



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

A INFLUÊNCIA DA 2ª HARMÔNICA DE RANHURA SOBRE A FORMA DE ONDA DA TENSÃO EM GERADORES SÍNCRONOS DE PÓLOS SALIENTES

J. Johnny Rocha E. (*)

Mauro K. I. Uemori

ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL LTDA.

RESUMO

Não foram raras as ocasiões em que causou surpresa a inesperada forma de onda da tensão. Essas surpresas ocorreram, tanto em máquinas com q inteiro corrigidas, como em algumas dotadas de $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$ que, sabidamente, deveriam assegurar uma boa forma de onda.

Neste IT se apresentará uma explicação técnica mostrando que a segunda harmônica de ranhura é a principal responsável pelo efeito de distorcer a forma de onda da tensão em tais circunstâncias.

Para corroborar a validade do modelo apresentado se confrontarão valores calculados com valores medidos, propondo sugestões de medidas cautelares para evitar as surpresas relatadas.

PALAVRAS-CHAVE

Enrolamento amortecedor; forma de onda; gerador síncrono; harmônica de ranhura; TIF.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em oportunidade anterior, no XIV SNPTEE, no IT "Auxílio ao projeto de geradores síncronos de pólos salientes: uma ferramenta analítica que permite considerar os efeitos do enrolamento amortecedor" (1) foi apresentada a explicação de como o enrolamento amortecedor pode distorcer a forma de onda da tensão induzida nos terminais de um gerador síncrono de pólos salientes, quando o projeto do gerador contempla um número inteiro de ranhuras por pólo e por fase ($q = \text{inteiro}$). Nesse mesmo artigo foi exposto o mecanismo para corrigir esse efeito indesejável e, ainda, foi ilustrado porque geradores com $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$ não requerem nenhuma ação corretiva.

Pois bem, apesar de todo esse conhecimento cautelar, não foram raras as ocasiões em que projetistas de diferentes empresas se surpreenderam com uma inesperada forma de onda de tensão. Essas surpresas ocorreram tanto em máquinas com q inteiro corrigidas, como em algumas dotadas de $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$ que, sabidamente, deveriam assegurar uma boa forma de onda. Quando se fala em máquinas com q inteiro corrigidas, se quer dizer que um conjunto do enrolamento amortecedor estava aproximado ou afastado do conjunto vizinho em meio passo de ranhura.

Assim, neste IT se apresentará uma explicação técnica para essa manifestação indesejável e se mostrará que a segunda harmônica da permeância específica de ranhura é a principal responsável pelo efeito colateral secundário de distorcer a forma de onda da tensão induzida nos terminais do gerador.

Para essa finalidade, se apresentará o resultado de uma modelagem analítica da permeância específica de ranhura baseada na técnica das transformações conforme. Tal modelagem, associada às ferramentas analíticas apresentadas em (1), fornece sensibilidade suficiente para observar, inclusive, o efeito de harmônicas superiores, se as mesmas forem de amplitude notável.

(*) Av. Charles Schneider, s/nr. – Depto de Anteprojeto – CEP 12040 001 Taubaté – SP – Brasil
(+55 12) 3608 3625 – e-mail: johnny.rocha@power.alstom.com

Para corroborar a validade do modelo apresentado se confrontarão valores calculados com valores medidos. E, para finalizar o IT, se oferecerão sugestões de medidas cautelares que visam evitar as surpresas relatadas.

2.0 - O CAMPO MAGNÉTICO SOBRE A LINHA DO ENTREFERRO

Neste IT, por campo magnético se denomina à distribuição espacial da densidade de linhas de fluxo magnético observadas, sempre, sobre a linha do entreferro médio.

A modelagem analítica do campo magnético associada a geradores síncronos de pólos salientes, tradicionalmente, é tratada com muita dificuldade, uma vez que requer um compromisso entre uma elevada habilidade algébrica e uma notável experiência em cálculo elétrico de geradores. Pois requer um comprometimento entre o domínio das técnicas matemáticas envolvendo transformações conforme com um certo grau de empirismo.

O advento dos processos numéricos, associados à tecnologia digital, propiciou o domínio do método dos elementos finitos. Quando aplicado ao âmbito das máquinas elétricas se ampliaram os horizontes e conhecimentos até então intuitivos puderam ser corroborados ou corrigidos. E, quando aplicado ao estudo dos fenômenos fundamentais, permitiu que o seu equacionamento fosse consolidado.

Contudo, o método dos elementos finitos requer que, para cada aplicação, seja elaborada uma nova geometria representando a nova situação, mesmo que a geometria básica se preserve e apenas se alterem as suas dimensões. Tal requisito, num ambiente de concepção de geradores síncronos, por si só de alta performance, limitaria a velocidade de resposta imposta pelo mercado.

