



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -1

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**BARRAS ROEBEL VERSUS BOBINAS DE MÚLTIPLAS ESPIRAS:
IMPACTOS NA REABILITAÇÃO DE HIDROGERADORES**

Wilian Oliveira(*)

Mauro Uemori

Johnny Rocha

Cláudio Dias

ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo fornecer subsídios técnicos para escolher o tipo de enrolamento estatórico a ser utilizado na reabilitação de geradores síncronos. Isto se deve ao fato de que nas reformas de hidrogeradores é freqüentemente solicitada a substituição dos enrolamentos do estator.

Assim, o projetista de máquinas elétricas rotativas, especificamente de geradores síncronos, poderá ter no momento da concepção da máquina a flexibilidade de escolher entre o uso de barras Roebel ou bobinas de múltiplas espiras. Essa opção dependerá, além das limitações fabris, de outros parâmetros como: perdas, arranjo de mancais, empuxo magnético desbalanceado (UMP), entreferro, vibração, manutenções corretivas, confiabilidade, para citar alguns fatores relevantes.

PALAVRAS-CHAVE

Reforma, Reabilitação, Gerador, Barras Roebel, Bobinas de Múltiplas Espiras.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em consideração ao estado atual da vida útil do parque energético brasileiro, constituído em sua maioria por geração hidráulica, reabilitações em seus equipamentos e componentes são freqüentemente solicitadas, seja por manutenções preventivas, por conta da idade destes equipamentos ou por manutenções corretivas, devido a danos causados durante a operação. Nos geradores síncronos a substituição do enrolamento e núcleo magnético do estator, além da reisolação dos pólos, constituem os itens freqüentemente solicitados nas especificações técnicas de reabilitação.

Em relação a reforma do estator é possível substituir somente o enrolamento, mantendo o núcleo magnético, ou substituir o conjunto estator completo, com fornecimento de novo núcleo magnético e novo enrolamento. Dependendo do escopo, pode haver a flexibilidade de alterar o tipo de enrolamento, podendo ser de barras Roebel ou bobinas de múltiplas espiras e, também, de poder modificar as dimensões do núcleo e número de ranhuras.

A alteração do número de ranhuras, se necessária, traz outras precauções a serem observadas, como a relação entre o passo de ranhura do estator e o passo das barras de amortecimento dos pólos. Dependendo desta relação poderão surgir correntes no enrolamento amortecedor acima das originalmente estabelecidas, provocando um aumento das perdas suplementares, e ainda um possível desvio na forma de onda da tensão. Outro impacto na alteração do número de ranhuras, associado a geometria do núcleo do estator, pode ser o surgimento de forças parasitas, capaz de conduzir a vibrações prejudiciais.

(*) Av. Charles Schneider, s/n – CEP 12040-001 Taubaté, SP, – Brasil
Tel: (+55 12) 3608-3818 – Fax: (+55 12) 3608-3286 – Email: wilian-carlos.oliveira@power.alstom.com

2.0 - RUDIMENTOS TEORICOS SOBRE ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS

Nos geradores trifásicos, para que as tensões sejam balanceadas e simétricas o número de espiras do enrolamento de cada fase deve ser igual.

A tensão induzida eficaz de uma fase para o neutro é definida por [1]:

$$E_f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \phi_p \quad (1)$$

Onde:

f – frequência da rede [Hz], mantém-se constante em cada projeto.

k_{enr} – fator de enrolamento, dependente da topologia do mesmo.

N_{fase} – número de espiras em série por fase, associado a tensão nominal e fluxo magnético admissível.

ϕ_p – fluxo magnético por pólo [Wb], função do produto de k_{enr} com N_{fase} (ou do N° efetivo de espiras por fase)

O número de espiras em série por fase depende da quantidade de bobinas do enrolamento associado ao número de ranhuras, da corrente em cada ramo, relacionada com o número de circuitos paralelos, e do número de espiras que compõem cada bobina, de modo a definir:

$$N_{fase} = \frac{N_r}{m \cdot a} \cdot N_{esp} \quad (2)$$

Onde, todas são variáveis com exceção do número de fases, assim:

N_r – número de ranhuras

m – número de fases, para sistema trifásico $m = 3$

a – número de circuitos paralelos

N_{esp} – número de espiras de uma bobina

Substituindo (2) em (1), obtêm-se as variáveis que compõem a tensão induzida de uma fase.

$$E_f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_{enr} \cdot \frac{N_r}{m \cdot a} \cdot N_{esp} \cdot \phi_p \quad (3)$$

Assim, em reabilitações de geradores síncronos o produto das variáveis da equação (3) deve ser mantido. Por exemplo, se um gerador a ser reabilitado possuir saturação elevada, o natural seria atenuar o ϕ_p e acrescer o número efetivo de espiras por fase ($k_{enr} \times N_{fase}$) de modo a restabelecer a tensão nominal.

