Estratégia para Detecção de Excentricidade Estática em Geradores Síncronos através do Fluxo Magnético de Entreferro

Luciano Bortoloto Antunes
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
luciano.antunes@posgrad.ufsc.br

Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
carlos.cacw@gmail.com

Vinícius José Martin Nascimento
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
viniciusjmn@gmail.com

Gustavo Felipe Martin Nascimento
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
gustavo.nascimento@posgrad.ufsc.br

Nelson Jhoe Batistela
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
jhoe.batistela@ufsc.br

Luciano Mendes de Freitas
EMAS
ENGIE Brasil Energia
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
luciano.freitas@engie.com

***Resumo* — No sistema elétrico de potência, os geradores síncronos encontram-se entre os principais ativos, cuja parada não programada pode ocasionar perda de faturamento e da confiabilidade de todo o sistema. Nesse contexto, sistemas de monitoramento da condição de máquina são uma solução atraente, pois permitem a programação de manutenções preditivas de maneira otimizada. A excentricidade estática, um defeito comum em máquinas síncronas, consiste em uma discordância estática entre os centros geométricos do rotor e do estator e provoca um desbalanceamento de forças magnéticas entre esses componentes. A detecção desse tipo de falta é realizada mais comumente por meio de sistemas de monitoramento de vibração mecânica. Entretanto, essa abordagem pode apresentar dificuldades para discernir a direção do deslocamento do eixo quando não são aplicados transdutores adicionais, tais como proxímetros. Neste trabalho, é proposta uma estratégia de detecção que utiliza quatro sensores de fluxo magnético de entreferro, defasados de 90° na circunferência interna do estator. Ensaios experimentais foram efetuados em uma bancada que permite a imposição da falta de maneira controlada. Os resultados obtidos indicam que é possível detectar a falta, mensurar o grau de severidade do defeito e determinar a direção de deslocamento do eixo, de maneira independente do carregamento do gerador.**

Palavras-chave* — *Fluxo magnético de entreferro, gerador síncrono, bobina sonda, excentricidade estática, corrente de excitação.

I. INTRODUÇÃO

Dentro do processo de geração de energia elétrica, o gerador síncrono (GS) é um componente eletromecânico de conversão de energia fundamental para o sistema elétrico. Esse equipamento realiza a conversão de energia mecânica (por exemplo, proveniente do movimento de fluídos) em elétrica com o objetivo de ser transmitida e distribuída para os consumidores residenciais e industriais. Logo, o funcionamento confiável e eficiente de geradores síncronos é de suma importância. Quando há a ocorrência de uma parada não programa de um GS em operação no sistema elétrico, pode haver várias consequências negativas, como perda de faturamento e multas para a concessionária de energia, perda de confiabilidade do sistema elétrico e perda de produção industrial. Uma solução atraente para esse problema são sistemas de monitoramento de condição de máquinas, os quais permitem a realização de manutenções preditivas, isto é, ações de manutenção quando há indícios do desenvolvimento de uma falta incipiente no gerador.

Dentre as várias faltas que podem ocorrer em um gerador síncrono, tem-se a excentricidade estática. O defeito de excentricidade ocorre quando o entreferro da máquina deixa de ser uniforme ao longo de todo o pacote estatórico, e pode ser dividida em dois tipos principais: estática e dinâmica. A excentricidade estática acontece quando a região de menor entreferro é fixa e não varia no tempo, sendo geralmente causada por um desalinhamento entre estator e rotor. No caso da excentricidade dinâmica, a região de menor entreferro varia com o tempo, pois o centro de rotação da máquina não está alinhado com o rotor [1]. Essa falta incipiente é, comumente, uma consequência do funcionamento incorreto do rolamento da máquina, sendo as principais causas a corrosão elétrica, vibração mecânica, instalação imprópria, sobrecarga e lubrificação inadequada [2].