Assim, as empresas fabricantes de geradores devem basear seus cálculos de dimensionamento em processos analíticos de alta confiabilidade. Nesse contexto, o método dos elementos finitos tem permitido refinar os modelos matemáticos e, o que é mais importante, ampliar o entendimento dos fenômenos intrínsecos ao projeto de máquinas elétricas rotativas.

2.1 A representação do campo magnético sem a influência das ranhuras do estator

Em trabalho inicial (2) foi proposta uma metodologia para representar o campo magnético por meio de séries de Fourier. Desde então, se passaram mais de dez anos e é natural que tenham sido introduzidas melhorias na modelagem proposta. A própria função trassínio foi aperfeiçoada de forma a representar melhor a forma de onda do campo magnético, permitindo, para sapatas polares de raio único, uma versatilidade maior. Assim, é possível tratar, com um mesmo modelo matemático, relações de entreferro mínimo $-\delta_m-$ e entreferro máximo $-\delta_M-$ que podem variar desde o entreferro constante ($\delta_M/\delta_m = 1,0$) até valores próximos de 2,0. Isso se fez necessário com o propósito de possibilitar o projeto de sapatas polares capazes de assegurar uma forma senoidal de campo magnético, ou que, ao menos, sigam de perto a sua harmônica fundamental.

Como pode ser apreciado na equação (1), a representação básica da função trassínio não foi alterada. O que houve foi melhoria na síntese da própria função.

$$\beta(x) = \beta_0 \cdot \sum_h A \beta_h \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2 \cdot p}{D_\delta} \cdot x\right) \quad \text{com } h = 1, 3, 5, \dots \quad (1)$$

Onde, além do número de par de pólos (p), diâmetro da linha do entreferro D_δ , relação de entreferros (δ_M/δ_m) requer seja conhecido o $-\alpha_p-$ fator de cobertura polar (relação entre o passo polar $-\tau_p-$ e a largura da sapata do pólo $-B_p$). Donde, com apoio da função trassínio é possível obter resultados tão bons como os mostrados na figura 1 que mostra uma comparação dos resultados obtidos aplicando o método dos elementos finitos e os obtidos com ajuda da (1).

Ainda, considerando que o fator de cobertura polar, na prática, pode variar de 0.65 até valores próximos de 0.8, durante o processo de melhoria da função trassínio, se identificou que a curvatura ideal pode ser expressa em função do fator de cobertura polar, como descrito pela equação (2)

$$\Delta \delta_{ideal} = \frac{\delta_M}{\delta_m} = \frac{0,84}{\alpha_p} \cdot \left[2 - \cos\left(\alpha_p \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

A figura 2 ilustra o resultado da função trassínio aplicado a duas soluções possíveis para um mesmo projeto. Em (a) se mostra uma solução de curvatura mínima e suficiente para assegurar uma forma de onda de tensão

induzida nos terminais do gerador que atenda às solicitações de norma ($\Delta\delta = 1.35$ e $\alpha_p = 0.75$). Já em (b) se apresenta o resultado do mesmo pólo, porém com uma curvatura ideal ($\Delta\delta_{ideal} = 1.81238$ e $\alpha_p = 0.75$).

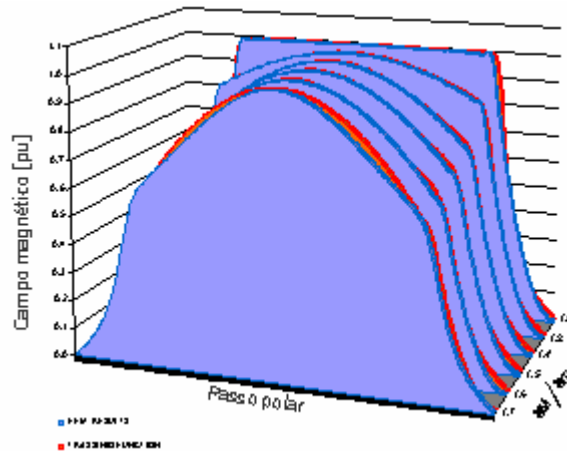


Figura 1 – Resultados da função trassínio para diferentes curvaturas da sapata polar.

