador, caso atinja o enrolamento estatórico. Quando a máquina apresenta tais problemas, a solução geralmente adotada é a simples substituição das conexões que apresentam problemas, partindo-se da suposição de que a interligação da gaiola amortecedora é necessária, em função de ter sido adotada no projeto do gerador ou de ter sido especificada nas Especificações Técnicas do contrato de aquisição do equipamento.

Dentro deste quadro, este trabalho visa justamente questionar a necessidade da interligação da gaiola amortecedora. O artigo, em uma primeira etapa, verifica a influência da interligação da gaiola amortecedora entre os pólos no desempenho operacional do gerador, comparando as diferenças existentes entre um gerador com e sem as conexões de interligação. São analisadas as alterações nos parâmetros subtransitórios da máquina e sua influência em vários aspectos operacionais, tais como: sobretensões em caso de curto-circuito, torques e correntes de curto-circuito e variações na potência de amortecimento. Cada um destes aspectos é analisado, buscando-se as razões que eventualmente possam justificar a obrigatoriedade de se adotar a gaiola amortecedora completa e utilizando-se no desenvolvimento da análise parâmetros de hidrogeradores típicos do parque energético nacional (com elevado número de pólos). Com base nos resultados obtidos, são desenvolvidas várias considerações a respeito dos prós e contras em relação à interligação da gaiola amortecedora. É apresentado um exemplo prático de remoção das conexões da gaiola amortecedora em um gerador da COPEL.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Gerador, Gaiola Amortecedora, Conexão Flexível.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

As conexões flexíveis de interligação da gaiola amortecedora dos hidrogeradores, por sua proximidade em relação

\*Rua José Izidoro Biazzetto, 158 - Bloco A - CEP 81200-240 - Curitiba - PR - BRASIL  
Tel.: (041) 331-3671 - Fax: (041) 331-3666 - e-mail: alvaro.fogaca@copel.com

ao estator e em função das deformações do rotor quando da operação normal do gerador, podem vir a ser um risco para a integridade física da máquina, caso se deformem excessivamente ou se rompam e venham a atingir a superfície interna do núcleo estatórico. Conexões que apresentem trincas ou que se deformem sob os esforços de operação normal do gerador requerem constante observação e/ou substituição e, geralmente, implicam em alterações de projeto para a definitiva solução do problema. Alternativamente, pode-se cogitar a simples remoção das conexões.

A eventual remoção destas conexões, porém, deve ser precedida de um estudo a respeito das alterações que podem ocorrer no desempenho operacional dos geradores em função desta remoção.

A remoção das conexões de interligação da gaiola amortecedora afeta vários aspectos operacionais do gerador, a saber:

- A sobretensão na fase sã para curto-circuitos bifásicos;
- As correntes e torques de curto-circuito;
- A potência de amortecimento da gaiola.

Cada um destes aspectos será analisado em seguida para um hidrogerador típico de uma das grandes usinas da COPEL, o da UHE Salto Caxias (UHE SCX), com potência nominal de 345 MVA, tensão nominal de 16000 V e 80 pólos.

## 2.0 - SOBRETENSÃO NA FASE SÃ PARA CURTO-CIRCUITOS BIFÁSICOS

A sobretensão em relação ao neutro na fase sã para curto-circuitos bifásicos nos terminais do gerador (desprezando a resistência da falta) é dada por :

$$E_a = E_g \cdot \frac{2X''q}{(X''d + X''q)} \quad [\text{pu}]$$

onde:

$E_g$  = tensão na saída do gerador, no momento do curto (geralmente 1 pu) [pu]

$X''q$  = reatância subtransitória de eixo em quadratura [pu]

$X''d$  = reatância subtransitória de eixo direto [pu]

Expressando  $E_a$  em termos da relação  $X''q/X''d$ , temos:

$$E_a = E_g \cdot \frac{2(X''q/X''d)}{(1 + X''q/X''d)}$$

A reatância subtransitória de eixo em quadratura ( $X''q$ ) varia significativamente em função da gaiola amortecedora ser ou não interligada através de conexões flexíveis, aumentando com a ausência da interligação. Por sua vez, a reatância subtransitória de eixo direto não varia com a presença ou com a ausência das conexões flexíveis. Logo, sendo maior a relação  $X''q/X''d$  na ausência das conexões, maior será a sobretensão que ocorrerá na fase sã durante o início de um curto bifásico.