A excentricidade provoca um efeito de desbalanceamento magnético de atração entre estator e rotor. Em um estágio avançado de excentricidade, é possível a ocorrência até de fricção entre estator e rotor, o que pode gerar, no pior dos casos, a perda total do equipamento ou surgimento de outras faltas, como quebra das lâminas do pacote estatórico e curto-circuito ou perda de espiras nos enrolamentos de excitação e de armadura [3]. Em alguns casos, é necessário também verificar a aplicação da máquina elétrica para mensurar o nível de severidade do problema. Por exemplo, em [4] é mostrado um estudo de caso de um motor de 300 HP utilizado para bombear um fluído inflamável que apresentava problemas de atrito no rolamento. O defeito no rolamento pode ter gerado uma faísca que resultou na explosão e incêndio do local. O sistema ficou desativado por mais de um ano e gerou prejuízos na ordem das centenas de milhões de dólares.

A detecção de faltas incipientes em geradores síncronos é, majoritariamente, realizada através do monitoramento de variáveis elétricas, magnéticas e mecânicas [5] - [6]. Uma das metodologias mais clássicas para detecção de defeitos no rolamento (como a excentricidade estática) é por meio da análise da vibração mecânica, visto que essa metodologia já possui normas técnicas vigentes, como a ISO 20816-1 de 2016, que fornece diretrizes para equipamentos comerciais, tais como o IMx-M [7], o Veski CoDis [8] e o VibraOne [9] das empresas SKF, Iris Power e AQTech, respectivamente. De

Este trabalho foi parcialmente custeado pela CAPES, pelo CNPq, pela ENGIE Brasil Energia e pela Itá Energética S. A.

maneira mais específica, o defeito de excentricidade estática é, mais modernamente, detectado (por exemplo, no equipamento VibraOne) através de sensores de distância capacitivos (proxímetros). As duas abordagens citadas apresentam resultados positivos. Porém, além dos transdutores utilizados serem invasivos, é necessário fornecer alimentação elétrica para esses sensores.

O monitoramento de geradores síncronos através do fluxo magnético de entreferro possui vantagens em relação aos outros métodos, visto que os sinais medidos são de maior amplitude e são menos suscetíveis à ruídos externos (devido à blindagem natural realizada pela carcaça e pelo estator do gerador), além de os sensores não necessitarem de alimentação externa. O objetivo deste trabalho é propor uma nova estratégia de detecção de excentricidade estática que utiliza quatro sensores de fluxo magnético instalados a cada 90° na circunferência interna do estator. A seção II apresenta os fundamentos da técnica de detecção proposta. A apresentação e análise dos resultados da aplicação da metodologia proposta aos dados de ensaio de um gerador de 10 kVA são abordados na seção III. A seção IV fornece a conclusão do trabalho.

II. Fundamentos da Estratégia de Detecção de Excentricidade Estática

A. *Forma de Onda do Fluxo Magnético e Gráfico Polar*

A excentricidade estática é um defeito que consiste de uma discordância estática entre os eixos do rotor e do estator. Assim, apesar de manter o tamanho médio do entreferro constante, surgem regiões desiguais de tamanho do entreferro no interior da máquina. Por exemplo, se o eixo do rotor se encontra deslocado para baixo do eixo do estator, o tamanho do entreferro na parte superior será maior do que na parcela inferior da máquina, ainda que o valor médio do tamanho do entreferro seja aproximadamente constante. Dessa maneira, é esperado que o fluxo magnético sofra alterações com o deslocamento do eixo da máquina. Do ponto de vista de um sensor de fluxo magnético posicionado em um dente do estator, se o deslocamento do eixo provocar um aumento do tamanho do entreferro entre o transdutor e o rotor do gerador, o fluxo medido por esse sensor será menor, visto que a relutância aumentaria por consequência do aumento do tamanho da camada de ar (ou qualquer outro fluído que separe o estator e o rotor). Espera-se o comportamento contrário caso o entreferro diminua, i.e., um aumento do fluxo medido. Para verificar essa hipótese, a Fig. 1 e a Fig. 2 apresentam as formas de onda do fluxo magnético medidas por duas bobinas sondas em um gerador síncrono de 10 kVA com eixo horizontal e entreferro médio de 2 mm operando em 380 V, 60 Hz, 4,5 kVA e fator de potência unitário. Na Fig. 1 a máquina é considerada sadia. Já na Fig. 2, foi imposto uma excentricidade estática de 0,5 mm, de maneira que o entreferro na região inferior seja menor do que na superior (1,5 mm e 2,5 mm, respectivamente). Uma bobina sonda foi posicionada na região superior da máquina e outra na região inferior.