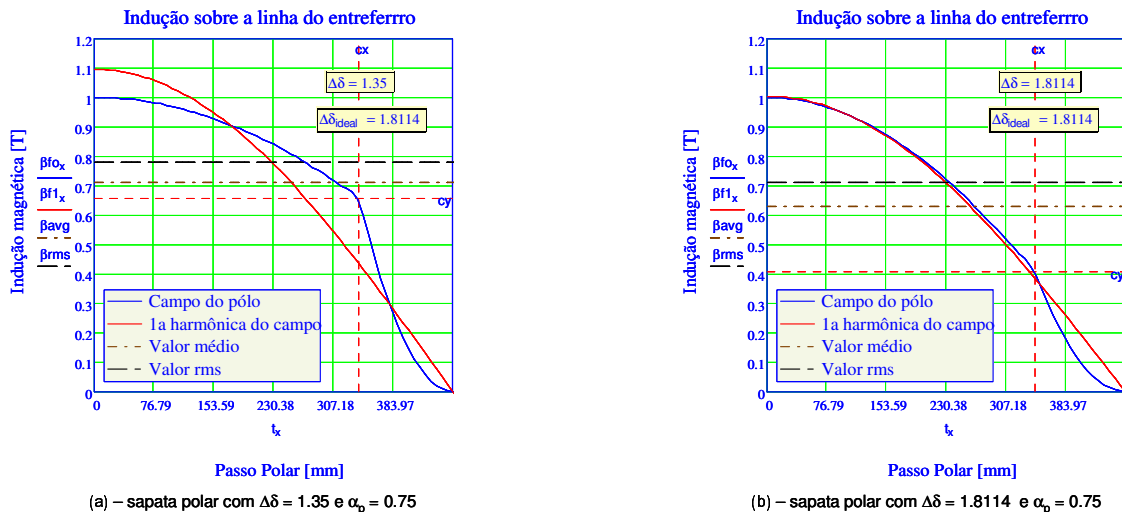


Figura 2 – Resultados da função trassínio para mesma sapata polar e curvaturas ideal e aceitável

2.2 A influência das ranhuras sobre a forma de onda do campo magnético.

O fato de assumir que o modelo proposto tem validade sobre a linha do entreferro médio permite considerar um meio livre de saturação e, portanto, o teorema da superposição poderá ser aplicado. Esta condição permite que a influência das ranhuras possa ser modelada de maneira independente.

Se, no item anterior era considerado um estator totalmente liso, onde a permeância específica do entreferro fosse apenas perturbada pela curvatura da sapata e pela região interpolar, agora se poderá considerar um rotor perfeitamente cilíndrico e um estator ranhurado. Esta última geometria tem sido amplamente estudada por autores clássicos como F. W. Carter (3), W. J. Gibbs (4) e E. M. Freeman (5 e 6).

Na época em que se desenvolveu o trabalho apresentado em (2), nos deixamos seduzir pela forma ágil de se calcular as harmônicas de ranhura segundo o procedimento proposto em (6). Nesse trabalho, Freeman apresenta uma série de curvas (extrapolações de algumas soluções utilizando o método da transformação conforme) e oferece ao leitor um método ágil de se obter a forma de onda das ondulações impostas pela relutância das ranhuras.

Como muitos métodos genéricos, esse também conduz a soluções aproximadas que permitem ter uma boa noção qualitativa do fenômeno. Porém, quando submetido a um universo de casos mais extenso se mostrou pouco sensível, culminando com soluções que amenizavam a intensidade da resposta esperada. Essa característica era mais acentuada com relação às harmônicas superiores. Todavia, a bem da justiça, foi em base a esse método (6) que se observou a importância da segunda harmônica de ranhura.

Assim, foram nos trabalhos de Gibbs (4) e Freeman (5) que se encontrou uma solução satisfatória e que conduz a respostas robustas, ainda que um pouco conservativas. O livro de Gibbs e o artigo técnico de Freeman, ambos em base a transformações conforme, diferem na maneira de como retornar ao plano x-y, porém conduzem a um mesmo resultado. Em consequência natural aos estudos de (4) e (5) os autores também se dispuseram a buscar uma solução aplicando transformação conforme e o resultado foi muito coerente com a dos autores de referência. Todas as três soluções assumem a forma da equação (3) e se encontram ilustradas na figura 3,

$$b(x) = \beta_0 \cdot \left\{ 1 + \sum_k \rho_k \cdot \cos \left(k \cdot \frac{2 \cdot N_r}{D_\delta} \cdot x \right) \right\} \quad \text{onde } k = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (3)$$

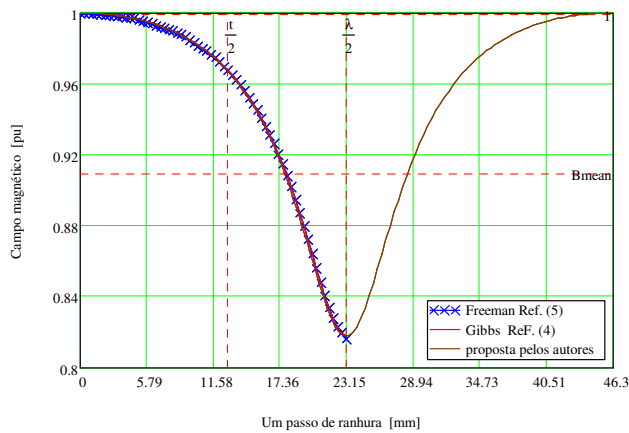


Figura 3 – Soluções para o campo magnético na região de um passo de ranhura.