Considerando as características dos geradores da UHE SCX, temos:

$$X''q/X''d = 1,178 \text{ (com as conexões flexíveis);}$$

$$X''q/X''d = 1,647 \text{ (sem as conexões flexíveis);}$$

e, portanto, teremos as seguintes sobretensões na fase sã:

$$E_a = 1,082 \text{ pu (com as conexões flexíveis)}$$

$$E_a = 1,244 \text{ pu (sem as conexões flexíveis)}$$

Considerando-se porém que o regime subtransitório passa a vigorar imediatamente após o curto, deve-se corrigir o valor da tensão terminal do gerador calculando-se a tensão interna subtransitória ( $E''i$ ) correspondente à carga fornecida pelo gerador antes do curto, que, para a carga nominal, pode ser aproximadamente determinada por:

$$E''i = \left| 1 \angle 0^\circ + X''d \angle (90^\circ - \varphi) \right|$$

sendo:

$$\varphi = \text{ângulo correspondente ao fator de potência nominal (valor de } 25,842^\circ, \text{ correspondente a um } \cos(\varphi) = 0,9) \quad [\text{graus}]$$

Substituindo o valor de  $Eg$  pelo valor de  $E''i$  calculado com os valores do gerador da UHE SCX na expressão de  $Ea$  ( $X''d = 0,22 pu$ ), temos as seguintes sobretensões:

$$Ea = 1,2 pu \text{ (com as conexões flexíveis)}$$

$$Ea = 1,38 pu \text{ (sem as conexões flexíveis)}$$

Fazendo-se um gráfico da sobretensão em função da relação  $X''q / X''d$ , temos a figura 1 abaixo:

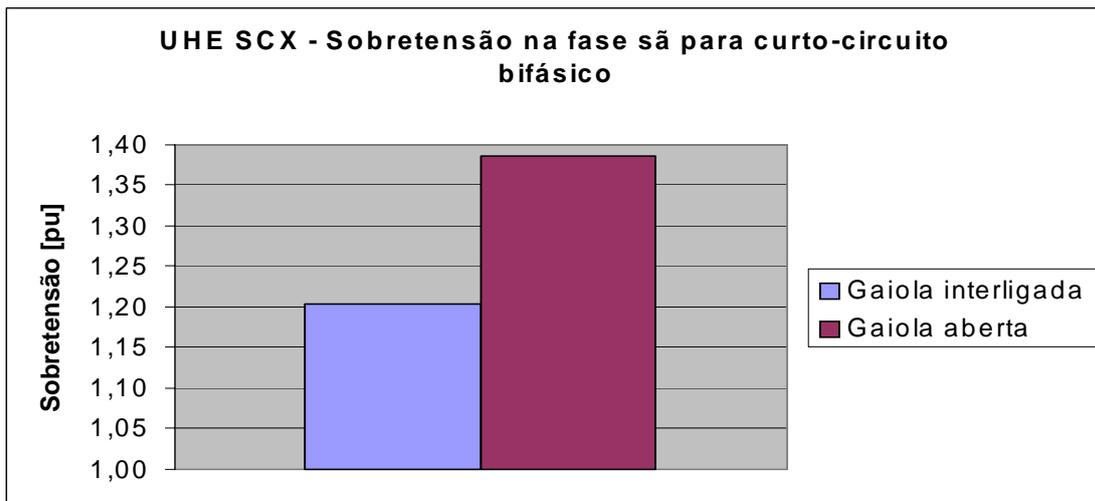


FIGURA 1 – Sobretensão na fase sã para curto-circuito bifásico

Uma sobretensão de 38%, no caso da gaiola sem a interligação entre pólos, é perfeitamente suportada pelo gerador e pelos demais equipamentos associados (trafo elevador, barramento blindado, etc.).