Observe que, na Fig. 1, a amplitude das formas de onda é muito similar, pois o tamanho do entreferro é aproximadamente o mesmo. No caso da Fig. 2, a discrepância entre as amplitudes das formas de onda é muito mais significativa visualmente.

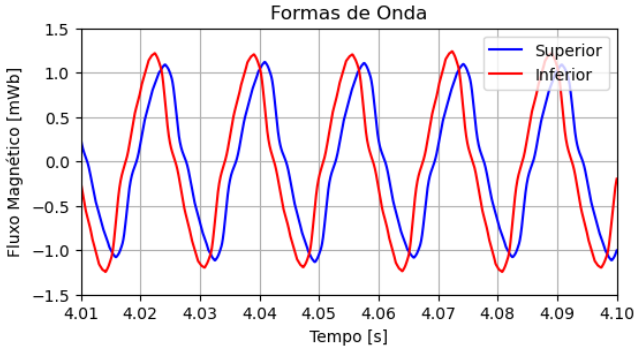


Fig. 1. Formas de onda do fluxo magnético no entreferro de um gerador síncrono sadio.

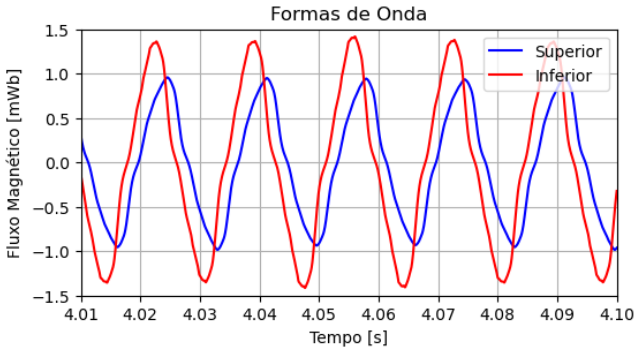


Fig. 2. Formas de onda do fluxo magnético no entreferro de um gerador síncrono de eixo horizontal com excentricidade vertical.

A detecção do defeito de excentricidade dinâmica pode ser realizada por meio da análise do gráfico polar do fluxo magnético (de maneira similar ao que é feito para a falta de curto-circuito de espiras em polo do rotor) [10] – [11]. Entretanto, a detecção da excentricidade estática utilizando o gráfico polar não é trivial, pois, primeiramente, é necessária a aplicação de mais sensores de fluxo. Isso pode ser visualizado através da forma de onda do sensor “Superior” na Fig. 1 e na Fig. 2. Observe que a diferença de amplitude entre o estado sadio e com excentricidade é visual e relativamente muito baixa, podendo ser confundida com uma mudança no carregamento da máquina, por exemplo. Além disso, a metodologia de construção do gráfico polar não é tão simples quanto para os defeitos de curto-circuito de espiras em polo do rotor e de excentricidade dinâmica, já que não basta apenas calcular o valor médio dos picos da forma de onda do fluxo magnético. Por essas razões, comumente é utilizado sensores de distância capacitivos (proxímetros), já que oferecem uma metodologia de análise mais simples e direta.

Neste trabalho é proposta uma nova metodologia para detecção do defeito de excentricidade estática a partir das medições do fluxo magnético de entreferro. A principal vantagem da técnica é que com os mesmos sensores é possível realizar a detecção de outras faltas, como curto-circuito de espiras em polo do rotor e excentricidade dinâmica (o que já é feito em equipamentos comerciais). Além disso, sensores de fluxo magnético do tipo bobina sonda não requerem alimentação elétrica, diferentemente dos proxímetros, o que facilita a instalação.

B. *Posicionamento dos Transdutores e Indicador de Excentricidade*

Como mencionado anteriormente, e exemplificado na Fig. 2, quando há uma alteração no tamanho do entreferro de

maneira desigual na máquina, por exemplo deslocamento no eixo horizontal para a direita, necessariamente haverá uma discrepância significativa entre as amplitudes (e por consequência dos valores eficazes) das formas de onda do fluxo magnético medidas por sensores que estejam posicionados a uma distância de 180° entre si, na circunferência interna do estator, no mesmo eixo que a falta ocorre.