Resulta bastante interessante comparar as soluções propostas por Freeman em (5) e (6). Para essa finalidade, na figura 4, se apresentam as soluções utilizando os métodos das referências (5) e (6) do mesmo autor aplicadas a uma mesma geometria.

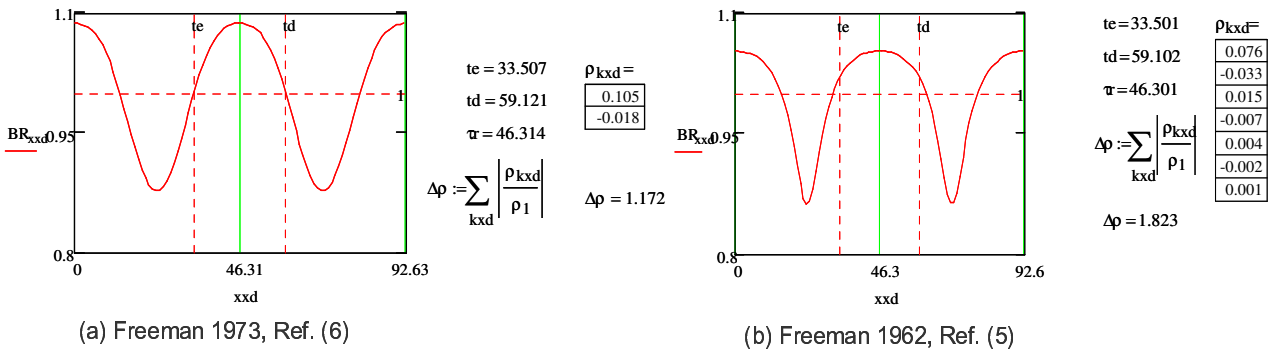


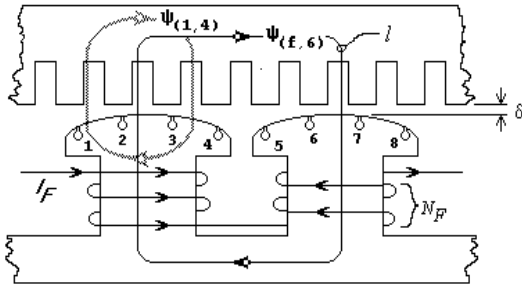
Figura 4 – Campo magnético na região da ranhura segundo os métodos propostos por Freeman.

Tem-se observado que, a exemplo do que ocorre na figura 4(a), a primeira harmônica resulta mais intensa em detrimento das harmônicas superiores. Além de que o método da referência (6) dificulta a obtenção de harmônicas superiores, em alguns casos, como o ilustrado, não tem como se obter a terceira harmônica. Com tudo isso, o resultado representará sempre uma distribuição de linhas de fluxo com um espraio menos acentuado. Já, a solução baseada na transformação conforme permite a obtenção do universo completo das harmônicas de ranhura, o que conduz a uma representação mais fiel da distribuição das linhas de fluxo. Por esse motivo, foi assumido o método da referência (5) como o método base para a condução dos estudos.

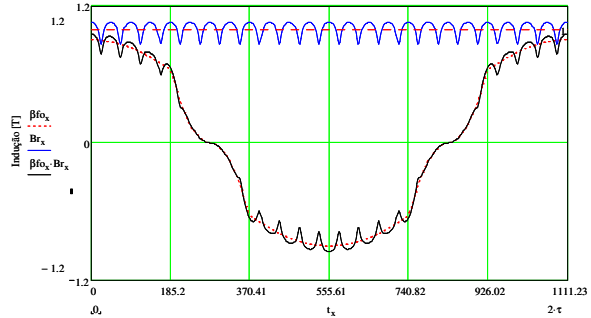
2.3 O campo magnético afetado pela relutância do rotor e pelas ranhuras do estator.