### 3.0 - VARIAÇÃO DA REATÂNCIA DE SEQÜÊNCIA NEGATIVA ( $X_2$ )

Como a remoção das conexões da gaiola aumenta o valor de  $X''q$ , o valor de  $X_2$ , dado por:

$$X_2 = \frac{X''d + X''q}{2}$$

também aumenta, resultando, para o gerador da UHE SCX, em:

$$X_2 = 0,238 pu \text{ (com as conexões flexíveis);}$$

$$X_2 = 0,29 \text{ pu (sem as conexões flexíveis).}$$

O aumento em  $X''q$  resulta, portanto, em menores correntes de curto-circuito monofásico e bifásico, reduzindo os esforços mecânicos sobre os enrolamentos.

#### 4.0 - VARIAÇÃO NO TORQUE MÁXIMO DE CURTO-CIRCUITO

A variação em  $X''q$  altera o torque máximo de curto-circuito que será transmitido às estruturas do gerador. Os valores correspondentes são, para curto-circuito bifásico:

- com as conexões flexíveis:
  - CBMPU = 7,92 pu (por unidade do torque nominal)
  - CBM = 29577,8 tm
- sem as conexões flexíveis:
  - CBMPU = 9,05 pu (por unidade do torque nominal)
  - CBM = 33784 tm

O aumento no torque com a remoção das conexões é de 14,22%. Considerando que o critério de dimensionamento das estruturas mecânicas é de 2/3 da tensão de escoamento do material ( $0,667\sigma_e$ ), este limite será ligeiramente ultrapassado, atingindo cerca de 3/4 da tensão de escoamento ( $0,76\sigma_e$ ), o que é perfeitamente aceitável.

#### 5.0 - VARIAÇÃO NA POTÊNCIA DE AMORTECIMENTO DA GAIOLA

Segundo Jain<sup>(1)</sup>, a potência de amortecimento ( $N_D$ ) desenvolvida pela gaiola é dada por:

$$N_D = U^2 \left[ \left( \frac{1}{X''d} - \frac{1}{X'd} \right) T''d \cdot \sin^2 \theta + \left( \frac{1}{X''q} - \frac{1}{Xq} \right) T''q \cdot \cos^2 \theta \right] \cdot s$$

sendo:

$U$  = tensão nos terminais do gerador;

$X''d$  = reatância subtransitória de eixo direto;

$X'd$  = reatância transitória de eixo direto;

$T''d$  = constante de tempo subtransitória de eixo direto, com a armadura em curto-circuito;

$\theta$  = ângulo de carga do gerador;

$X''q$  = reatância subtransitória de eixo em quadratura;

$Xq$  = reatância síncrona de eixo em quadratura;

$T''q$  = constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, com a armadura em curto-circuito;

$s$  = escorregamento.

Com a remoção das conexões de interligação da gaiola amortecedora, alteram-se os valores de  $X''q$  e de  $T''q$ , resultando nos seguintes valores de  $N_D$  para um ângulo de carga correspondente à carga nominal (23° elétricos) e um escorregamento de 1 %:

$$N_D = 110,068 \text{ kW (com as conexões flexíveis);}$$

$$N_D = 24,312 \text{ kW (sem as conexões flexíveis).}$$

Logo, com a remoção das conexões, a potência de amortecimento da gaiola cai cerca de 4,5 vezes em relação à potência de amortecimento com a gaiola interligada.

A expressão da potência de amortecimento acima indicada foi deduzida considerando algumas hipóteses, dentre as quais:

- Apenas pequenos valores de escorregamento são considerados;
- O efeito de amortecimento é causado unicamente pela gaiola amortecedora.

Considerando que os geradores da UHE SCX não sofrem bruscas variações de carga ativa e, portanto, operam com valores muito baixos de escorregamento, e que os núcleos polares e o anel magnético formam um circuito adicional de amortecimento que permite a circulação de corrente entre pólos, a redução da potência de amortecimento da gaiola acima calculada não deve introduzir alterações significativas no desempenho das unidades geradoras.

## 6.0 - EXEMPLO PRÁTICO DE REMOÇÃO DAS CONEXÕES DA GAIOLA

Os geradores da UHE Gov. Ney Braga - GNB (antiga UHE Segredo), que têm praticamente o mesmo porte dos geradores da UHE Salto Caxias, tiveram problemas de deformação excessiva das conexões flexíveis da gaiola amortecedora desde a fase de comissionamento da usina (1992). Trata-se de máquinas de 333 MVA, 13800 V, 56 pólos, cuja especificação técnica contratual previa a utilização de gaiola amortecedora completa, isto é, com as conexões flexíveis de interligação entre pólos.