Dessa maneira, como deseja-se não só detectar e mensurar o grau de severidade do defeito, mas também discernir a direção de deslocamento do eixo, propõe-se dividir a máquina em dois eixos ortogonais e alocar, nos dentes do estator, quatro transdutores de fluxo magnético espaçados de 90°. Essa metodologia de posicionamento dos sensores é exemplificada no diagrama em corte de um gerador síncrono de oito polos salientes, representado em um corte radial na Fig. 3, na qual os dentes em vermelho indicam o posicionamento dos transdutores.

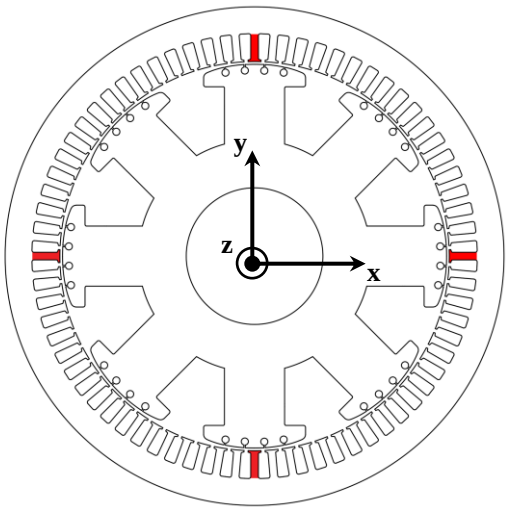


Fig. 3. Exemplo da estratégia de posicionamento dos sensores de fluxo magnético em um gerador síncrono de 8 polos salientes.

Os indicadores propostos para realizar a detecção da excentricidade estática nos eixos horizontal (E_H) e vertical (E_V) são apresentados em (1) e (2), respectivamente. Nestas equações, $\Phi_{0°}$, $\Phi_{90°}$, $\Phi_{180°}$ e $\Phi_{270°}$ são os valores eficazes do fluxo magnético medido pelos sensores posicionados a 0°, 90°, 180° e 270°, respectivamente. Note que os indicadores propostos consistem da razão entre a diferença entre os valores eficazes do fluxo magnético naquele eixo e a média do fluxo magnético eficaz neste mesmo eixo.

$$E_H = \frac{2(\Phi_{0°} - \Phi_{180°})}{\Phi_{0°} + \Phi_{180°}} \quad (1)$$

$$E_V = \frac{2(\Phi_{90°} - \Phi_{270°})}{\Phi_{90°} + \Phi_{270°}} \quad (2)$$

Em uma situação ideal, em que o tamanho do entreferro é uniforme em todo o interior do gerador, o fluxo magnético eficaz medido pelos quatro sensores seria aproximadamente idêntico, resultando em um valor nulo dos dois indicadores (E_H e E_V). No caso de uma excentricidade estática no eixo y no sentido positivo (tamanho do entreferro menor em 90° e maior em 270°), o valor de E_H continuaria sendo aproximadamente nulo, ao passo que o valor de E_V seria um valor positivo não nulo. Caso a mesma excentricidade ocorresse no eixo y no sentido negativo, o indicador apresentaria um valor negativo com módulo muito semelhante ao do caso anterior. Assim, deslocamentos verticais sensibilizam o indicador E_V, e os horizontais, E_H. Na ocorrência de um deslocamento, por exemplo, de 45° (diagonal), ambos os indicadores seriam sensibilizados. Sendo assim, seria possível realizar a detecção, a mensuração do grau de severidade e o discernimento da direção do defeito.

C. Carregamento do Gerador Síncrono

Uma das dificuldades enfrentadas pelas metodologias de detecção de defeitos em máquinas elétricas é a variação do ponto de operação do gerador síncrono. Por exemplo, a norma ISO 20816-1:2016 estipula valores de vibração mecânica aceitáveis em função dos valores da potência aparente da máquina elétrica, pois além de a alteração do carregamento dificultar a detecção da falta, muitas vezes torna também inviável a mensuração do grau de severidade do defeito.