Se um estudo de reabilitação conduzir para a modificação do enrolamento do estator, de acordo com (2), se tem a possibilidade de alterar ou número de ranhuras, ou o número de espiras por bobina, ou ainda ambos; tendo o cuidado de compatibilizar o número de circuitos paralelos.

Se a opção for de alterar o número de ranhuras do núcleo, deve ser verificado o número de espiras e/ou circuitos paralelos para manter inalterado o número de espiras em série por fase, em função do fluxo magnético, e conseqüentemente a tensão terminal do gerador. Por exemplo, diminuindo o número de ranhuras, uma maneira de manter E_f seria obter um valor maior para a relação entre N_{esp} e a .

As bobinas de múltiplas espiras, como o próprio nome sugere, possuem mais de uma espira por bobina em sua concepção, enquanto que as barras do tipo Roebel possuem somente uma espira. As diferenças entre os enrolamentos com bobinas de múltiplas espiras e barras Roebel, suas vantagens e desvantagens são apresentadas a seguir.

2.1 Bobinas de Múltiplas Espiras

Nas bobinas de múltiplas espiras, cada espira é formada por um conjunto de condutores elementares (ou fios), e cada bobina, conforme necessidade, poderá ter mais de uma espira. Na figura 1 se mostra o corte da ranhura de um enrolamento de dupla camada formada por bobinas de múltiplas espiras. A bobina da figura 1 é constituída por seis espiras e cada espira é formada por quatro fios.

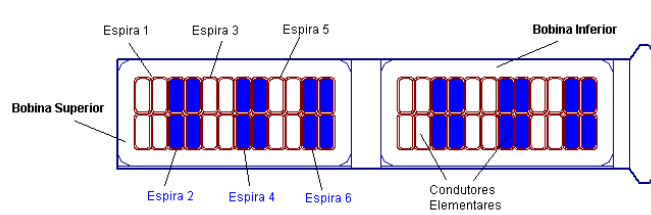


Figura 1 – Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras

Em função da possibilidade de se alocar mais espiras por bobina, há maior flexibilidade no projeto destes enrolamentos, possibilitando variar o número de ranhuras e circuitos paralelos para se obter a melhor solução.

Por ser constituída por várias espiras na mesma bobina, esta solução se torna mais sensível a surtos de tensão advindos de descargas atmosféricas ou de operações de chaveamento. Assim, quando um pulso de alta tensão é injetado para dentro do enrolamento, o mesmo acontece com velocidades muito elevadas, provocando diferenças de tensão entre espiras da mesma bobina. Motivo pelo qual a isolamento entre espiras deve ser rigorosamente definida.

Nesse contexto se apresentam duas possíveis soluções dependentes da melhor maneira de otimizar as dimensões da ranhura: a) quando a quantidade de fios por espira for menor ou igual a 6, conforme figura 1, é possível optar por uma isolamento reforçada nos condutores elementares e b) se a densidade de corrente conduzir a um grande número de fios por espira, veja figura 2, se torna mais atrativo o uso de isolamento entre espiras, mantendo a isolamento de cada fio no mínimo necessário.

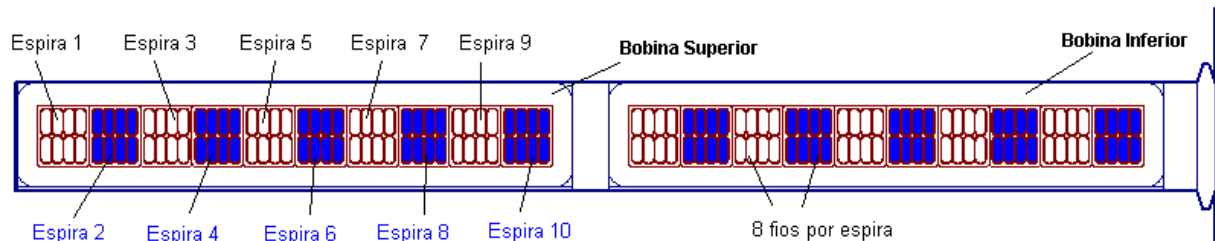


Figura 2 – Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras com isolamento complementar entre espiras