O efeito de saturação do circuito magnético é bastante mitigado sobre a linha média do entreferro, o que nos permite presumir que se o problema for tratado como linear não se estará incorrendo num erro considerável. Assim, o tratamento de uma geometria complexa como o da figura 5(a), pode ser abordado utilizando o método de modulação em amplitude. Onde a equação (3) modulará a amplitude de (1), como se mostra em (4). O resultado da modulação das harmônicas de ranhura sobre a amplitude do campo do pólo descrito pela função trassínio se encontra ilustrado na figura 5(b).

$$\beta_r(x) = \beta(x) \cdot \frac{b(x)}{\beta_0} = \beta_0 \cdot \left\{ 1 + \sum_k \rho_k \cdot \cos\left(k \cdot \frac{2 \cdot N_r}{D_\delta} \cdot x\right) \right\} \cdot \sum_h A \beta_h \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2 \cdot p}{D_\delta} \cdot x\right) \quad (4)$$



(a) Geometria para modelagem completa



(b) Campo magnético resultante

Figura 5 – Modelo completo para a obtenção do campo magnético resultante.

É importante salientar que a equação (4) descreve a atividade magnética vista desde um ponto de referência no estator. Em trabalho anterior (2), se mostra que a equação (4), quando o rotor está em movimento, conduz a uma componente (linha pontilhada vermelha na figura 5(b)) que se move junto com os pólos e a um segundo componente modulante que se comporta como uma onda estacionária pulsante (estacionária com relação aos pólos e pulsante sobre si mesma).

O primeiro componente, por mover-se junto com os pólos, será incapaz de induzir tensão nas barras do enrolamento amortecedor. Já a estacionária pulsante estampará a sua imagem na forma de tensão em cada barra do enrolamento amortecedor. Logo, sobre essa onda estacionária pulsante é que se deve concentrar a nossa atenção.

Antes de continuar convém levantar algumas observações relativas à concepção de um enrolamento estático trifásico. Independente do enrolamento ser formado por bobinas de múltiplas espiras ou por barras Roebel, o elemento decisivo é o número de ranhuras. Assim, se define a seguinte relação conhecida como o “q” da máquina:

$$q = \frac{N_s}{3 \cdot 2 \cdot p} = \frac{d}{c} = a \frac{b}{c} \quad (5)$$

Donde, q resulta ser igual ao número de ranhuras por pólo e por fase, N_s é o número de ranhuras do estator e p é o número de par de pólos; q pode resultar em um número inteiro ou fracionário. Sendo que há uma predominância no uso do q fracionário devido ao seu impacto positivo na forma de onda da tensão induzida.

Todavia, de (5) se pode obter mais informações se a rerepresentarmos da seguinte maneira:

$$\frac{N_s}{p} = 6 \cdot q = 6 \cdot \frac{d}{c} = \frac{Dp}{Cp} \quad (6)$$

Então, quando a fração que relaciona o número de ranhuras do estator com o número de par de pólos é reduzida aos seus mínimos fatores, ainda poderá resultar num número inteiro ou num fracionário. Contudo, as seguintes mensagens podem ser obtidas:

- O esquema do enrolamento do estator se repetirá a cada Dp ranhuras;
- A harmônica fundamental da reação de armadura ocupará um período igual ao determinado por Cp pares de pólos. Ou seja, um par de pólos do rotor corresponderá a uma componente harmônica da reação da armadura.

- Donde vem que, somente quando q é inteiro, o período da reação da armadura coincide com um par de pólos, sendo um semi-período idêntico ao outro apenas com o sinal inverso. Ou seja, coincide com o comportamento de um par de pólos.

Com este pequeno arsenal de informações será mais fácil entender o processo da tensão induzida nas barras do enrolamento amortecedor.

2.4 A tensão induzida no enrolamento amortecedor com o gerador sem carga.

A experiência tem mostrado não haver problemas de distorção da forma de onda da tensão nos terminais do gerador quando o enrolamento do estator conduz a um q fracionário com $c \geq 4$. A explicação técnica para tal está no fato de que barras amortecedoras “complementares” se encontram separadas de C_p pólos e, com isso, a sua reação é amplamente mitigada pela presença e ação dos C_p pólos que separam os lados da espira formada pelas barras complementares. O conceito de barras complementares ficará mais claro depois de abordar os casos com $c = 1$ e $c = 2$, ou seja, $q = \text{inteiro}$ e $q = \text{intero} + 1/2$.

2.4.1 A tensão induzida no enrolamento amortecedor quando o $q = \text{inteiro}$.

Nessa situação se tem que $c = 1$ logo $C_p = 1$, ou seja a forma de onda se repete a cada par de pólos, sendo o semi-período positivo idêntico em forma ao semi-período negativo. Mais ainda, as barras complementares estarão separadas por um passo polar (um semi-período). Assim, uma barra estará sob a ação de uma crista positiva e a sua complementar sob ação de uma crista negativa e, como estão fechadas pelos anéis de curto, formam uma espira cujos lados foram induzidos por tensões que se complementam em série.