Na metodologia de detecção de excentricidade estática a partir do fluxo magnético de entreferro aplicada neste trabalho, propõe-se relacionar os valores dos indicadores E_H e E_V com os valores da corrente de campo do gerador síncrono. Como o fluxo magnético no entreferro da máquina é, majoritariamente, provindo do rotor, é esperado que os valores do fluxo magnético sejam mais sensíveis à corrente de excitação, visto que a mesma altera as magnitudes do circuito magnético do rotor.

Para avaliar o desempenho da estratégia de detecção proposta, ensaios experimentais foram realizados em uma bancada especial que permite impor, de maneira controlada, deslocamentos no eixo do rotor de um gerador síncrono de 8 polos salientes. Os detalhes dos ensaios e os resultados são apresentados na seção seguinte.

III. Resultados Experimentais e Discussões

Os ensaios experimentais foram realizados em uma bancada especial que permite impor, de maneira controlada, o defeito de excentricidade estática no eixo vertical (eixo y, vide Fig. 3) com magnitude de até 50% do tamanho do entreferro, o qual possui um tamanho nominal de 2 mm. A bancada consiste de um gerador síncrono de 10 kVA com 8 polos salientes, um motor de corrente continua (operando como máquina motriz) e um sistema de aquisição, que possui uma taxa de amostragem de 125 kHz e um conversor analógico-digital de 16 bits. O eixo pode ser deslocado tanto no lado não acoplado à máquina primária (LNA) quanto no lado acoplado (LA). Uma fotografia do aparato experimental é apresentada na Fig. 4.



Fig. 4. *Fotografia do aparato experimental.*

O gerador opera sincronizado com a rede de distribuição elétrica de 380 V e 60 Hz através de um banco de transformadores Δ-Y com relação de transformação unitária. Os ensaios foram realizados em três níveis de potência aparente (3,0, 4,5 e 7,0 kVA) e em sete fatores de potência (1,0, 0,8, 0,5 e 0,3, com características capacitiva e indutiva), totalizando 21 pontos de operação. Em cada ponto de operação, o eixo do rotor foi deslocado de quatro maneiras distintas (caracterizando quatro tipos de excentricidade estática), a Tabela I apresenta os valores de deslocamento impostos. O sentido de deslocamento segue os eixos x e y definidos na Fig. 3. Por exemplo, no ensaio C o eixo do rotor é deslocado para baixo em 0,5 mm no lado acoplado (LA) à máquina primaria e elevado em 0,5 mm no lado não acoplado (LNA).

TABELA I. CONDIÇÕES DE EXCENTRICIDADE ESTÁTICA IMPOSTAS

Condição	LA	LNA
A	+ 0,5 mm	+ 0,5 mm
B	- 0,5 mm	- 0,5 mm
C	- 0,5 mm	+ 0,5 mm
D	- 1,0 mm	+ 0,0 mm

Como a bancada utilizada neste trabalho permite apenas a imposição de defeitos de excentricidade estática na direção vertical, será explorado apenas o indicador E_V (vide (2)). O gerador possui em seu interior duas bobinas sonda de fluxo magnético de interesse, uma alocada no topo do dente no ângulo 80° e outra no fundo do dente no ângulo 280° (nas proximidades das posições indicadas na Fig. 3 no eixo y). Como os transdutores não se encontram na posição preferencial da estratégia proposta, não estão defasados entre si de 180° na circunferência interna do estator e nem alocados da mesma maneira no dente (um no topo e outro no fundo). Assim, é esperado que o resultado divirja levemente do esperado. Contudo, esses fatores não anulam a validade dos resultados dos ensaios experimentais, mas sim mostram a potencialidade da estratégia de detecção proposta.

A Fig. 5 apresenta os valores do indicador E_V em função das aquisições com a máquina operando em 380 V e 60 Hz, 4,5 kVA e fator de potência unitário, começando de maneira sadia, nas condições A, B e C (vide Tabela I), e voltando à condição sadia.