Em relação a montagem das bobinas no núcleo de médios e grandes hidrogeradores, como a bobina contempla a espira completa há de se prover flexibilidade à cabeça de bobina para facilitar sua inserção nas ranhuras. Para tal finalidade se utiliza na cabeça de bobina técnicas e/ou materiais especiais para permitir tal elasticidade. Com essa finalidade a Alstom desenvolveu uma solução denominada **Micadur Silastic®** consolidada na aplicação de uma grande quantidade de geradores instalados em vários continentes.

Uma consequência natural da geometria das bobinas esta associada aos processos de manutenção. Se por eventualidade resultar que o lado inferior da bobina, interno a ranhura, for danificado, será necessário levantar o lado superior das bobinas correspondente a um passo de bobina e, assim proceder a sua remoção. Donde se justifica a necessidade de se prover flexibilidade as cabeças deste tipo de bobina. Se tal defeito ocorrer no lado superior será suficiente cortar os condutores na região das cabeças de bobina, substituí-la por uma semibobina sobressalente, soldar fio a fio e recompor a isolamento. Sem dúvida alguma que tais tarefas deverão ser realizadas por uma equipe técnica capacitada.

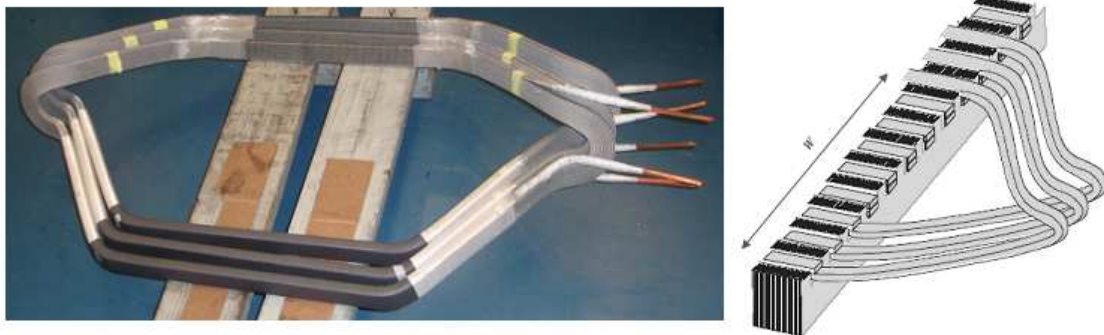


Figura 3 – Bobina de Múltiplas Espiras – espira completa e detalhe da transposição natural

2.2 Barras Roebel

Essa barra é formada por vários condutores de seção retangular originalmente transpostos de 360° de acordo com o sistema Roebel, sendo cada fio isolado independentemente, ver figura 4. Este processo de transposição distribui a corrente homogeneamente por toda a seção da barra, fazendo com que as perdas por correntes parasitas e pelo efeito Field sejam minimizadas.

Na figura 4 se ilustra como cada condutor elementar ocupa todas as posições na barra dentro do comprimento do núcleo. Por tal motivo, existe uma limitação construtiva na confecção de barras Roebel imposta pelo comprimento do núcleo eletrostático. Uma vez que para completar a transposição de 360° se faz necessário um comprimento mínimo dependente do número e dimensões do fio.

Os enrolamentos de barras Roebel são formados por somente uma espira ($N_{esp} = 1$, na equação (2)). Por isso para a formação da espira completa fazem-se conexões soldadas entre estas semi-espiras quando da inserção das barras no núcleo do estator. A figura 5 mostra as barras sendo colocadas.