A figura 6 mostra a componente pulsante estacionária a que fizemos referência no item anterior e que é a componente ativa da equação (4).

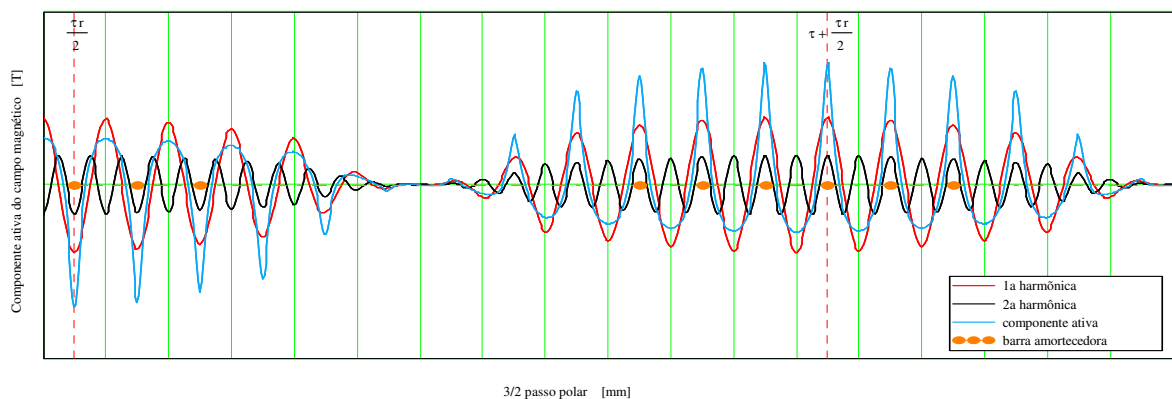


Figura 6 – Componente ativa da equação (4) para um gerador com $q = 4$

A primeira constatação que se pode obter da figura 6 é confirmar a sentença que diz: “em geradores síncronos, o passo de ranhura do enrolamento amortecedor deve ser igual ao passo de ranhura do estator, admitindo uma variação de $\pm 10\%$ ”. Isso fica óbvio pois barras contíguas, engastadas segundo essa regra, estarão percebendo quase a mesma indução magnética. Portanto, sofrerão tensões induzidas de mesma fase, mesmo sentido e quase mesma amplitude e, desse modo, fica atenuada ao máximo a possibilidade de haver circulação de corrente entre barras contíguas.

Agora, quando observamos a crista do campo magnético de uma barra posicionada a um passo polar de uma outra, que a chamaremos de barra complementar, constatamos que a mesma tem sentido oposto, embora tenha mesma magnitude. Portanto, a circulação de corrente entre essas barras complementares se potencializa ao máximo, pois as tensões induzidas estarão formando um circuito série.

Tal constatação também é verdadeira quando se observa a primeira e segunda harmônicas. Porém, uma observação mais cuidadosa poderá nos levar a concluir que, se as barras complementares estiverem aproximadas ou afastadas de $1/2$ passo de ranhura, então a tensão induzida pela 1ª harmônica, que antes estava diretamente em contra fase, favorecendo o circuito série, agora estarão em fase. Como se fossem duas fontes em paralelo, sem ocasionar circulação de corrente entre as barras complementares. Esta é a situação que se trata de ilustrar na figura 7. O interessante desse fato intuitivo é que o mesmo pode ser verificado analiticamente na referência (2).

O compromisso da situação está no fato de que se ao deslocarmos o conjunto das barras amortecedoras do pólo contíguo mitigamos o efeito da 1ª harmônica de ranhura, o mesmo não acontece com a 2ª harmônica, cujo efeito é potencializado ao máximo. Donde se depreende a necessidade de prestar muita atenção para essa 2ª harmônica. Alias, objeto deste IT.