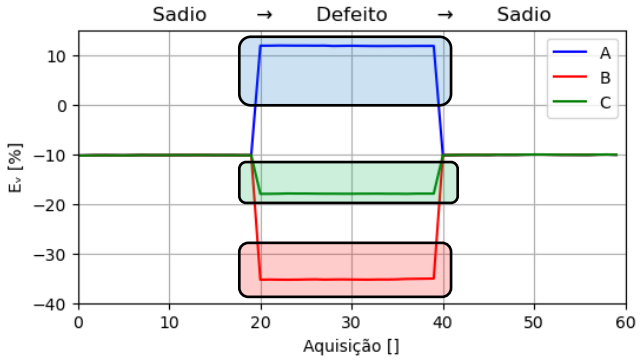


Fig. 5. Valores do indicador E_V em função das aquisições para o gerador operando em 380 V, 60 Hz, 4,5 kVA e fator de potência unitário, de maneira sadia, e nas condições A, B e C (vide Tabela I), voltando à condição sadia.

Nas curvas da Fig. 5, observa-se que nas condições sadias (aquisições de 0 a 20 e 40 a 60) o indicador apresenta valores aproximadamente iguais de -10%. Idealmente, seria esperado que os valores de E_V convergissem para 0%. A provável causa dessa discrepância é o fato de os transdutores estarem alocados em locais distintos nos dentes (topo e fundo), medindo assim valores de fluxo levemente diferentes mesmo na condição sem defeito. Na condição A (aquisições de 20 a 40, destacadas em azul na figura) os valores do indicador se mantêm quase constantes em cerca de 12%. Apesar do "*offset*" na condição sadia, note que o indicador é altamente sensibilizado pela inserção da falta, o que indica a viabilidade da estratégia de detecção proposta. Além de tudo que foi citado, observa-se que em cada condição os valores do indicador E_V se mantem quase constantes.

Observando as curvas da Fig. 5, nota-se também que durante a condição B (aquisições de 20 a 40, destacadas em vermelho na figura) os valores do indicador E_V possuem valores muito semelhantes e aproximadamente iguais a -35%. Quando comparado à condição sadia (E_V de cerca de -10%), a diferença é de -25%. Na condição A, a diferença entre o estado sadio e com falta foi de cerca de 22%. Assim, para a mesma magnitude de deslocamento (0,5 mm no LA e no LNA) porém em sentidos opostos (para cima e para baixo) o módulo da diferença do indicador E_V entre o estado sadio e a condição de falta é muito semelhante (22% e 25%). Esse resultado vai ao encontro das hipóteses levantadas na seção III.B, pois a diferença de 3% encontrada paras as duas condições pode ser provocada por fatores tais como leve variação do ponto de operação, condições térmicas do gerador e a precisão da medida dos próprios valores de deslocamento. Observe que para a condição C (aquisições de 20 a 40, destacadas em verde na figura) o módulo do deslocamento é o mesmo das condições A e B, todavia o deslocamento em cada um dos lados tem sentidos opostos. Nessa última condição, o indicador é muito pouco sensibilizado.

A Fig. 6 apresenta os valores médios do indicador E_V em função dos valores médios da corrente de excitação para a máquina sadia e para as quatro condições de excentricidade estática (A, B, C e D, vide Tabela I) junto de suas respectivas linhas de tendência linear. Observe que o indicador E_V possui uma relação fortemente linear com a corrente de excitação. É possível notar também alguns *outliers*. Quando analisado mais especificamente esses pontos (como por exemplo, o ponto em 1,24 A e -27% na condição B), observou-se que houve erros de aquisição dos dados provenientes do sensor posicionado em 280°.

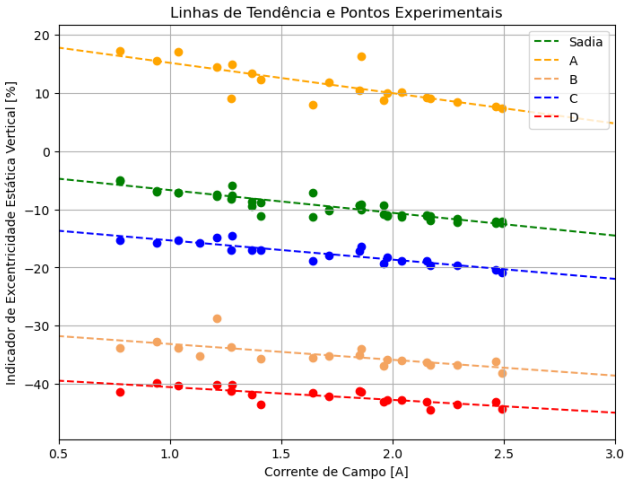


Fig. 6. *Valores médios do indicador E_V em função dos valores médios da corrente de campo do gerador para a máquina sadia e para quatro condições de excentricidade estática.*