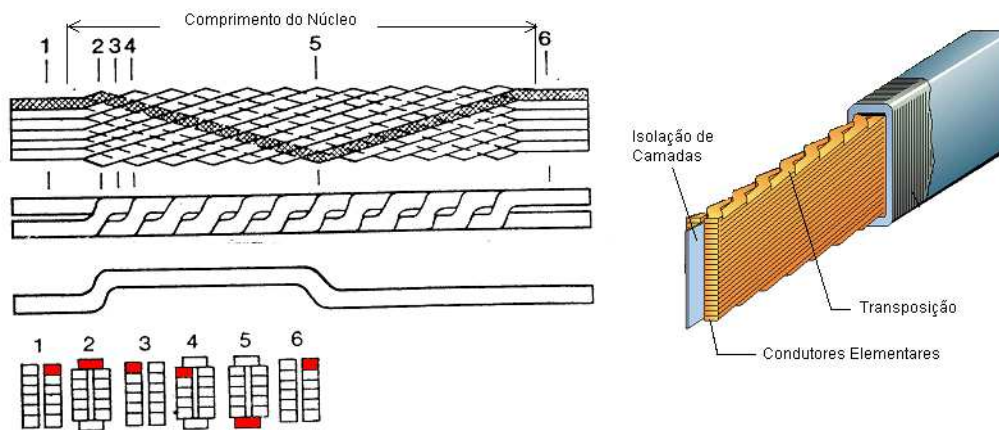


Figura 4 – Transposição Roebel 360°



Figura 5 – Barras sendo inseridas no núcleo

A escolha do número de ranhuras, em enrolamentos com barras Roebel, é mais limitada em relação às opções para enrolamentos com bobinas de múltiplas espiras. Como o número de circuitos paralelos é função de $N_{esp} = 1$ e do número de pólos do gerador, em alguns casos a definição do número de ranhuras se torna restrita.

Quando da reforma de geradores em que se requer a substituição das bobinas do enrolamento por barras, preservando o núcleo magnético do estator e conseqüentemente o número de ranhuras, é ideal que se mantenha a proporção entre o número de espiras e o número de circuitos paralelos. Desta forma, se mantém o fluxo magnético no entreferro.

Por exemplo, seja um gerador síncrono composto de bobinas de múltiplas espiras cujo enrolamento estatórico possui 8 circuitos paralelos e 4 espiras por bobina. Para usar barras Roebel, terá que haver somente uma espira, para tanto o número de caminhos paralelos deve ser modificado para 2.

Em alguns casos não é possível manter a proporção entre o número de espiras e circuitos paralelos. Por exemplo, seja o caso de um enrolamento com 3 paralelos e 4 espiras por bobina. Quando da sua substituição por barras Roebel, mantendo o número de ranhuras, se alterará o fluxo magnético no entreferro. Essa alteração no fluxo magnético deve ser acompanhada por um estudo minucioso dos demais parâmetros de desempenho do gerador, tais como: saturação, reatâncias, elevação de temperatura, torques de curto-circuito, etc. Há situações que esta modificação se torna inviável, sendo necessário uma alteração no número de ranhuras.

Já, o caminho inverso alterando o enrolamento de barras Roebel para bobinas de múltiplas espiras, encontra maiores alternativas devido a flexibilidade de alterar o número de espiras por bobina e o número de circuitos paralelos. Por outro lado, as perdas no enrolamento serão também alteradas e, por isso, devem ser verificadas.

Um aspecto relevante no uso de enrolamentos com barras Roebel é a facilidade da sua montagem e manutenção. Como são inseridas semi-espiras individualmente, se faz a formação da espira completa com auxílio de conexões soldadas. Outro fato é a facilidade na retirada da semi-espira em caso de dano, já que basta retirar a conexão soldada e soldá-la novamente.

3.0 - PERDAS EM ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS

A variação no tempo das correntes alternadas (CA) faz com que as mesmas se distribuam pelo enrolamento de forma diferente do caso com correntes contínuas (CC). Além disso, para enrolamentos formados de vários condutores, essa variação temporal num dos condutores altera a distribuição de corrente em seus vizinhos. O primeiro fenômeno é chamado de Efeito Pelicular, enquanto o segundo, Efeito de Proximidade [2]. Ambos influenciam diretamente o valor medido da resistência do enrolamento e, portanto, as perdas ôhmicas associadas.