O surgimento dos problemas de deformação das conexões levou à decisão, à época do comissionamento, de simplesmente remover as conexões, deixando-se as quatro unidades geradoras operando com gaiolas amortecedoras abertas. Desde então, não se tem notícia de nenhum problema ocorrido em função da remoção das conexões, quer seja no âmbito operacional das unidades geradoras em si, quer seja no âmbito da operação do sistema. Considerando as similaridades existentes com os geradores da UHE Salto Caxias em termos de reatâncias subtransitórias, os resultados dos cálculos acima descritos levarão à mesma conclusão obtida para a UHE Salto Caxias : pode-se efetivamente remover as conexões da gaiola. De fato, temos para os geradores da UHE GNB:

- Sobretenção na fase sã:
  - $Ea = 1,14$  pu (com as conexões flexíveis)
  - $Ea = 1,36$  pu (sem as conexões flexíveis)
- Variação de  $X_2$ :
  - $X_2 = 0,18$  pu (com as conexões flexíveis);
  - $X_2 = 0,23$  pu (sem as conexões flexíveis).
- Variação no torque máximo de curto-circuito:
  - com as conexões flexíveis:
    - CBMPU = 9,53 pu (por unidade do torque nominal)
    - CBM = 24055 tm
  - sem as conexões flexíveis:
    - CBMPU = 11,42 pu (por unidade do torque nominal)
    - CBM = 28797 tm (aumento de 19,7%)
- Variação na potência de amortecimento da gaiola:
  - $N_D = 502,7$  kW (com as conexões flexíveis);
  - $N_D = 119,8$  kW (sem as conexões flexíveis); redução de 4,2 vezes.

## 7.0 - CONCLUSÕES

A remoção das conexões de interligação da gaiola amortecedora afeta vários aspectos operacionais do gerador:

- A sobretenção na fase sã para curtos-circuitos bifásicos;
- As correntes e torques de curto-circuito;
- A potência de amortecimento da gaiola.

A verificação de cada um destes aspectos permite avaliar o efeito da remoção da interligação da gaiola em um gerador específico. Deve-se considerar, porém, que a determinação dos parâmetros subtransitórios da máquina síncrona é bastante difícil, embutindo erros consideráveis devido a sua própria natureza. A decisão de remover as conexões de interligação da gaiola, portanto, passa a incorporar uma certa dose de subjetividade.

De uma forma geral, pode-se concluir para os geradores de Salto Caxias que, caso se removam as conexões de interligação da gaiola amortecedora:

- A sobretensão resultante na fase sã é perfeitamente suportável pelo gerador e por todos os equipamentos associados, sendo os curtos-circuitos bifásicos bastante improváveis;
- O aumento no torque de curto-circuito não ultrapassará de forma perigosa os limites de suportabilidade mecânica das estruturas;
- As variações de carga ativa não são bruscas, de modo que a redução na potência de amortecimento da gaiola não deve introduzir alterações significativas no desempenho transitório das unidades geradoras;
- A remoção das conexões da gaiola, que são flexíveis e se encontram bastante próximas do estator, reduzirá consideravelmente o risco de danos graves à máquina.

Considerando os hidrogeradores em geral, a remoção das conexões de interligação da gaiola amortecedora provavelmente pode ser feita sem problemas nos casos em que as mesmas representam elevado risco de dano ao estator, seja por apresentarem deformações excessivas, seja por apresentarem trincas no funcionamento normal da máquina. Recomenda-se, entretanto, efetuar as verificações descritas no presente trabalho.

#### 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JAIN, G.C., Design, Operation and Testing of Synchronous Machines, Londres, Asia Publishing House, 1966.
2. ODAGLIA G., Gabbie di smorzamento e loro influenza sulle caratteristiche delle macchine sincrone, Rivista Ansaldo, Genova, n.201, 1957.
3. WAGNER, C.F., EVANS, R.D., Symmetrical components, New York, McGraw-Hill, 1933.
4. TRANSMISSION and Distribution Handbook, Pittsburg, Westinghouse Corporation.
5. JORDÃO, R. G., Máquinas síncronas, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1980.