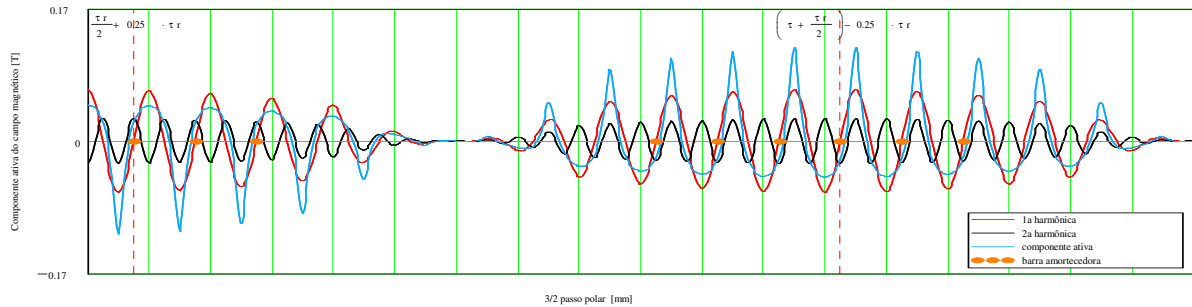


Figura 7 – Componente ativa associada a enrolamento amortecedor com aproximação de $\frac{1}{2}$ passo de ranhura

Assim, todo o esforço feito para modelar adequadamente o efeito das ranhuras sobre o campo magnético, agora encontra sua justificativa. Esta situação não é privilégio dos geradores com q inteiro, mas também é compartilhado com aqueles com $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$, como veremos a seguir.

2.4.2 A tensão induzida no enrolamento amortecedor quando o $q = \text{inteiro} + 1/2$.

Neste caso, $c = 2$ que conduz a $C_p = 1$, ou seja, as barras complementares estarão também separadas por apenas um passo polar; entretanto, conforme a figura 8, acontece algo muito relevante: As cristas da 1ª harmônica que pairam sobre as barras complementares estão com mesma fase e mesma amplitude, fazendo com que o efeito delas se anule naturalmente. Por isso, se apregoa na literatura clássica sobre as vantagens de se optar por enrolamentos com $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$.

Entretanto, o que aparentemente não tinha sido observado é o efeito nocivo que pode ser provocado pela 2ª harmônica. Se ela não for controlada, ainda na época do cálculo elétrico, os seus efeitos poderão comprometer a forma de onda da tensão nos terminais do gerador. Como pode ser observado, as cristas da 2ª harmônica se encontram em perfeita contra-fase, maximizando a corrente de circulação e, assim, potencializando a possibilidade de poluir a forma de onda da tensão final a ser submetida aos critérios de norma.

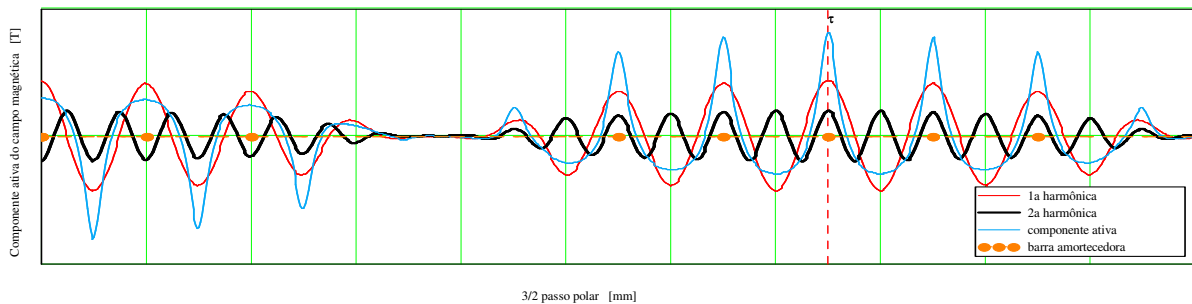


Figura 8 – componente ativa de um gerador com $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$

2.5 Uma regra geral para prever os efeitos das harmônicas de ranhura.

Não se deve confundir a tensão induzida pelas harmônicas de ranhura, com a lei com que o 1º harmônico do fator de enrolamento do estator se replica. Embora sejam conceitos diferentes, por terem o mesmo comportamento quando o $q = \text{inteiro}$, assumiram também o nome de *harmônica de ranhura*. Por esse motivo, tomando como base a referência (2) se apresenta a seguir a regra geral que permite prever a presença do efeito das harmônicas de ranhura na forma final da tensão medida nos terminais sem carga de um gerador síncrono qualquer.

$$hr(h,k) = -(k \cdot D_p \pm h \cdot C_p) \quad (7)$$

3.0 - APLICAÇÃO A ALGUNS CASOS PRÁTICOS

Na tabela 1, todos os casos de $q = \text{inteiro}$ tiveram os conjuntos de enrolamentos amortecedores corrigidos exceto o caso 1 que foi mantido sem corrigir. Assim, os resultados apresentados são aplicações diretas do método apresentado em (2) melhorado com o procedimento da referência (5).