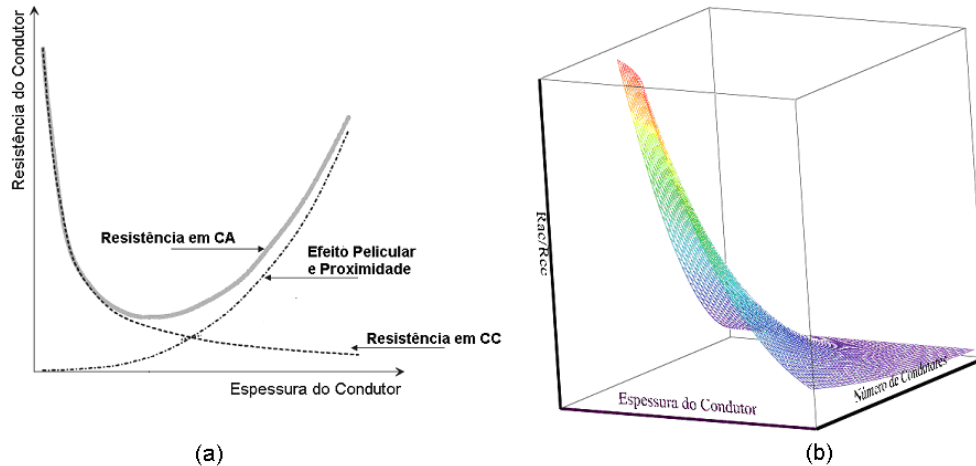


Figura 6 – (a) Resistência de um condutor em função de sua espessura
(b) Relação entre as resistências CA e CC em função da espessura e número de condutores

Um dos métodos de maior impacto na redução destas perdas é a divisão da seção de condução em condutores de seção transversal menores e a sua transposição.

Como o efeito pelicular faz com que as cargas sejam distribuídas à periferia do condutor, é possível dividi-lo em mais condutores de menor seção. Com isto se aproxima o valor das resistências CA e CC, reduzindo desta maneira as perdas ôhmicas.

A transposição faz com que a interação dos campos magnéticos dos condutores seja tal que uniformize a distribuição de corrente nestes condutores, equilibrando as densidades de corrente, diminuindo assim, as perdas devidas ao Efeito de Proximidade.

A figura 6(a) mostra a diferença entre as resistências CA e CC de um condutor em função de sua espessura. Já a figura 6(b) mostra a relação entre essas resistências de um conjunto de condutores, sendo considerado o efeito pelicular representado pela espessura do condutor e o efeito de proximidade, associado ao número de condutores.

Tanto barras quanto bobinas buscam otimizar este arranjo para minimizar as perdas no gerador. Entretanto, nas barras Roebel, as transposições são feitas totalmente dentro do comprimento do núcleo, em intervalos constantes, regularizando a densidade de corrente ao longo do comprimento da espira. Nas bobinas de múltiplas espiras, a transposição, chamada “natural”, ocorre somente na região da cabeça de bobina, ver figuras 3 e 7.

Quando comparadas, as barras fornecem excelentes resultados, pois a quantidade de transposições realizadas por cada condutor é maior que nas bobinas. Em determinados casos, no entanto, é possível conseguir resultados similares em bobinas, mesmo que para isso, conforme ilustrado na figura 7, se recorra a uma torção complementar interna de 180° numa das espiras, na região das cabeças de bobina.

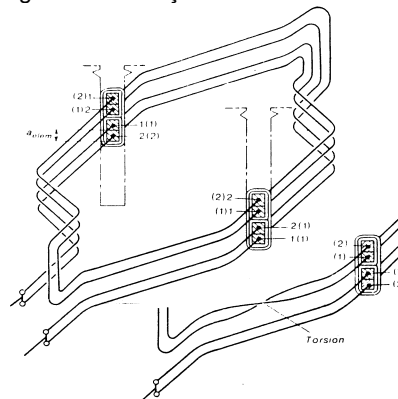


Figura 7 – Bobina de múltipla espira com transposição natural e detalhe de uma torção complementar de 180°.

4.0 - ARRANJO DE MANCAIS E EMPUXO MAGNÉTICO DESBALANCEADO

Apesar de não haver relação direta com o enrolamento, no tocante a perdas ou tensão induzida, a disposição de mancais é um critério importante para a escolha do enrolamento. Unidades geradoras com linha de eixo constituída por dois mancais de guia, um na turbina e outro no gerador, são mais susceptíveis a vibração e oscilação devido ao empuxo magnético desbalanceado.