O primeiro aspecto positivo que pode ser logrado no comportamento das curvas apresentadas na Fig. 6 é que nenhuma delas se cruza. Isto demostra que é possível segregá-las entre si (i.e., é possível detectar cada tipo de excentricidade estática imposta). Note também que deslocamentos no sentido positivo (para cima) possuem suas curvas de tendência acima da curva de tendência sadia, ao passo que deslocamentos no sentido negativo (para baixo), possuem suas curvas de tendência abaixo da curva de tendência sadia. Essa característica demostra que é possível também discernir o sentido de deslocamento.

O indicador E_V apresentou baixa sensibilidade à excentricidade imposta do tipo C (vide Tabela I) para este arranjo/bancada de ensaio. Isso ocorre porque em cada extremidade do rotor é imposto um deslocamento de eixo com mesmo módulo e direção, porém com sentidos opostos. Dessa maneira, no plano yz, o rotor apresenta simetria ímpar em relação ao seu ponto central. Como as bobinas sonda se encontram nos dentes do estator e percorrem todo o pacote estatórico, a medição dos transdutores pode ser entendida como uma média de todo o entreferro no eixo z da máquina. Nesta condição C de defeito, a média do entreferro no eixo z é 2 mm, o que equivale ao mesmo valor da condição sadia.

A partir dos resultados expostos na Fig. 6, construiu-se o diagrama de detecção apresentado na Fig. 7 para este gerador. A construção desse diagrama foi realizada da seguinte maneira: duas retas foram traçadas a partir da regressão linear da condição sadia, em que uma delas teve seu coeficiente linear reduzido de cerca de 10% e a outra aumentada em 10% (em referência a regressão linear sadia) para que 95% dos pontos estivessem entre essas duas retas, assim definindo a região de "Condição Normal". A regressão linear da condição de deslocamento do tipo C foi escolhida para delimitar a região inferior de "Deslocamento Desigual < 25%" (deslocamento de 0,5 mm corresponde a 25% do tamanho do entreferro de 2 mm). A regressão linear da condição do tipo B delimita a região de "Deslocamento < 25%", e após essa linha tem-se a região de "Deslocamento > 25%". O lado superior do diagrama (lado de "cima" da Condição Normal) foi construído espelhando a parcela inferior em relação a "Condição Normal". A Fig. 7 mostra também os pontos experimentais utilizados na construção do respectivo diagrama de detecção.

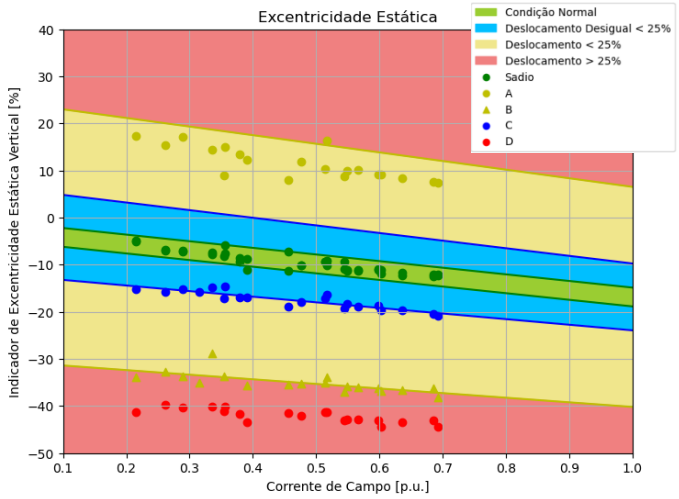


Fig. 7. *Diagrama de detecção para o defeito de excentricidade estática.*

O diagrama apresentado permite detectar e mensurar a gravidade do defeito, além de indicar a direção de movimentação do eixo. No diagrama proposto, apresentado na Fig. 7, excentricidades de magnitudes pequenas podem ser confundidas com deslocamentos desiguais com amplitudes opostas nos dois lados de até 25%. Uma maneira de resolver esse problema seria a instalação de sensores que não compreendessem todo o pacote estatórico, mas sim metade dele por exemplo. Dessa forma, seria possível também detectar deslocamentos no eixo z.