CASO	MVA	q			k =1 h=1 (1ª Harm. de ranhura)			k =2 h=1 (2ª Harm. de ranhura)			TIF		
		a	b	c	hr	calculado	medido	hr	calculado	medido		calculado	medido
1	15	4	0	1	23	0,0177	0,0110	47	0,0176	0,0	Balanceado	280,8	280,9
					25	0,0104	0,0400	49	0,0171	0,0025	Residual	25,3	78,5
2	150	4	0	1	23	0,0055	0,0009	47	0,0012	0,0006	Balanceado	41,5	20,31
					25	0,0014	0,0026	49	0,0016	0,0005	Residual	26,3	5,07
3	16,7	4	0	1	23	0,0053	0,0010	47	0,0082	0,0080	Balanceado	120,3	89,9
					25	0,010	0,0021	49	0,0079	0,0011	Residual	27,2	23,0
4	33	5	0	1	29	0,0050	0,001	59	0,0043	0,0	Balanceado	83,0	38,8
					31	0,0055	0,001	61	0,0065	0,001	Residual	13,9	28,7
5	19.2	3	0	1	17	0,0059	0,0004	35	0,0094	0,0072	Balanceado	159,0	98,3
					19	0,0019	0,0027	37	0,0096	0,0072	Residual	47,7	23,1
6	34	2	1	2	14	0,0005		29	0,0058		Balanceado	98,3	83,0
					16	0,0005		31	0,0093		Residual	27,3	25,0

Tabela 1 – Alguns casos práticos para efeitos de comparação.

Constatou-se que quando as medições de campo foram realizadas com o cuidado necessário os valores medidos e calculados se correlacionam relativamente bem. A principal dificuldade foi localizar casos devidamente documentados com medidas confiáveis, veja o caso 4, pelos resultados medidos se pode imaginar que, muito provavelmente, houve algum tipo de problema.

4.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Quando comparados os trabalhos de Freeman (5) e (6), se constatou que a referência (5) (bem como a (4)) conduz a resultados robustos e conservativos. Desse modo, uma falta de cuidado com a 2ª harmônica de ranhura durante a fase do cálculo elétrico pode resultar em valores elevados de TIF (fator de influência telefônica), tanto em máquinas com $q = \text{inteiro corrigido}$, como naqueles com $q = \text{inteiro} + \frac{1}{2}$.

O TIF é altamente influenciado pela permeância específica da ranhura. Desse modo, a abertura de ranhura quando relacionada ao entreferro mínimo deve ser criteriosamente administrada. Em geral, para os casos de q inteiro ou meio requer um entreferro da ordem de 2% do passo polar como mínimo.

Foram observados diferentes práticas para medir o TIF, algumas delas desnecessariamente conservativas. Sugere-se uma prática comum e disciplina no armazenamento dos dados.

Diante da crescente demanda por geradores de baixa rotação, conseqüência natural dos aproveitamentos de baixa queda, o presente IT pode também contribuir para o projeto de estatores sem risco de ter um dos seus modos de vibrar excitados, uma vez que geradores com $q = \text{inteiro}$ ou $q = \text{inteiro} + 1/2$ apresentam forças de excitação com modos de vibrar relativamente baixos, quando comparados aos modos naturais de vibrar do estator. Nesse contexto, é imprescindível o controle da 2ª harmônica de ranhura para evitar surpresas com o TIF

É a esperança dos autores ter contribuído para a compreensão e domínio das técnicas que conduzam a uma previsão segura da forma de onda nos terminais do gerador. Assim mesmo, a contribuição dos colegas, com casos particulares de formas de onda destorcidas nos será de grande ajuda e antecipadamente agradecemos.

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) ROCHA E., J. JOHNNY; UEMORI; MAURO K. I. e PENTEADO Jr., ADERBAL de A. Auxílio a projeto de geradores síncronos de pólos salientes: uma ferramenta analítica que permite considerar os efeitos do enrolamento amortecedor. (FL/GMR/19) XIV SNTPEE – Belém-PA; Brasil; 1997.
- (2) ROCHA ECHEVERRIA, J. JOHNNY Uma análise dos efeitos do enrolamento amortecedor sobre a força eletromotriz de geradores síncronos de pólos salientes. São Paulo, 1996. 137p. Tese (Doutor) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- (3) CARTER, F. W.: The magnetic field of the Dynamo-electric Machine, Journal I.E.E., November, 1926, Vol. 64.
- (4) GIBBS, W. J.: "Conformal transformation in electrical engineering", Chapman and Hall, 1958, London.
- (5) FREEMAN, E. M.: The calculation of harmonics, due to slotting, in the flux-density waveform of a dynamo-electric machine. Proc. IEE, Vol. 109, Part C, No. 16, June 1962.
- (6) FREEMAN, E. M.: Neville's tooth-ripple wave length spectra. Proc. IEE, Vol. 120, Part C, No. 3, March 1973.