O UMP resulta do desbalanceamento das forças de atração magnética entre estator e rotor devido à variação do entreferro. A resultante destas forças possui amplitude e direção radial que normalmente está à frente do menor entreferro. Estas forças de atração magnética podem ser determinadas pelo Tensor de Maxwell [3], sendo diretamente proporcionais a indução magnética no entreferro.

$$F = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \cdot A_p \quad (4)$$

onde

μ_0 – permeabilidade magnética do ar [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m]

B – indução magnética resultante no entreferro [T]

A_p – seção superficial correspondente a um passo polar sobre a linha do entreferro [m²]

A mitigação do UMP é conseguida com o arranjo apropriado dos circuitos paralelos, que incrementa a circulação de corrente entre estes circuitos causando um efeito restaurador. Outra maneira de aumentar essa circulação é a introdução de conexões equipotenciais.

A tensão induzida em cada espira do enrolamento estático, como verificado na equação (1) é dependente do fluxo magnético resultante sobre a linha do entreferro, sendo este fruto da interação de dois fluxos: o produzido pelos pólos do rotor, controlado pela corrente de excitação e o fluxo de reação de armadura, que depende das correntes que circulam no enrolamento do estator.

Um gerador em operação normal, mesmo sendo montado seguindo rigorosos protocolos de montagem, possui certa excentricidade do rotor em relação ao estator, podendo ser uma excentricidade estática ou dinâmica. Esta excentricidade faz com que o enrolamento do estator enxergue diferentes entreferros em relação ao rotor. Desta forma a tensão induzida nestes enrolamentos será também diferente ao redor da circunferência do gerador.

Sendo o enrolamento do estator constituído de circuitos paralelos, devido ao surgimento de diferentes voltagens entre eles, ocorrerão correntes de circulação, como mostra a figura 8. Essas correntes modificam a força magnetomotriz de reação de armadura, que por sua vez altera a indução magnética resultante no entreferro que, de acordo com (4), modifica a força de atração. Sendo por isso um importante recurso para reduzir o UMP.

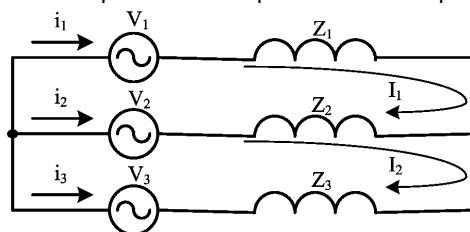


Figura 8 – Surgimento de correntes de Circulação (I_1 e I_2) entre circuitos paralelos.

Seja um gerador síncrono com características apresentadas na tabela 1, constituído de bobinas de múltiplas espiras. Para alterar seu enrolamento para barras Roebel, alterações no número de espiras e circuitos paralelos se fazem necessárias. Desta maneira, haverá impacto no empuxo magnético desbalanceado, com possível consequência na vibração do conjunto gerador, impactos na linha de eixo e rotação crítica.

Tabela 1 – Dados de um gerador síncrono

Potência nominal [kVA]	95000
Tensão nominal [V]	13800
Frequência [Hz]	60
Rotação nominal [rpm]	81,8
Número de pólos – $2p$	88
Número de ranhuras - N_r	576
Número de ranh./pólo e fase - q	$2 + \frac{2}{11}$
Confecção do Enrolamento	Bobinas
Tipo de Enrolamento	Imbricado
Número de espiras por bobina - N_{esp}	4
Número de circuitos paralelos - a	8
Arranjo de mancais	IM8025 – W8

O gerador mencionado possui 8 circuitos paralelos, que causa grande influência no valor do UMP. Isto se deve ao fato de que, com essa quantidade de circuitos paralelos, se produz uma distribuição mais homogênea de forças restauradoras provocadas pela circulação de corrente entre eles, nessa situação, o empuxo magnético é de 103 kN/mm.

Desejando alterar o enrolamento para barras Roebel, o número de espiras será 1 e, para manter o fluxo magnético no entreferro, não alterando os demais parâmetros do gerador, o número de paralelos será modificado para 2.

Desse modo, com menor circulação de corrente entre os dois circuitos paralelos, espera-se um aumento no UMP para 298 kN/mm que pode introduzir impactos negativos na operação do conjunto gerador. Experiência similar ao relatado em [4]. Deve-se notar que sem a atenuação produzida pelos paralelos o UMP seria de 410 kN/mm.

Uma solução para atenuar este impacto pode ser a inclusão de conexões equipotenciais entre os circuitos paralelos. Essa solução, adotada em um gerador da UHE Ilha Solteira, comprovou que o uso de tais conexões equipotenciais incrementa a circulação de correntes que auxiliam na redução do UMP [5] [6].