IV. Conclusão

A excentricidade estática é mais comumente detectada através de sistemas que monitoram a vibração mecânica da máquina, pois o defeito é de origem mecânica (desalinhamento do eixo). Como é conhecido, os métodos que utilizam essa grandeza mecânica apresentam resultados positivos e consolidados no setor industrial. Mas, eles possuem dificuldades de discernir a direção de deslocamento do eixo caso não empreguem sensores adicionais, tais como proxímetros. A estratégia proposta neste trabalho seria a utilização de quatro sensores defasados de 90° na circunferência interna do estator para dividir a máquina em dois eixos ortogonais (por exemplo, vertical e horizontal). Através da medição da diferença dos fluxos em cada um desses eixos (indicadores E_V e E_H), seria realizada não só a detecção do defeito, mas também a mensuração da sua gravidade e a determinação da direção e do sentido do deslocamento. Esta potencialidade foi demonstrada com ensaios empregando os sensores disponibilizados na bancada especial do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Nas quatro condições de excentricidade estática impostas, os resultados alcançados nessa bancada mostraram que o indicador E_V permite realizar a detecção do defeito e distinguir o sentido (para cima ou para baixo) para o qual o eixo foi deslocado.

Agradecimentos

Este trabalho foi motivado e parcialmente custeado pelos projetos regulados pela ANEEL e desenvolvidos no âmbito do Programa de P&D da ENGIE Brasil Energia e da Itá Energética S. A; PD-0403-0048/2019 e PD-00403-0057/2023, ambos intitulados "Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo".

Referências

[1] J. Brito; P. L. Filho e R. Pederiva, "Detecção de falhas em motores elétricos através da análise de corrente e análise de fluxo magnético," 10ª Seminário Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamentos, 2001.

[2] R. Mistry e R. Maynus, "Crucial for Rotating Machines: Types and Properties of Lubricants and Proper Lubrication Methods," em IEEE Industry Applications Magazine, vol. 22, no. 6, pp. 10-18, Nov.-Dec. 2016, doi: 10.1109/MIAS.2015.2459101.

[3] L. Frosini, "Novel Diagnostic Techniques for Rotating Electrical Machines – a Review," em Energies, vol. 13, no. 19, p. 5066, Set. 2020, doi: http://dx.doi.org/10.3390/en13195066.

[4] A. H. Bonnett e H. M. Glatt, "Ten Things You Should Know About Electric Motors: Their Installation, Operation, and Maintenance," em IEEE Industry Applications Magazine, vol. 24, no. 6, pp. 25-36, Nov.-Dez. 2018, doi: 10.1109/MIAS.2017.2740456.

[5] "IEEE Recommended Practice for Monitoring and Instrumentation of Turbine Generators," IEEE Std 1129-1992, pp. 1–27, Dez. 1992.

[6] "IEEE Guide for Online Monitoring of Large Synchronous Generators (10 MVA and Above)," IEEE Std 1129-2014, pp. 1–62, Apr. 2014.

[7] IRIS POWER, "Veski CoDis". Disponível em: https://irispower.com/products/codis/. Acesso em: 21/04/2024.

[8] SKF, “IMx-M”. Disponível em: https://www.skf.com/pt/products/condition-monitoring-systems/machine-protection-systems/imx-m. Acesso em: 21/04/2024.

[9] AQTech, “VibraOne”. Disponível em: https://www.aqtech.com/hidro. Acesso em: 21/04/2024.

[10] M. S. Rafaq et al., "Airgap Search Coil Based Identification of PM Synchronous Motor Defects," em IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 7, pp. 6551-6560, Julho 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3095810..

[11] M. F. Shaikh, H. -j. Kim, S. B. Lee and C. Lim, "Online Airgap Flux Based Diagnosis of Rotor Eccentricity and Field Winding Turn Insulation Faults in Synchronous Generators," em IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37, no. 1, pp. 359-366, Março 2022, doi: 10.1109/TEC.2021.3092198..