Para o gerador da tabela 1, com a adição de uma conexão equipotencial entre os dois circuitos paralelos modificados para barras Roebel, o UMP será de 144 kN/mm, valor que pode viabilizar a alteração proposta para o enrolamento do estator.

5.0 - ALTERAÇÃO NO NÚMERO DE RANHURAS

5.1 Vibração e Forças Parasitas

As vibrações e ruídos de origem eletromagnética ocorrem nos geradores síncronos quando o dobro da frequência do campo magnético resultante no gerador coincide com um dos modos de vibrar do estator [7] [8].

Nos enrolamentos a distribuição dos grupos de bobinas se repete na circunferência do estator. Esta repetição está associada ao número de ranhuras por pólo e fase, chamado q da máquina.

$$q = \frac{Z}{m \cdot 2p} = a + \frac{b}{c} = \frac{d}{c} \quad (5)$$

O número de nós de vibração de origem eletromagnética (n_e), que definirá a frequência fundamental e as sub-freqüências do campo magnético que poderá excitar um dos modos de vibração de origem mecânica, é dependente da forma de onda da força magneto-motriz do enrolamento estatórico e do número de repetições do enrolamento dependente do q da máquina conforme equação (6).

$$n_e = 2 \cdot \frac{2p}{c} \quad (6)$$

O modo de vibrar de origem mecânica em um gerador síncrono é tratado como se o estator fosse um cilindro de parede fina [9]. Assim, a frequência de vibração e o número de nós de cada modo de vibrar estão relacionados com parâmetros dimensionais como os diâmetros externos e internos, o comprimento axial e a profundidade da ranhura. O sistema de fixação do núcleo à carcaça, que modifica a rigidez do conjunto e, portanto, o seu módulo de elasticidade, desempenha um papel determinante nesse contexto.

Para evitar que ocorra uma ressonância e provável vibração e/ou ruído magnético devido à interação entre os modos de vibrar do estator, e as forças de origem eletromagnética, se deve evitar que os modos de vibrar provenientes destas duas fontes estejam próximos à dupla frequência da rede.

Por exemplo, o gerador da tabela 1 apresenta uma força de excitação eletromagnética com 16 nós, valor dependente do número de pólos e do número de ranhuras, como pode ser verificado pelas equações (5) e (6). Sabemos que o seu modo mecânico de vibrar em 120 Hz contém 22 nós, não havendo, portanto excitação entre os modos de vibrar.

Se um estudo de reabilitação desse gerador conduzir à troca do número de ranhuras, como os parâmetros dimensionais são fixos, será mantido em 22 nós o seu modo de vibrar. Desse modo, se deve evitar um número de ranhuras em que o gerador possua n_e proporcional a 22 nós, como 561 ranhuras. Este número de ranhuras resulta em $c = 8$ e $n_e = 22$ nós, que quando for inevitável a adoção desse número de ranhuras, deverá ser objeto de um estudo mais detido.

5.2 Distorção Harmônica

Em reformas em que não há interferência no rotor e se faz necessário modificar o número de ranhuras, a relação entre o passo de ranhura e o passo das barras de amortecimento se altera.

No diâmetro interno do estator se tem a região dos dentes em aço silício e sua permeabilidade magnética própria,

e se tem também a região das ranhuras, onde se pode considerar a permeabilidade magnética do ar.

Em consequência, o fluxo magnético no entreferro perceberá esta variação de permeabilidade magnética criando uma onda pulsante que é dependente do número de ranhuras no estator. A esta onda pulsante se atribui uma frequência de pulsação e sua harmônica fundamental está vinculada ao passo de ranhura.

A troca do número de ranhuras, principalmente quando conduz a $q = \text{inteiro}$ ou $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$ deve vir acompanhado de cuidados adicionais, como abordado em [10] e [11]. De maneira geral, com a alteração do número de ranhuras e, conseqüente passo de ranhura, se modifica a frequência de pulsação das harmônicas de ranhura. Com isso, pode surgir em barras amortecedoras complementares distantes de um passo polar, uma elevada circulação de corrente, pois a tensão induzida nessas barras poderá ter mesma amplitude, porém estar em oposição de fase, podendo causar aquecimento e um possível aumento nas perdas totais do gerador.

Além disso, o fluxo estacionário pulsante gerado entre estas barras complementares poderá ter condições de se manifestar sobre o fluxo principal, sobrepondo o seu comportamento harmônico ao da tensão nos terminais do gerador, causando distorção harmônica acima das permissíveis por norma.

6.0 - CONCLUSÃO

Tanto enrolamentos constituídos de bobinas de múltiplas espiras quanto de barras Roebel possuem particularidades e seus impactos no desempenho do gerador são diferentes. Por isso, requer uma reflexão cuidadosa antes de optar por uma ou outra solução que aponte para o melhor compromisso técnico-econômico.

As bobinas de múltiplas espiras apresentam maior flexibilidade na definição do número de espiras por fase, abrindo mais opções para a escolha do número de ranhuras e circuitos paralelos para atingir a tensão terminal do gerador. Por outro lado, apresenta um processo de manutenção mais elaborado. Todavia, quando se compara com as barras Roebel, embora em casos particulares possa se atingir mesmo nível de fator de perdas CA para CC, em geral as barras apresentarão um valor menor desse fator.

Enrolamentos concebidos com barras Roebel apresentam processos de manutenção mais simplificados. Em complemento, devido ao fato de formarem bobinas de uma única espira não há como ocorrer curtos-circuitos entre as mesmas, simplificando, assim, o sistema de proteção do enrolamento do gerador.

Apesar dos enrolamentos com barras Roebel possuírem na sua concepção menos alternativas para a definição do número de ranhuras e circuitos paralelos, os estudos apresentados em [5] mostram que é possível reduzir os níveis de UMP com o uso de conexões equipotenciais, permitindo a operação do grupo de forma confiável e segura.

De maneira geral, quando se trata de reformas de geradores com dois mancais de guia, sempre é viável o uso de barras Roebel independente do número e arranjo de circuitos paralelos. Caso o enrolamento seja série, ou seja, $a = 1$ e o gerador possuir somente um mancal de guia, deve ser considerado um estudo mais detalhado dos impactos do UMP no desempenho dinâmico do gerador. Tal situação pode ser atenuada, se junto desse arranjo de mancais, se dispor de um enrolamento do estator com mais de um circuito paralelo, ou se forem introduzidas ligações equipotências. As efetividades dessas aplicações se encontram relatadas em [4] e [6].

As observações aqui apresentadas também são válidas para a concepção de projetos de novos geradores.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FITZGERALD, A. E: Máquinas Elétricas - 6ª ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [2] PYRHÖNEN, J; et ali; Design of rotating electrical machines, Finland, 2008 – John Wiley & Sons Ltd.
- [3] BASTOS, J.P.A.: Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-estática. Florianópolis, Ed UFSC, 2004.
- [4] GONÇALVES, C. et ali: Substituição do Estator da Terceira Unidade da UHE Coaracy Nunes com Base nos Resultados do sistema de Monitoramento Dinâmico. IV ENAM, Curitiba – PR, Brasil, 2010.
- [5] OLIVEIRA, Wilian; Redução do “Empuxo Magnético” Desbalanceado em Geradores Síncronos. Florianópolis, 2008. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- [6] OLIVEIRA, Wilian; et ali; Redução do “Empuxo Magnético” Desbalanceado do Rotor da Unidade Geradora 11 da UHE Ilha Solteira. XX SNPTEE, Recife, Brasil, 2009.
- [7] ROCHA E., J. Johnny; ‘Una Metodología para la Identificación y Análisis de Fuerzas Parásitas de Origen Electromagnética Actuantes en Estatores de Máquinas Síncronas’. X Erlac, Puerto Iguazú, Argentina, 2003.
- [8] DIAS, Manoel et ali, Vibração no Núcleo Estático do Gerador da UG-05 da UHE Porto Primavera. IX Encontro Regional Latino-Americano do Cigré. Foz do Iguaçu, PR – Brasil, 2001.
- [9] TIMOSHENKO, S.: Vibration Problems in Engineering, Second Edition, New York, 1937.
- [10] ROCHA E., J. Johnny. Uma Análise dos Efeitos do Enrolamento Amortecedor sobre a Força Eletromotriz de Geradores Síncronos de Pólos Salientes. São Paulo, 1996. Tese – Escola Politécnica, USP.
- [11] ROCHA E.; UEMORI M.: A influência da 2ª Harmônica de Ranhura sobre a Forma de Onda da Tensão em Geradores Síncronos de Pólos Salientes.