Impacto da variação de velocidade de geradores síncronos sobre a assinatura magnética da máquina em processos de detecção de faltas

Tarcísio Pollnow Krüger
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
tarcisio.kruger@ifsc.edu.br

Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
luis.otavio.grillo@posgrad.ufsc.br

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

Murilo Silveira Lima
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
murilo.sl@grad.ufsc.br

Nelson Sadowski
GRUCAD/EEL/CTC
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
nelson.sadowski@ufsc.br

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

***Abstract*— Neste artigo é realizada uma investigação sobre a influência das alterações de frequência sobre o campo magnético externo de geradores síncronos. Esta análise busca identificar impactos destas alterações em métodos de detecção de faltas incipientes que utilizam o campo magnético externo para monitorar a condição da máquina. Em tais métodos, a detecção de faltas pode ser realizada através da análise da assinatura magnética do gerador, a qual é obtida pela transformação em frequência de sinais de medição proporcionais à derivada temporal do campo magnético externo. A investigação com um gerador síncrono de 10 kVA em uma bancada experimental permitiu mensurar influências da velocidade na assinatura magnética, com a máquina síncrona mantendo a tensão terminal ou a tensão de campo constante. Por meio da avaliação dos dados experimentais obtidos, conclui-se que a frequência tem forte influência na composição da assinatura magnética. Tais resultados indicam uma orientação preliminar, bem como os desafios, para implementação de diretrizes de processos de detecção de faltas em geradores síncronos em regime de velocidade variável a partir do campo magnético externo.**

Keywords*— *monitoramento da condição, geradores síncronos de velocidade variável, assinatura magnética.

I. INTRODUÇÃO

O diagnóstico de faltas incipientes em máquinas elétricas é uma área de pesquisa que tem despertado bastante interesse nos últimos anos. A detecção precoce de defeitos em máquinas elétricas permite, possivelmente, rápida manutenção não programada e breve período de inatividade da máquina, prevenindo, por vezes, a ocorrência de uma falha catastrófica [1]. Geradores síncronos são o cerne dos sistemas elétricos de potência, sendo utilizados nas principais plantas tradicionais de geração de energia elétrica, bem como nas plantas mais modernas de geração de energia eólica. Embora tais máquinas sejam construídas para serem robustas e duráveis, com a passagem do tempo e a constante utilização, elas sofrem com degradações de origem mecânica e elétrica [2]. Geradores síncronos são máquinas de alta complexidade, de modo que, muitas vezes, as companhias de geração não possuem, em seu quadro de colaboradores, mão de obra qualificada para um eventual reparo. Desta maneira, não é raro que o envio da máquina para a fábrica, ou mesmo o deslocamento de profissionais capacitados por parte de fábrica até o local da instalação, seja necessário para o seu reparo. O tempo de máquina parada e as respectivas perdas econômicas tendem a ser maiores se a parada não for programada. Assim, o monitoramento da condição de geradores síncronos e a detecção precoce de faltas mostra-se cada vez mais relevante [2].

Dentre outros fatores que justificam o grande interesse pelo monitoramento da condição de geradores síncronos, aqui enfatiza-se a crescente utilização de geradores síncronos em parques eólicos, tanto *on-shore* quanto *off-shore*, uma vez que tais parques estão localizados em áreas com ambientes agressivos, onde a inspeção periódica e a manutenção são desafiadoras e caras [2]. Para turbinas eólicas, uma das técnicas mais difundidas de monitoramento da condição é a análise de vibrações. Este tipo de monitoramento tem como foco apenas detecção de defeitos em rolamentos do eixo principal da turbina. Entretanto, diferentemente de outras aplicações, em que a carga e a velocidade são constantes, e devido às características dinâmicas e à baixa velocidade rotacional das turbinas eólicas, o monitoramento através de análise de vibrações é bastante limitado [3]. Além disso, existe uma lacuna a ser preenchida no que se refere a detecção de defeitos incipientes em componentes elétricos de geradores de turbinas eólicas. Nesse contexto, a utilização de métodos de monitoração de espectro de frequência de sinais de corrente (assinatura de corrente) mostra-se capaz de detectar assimetrias resultantes da perda de espiras ou curto-circuito no enrolamentos do rotor e do estator em turbinas eólicas [4]. Entretanto, tais resultados foram obtidos para turbinas equipadas com gerador de indução duplamente alimentado. Para turbinas eólicas de velocidade variável e equipadas com geradores síncronos não foram encontrados métodos relacionados ao monitoramento da condição de partes elétricas do gerador.

Em relação a métodos de monitoramento da condição de geradores síncronos, a assinatura magnética tem sido utilizada com sucesso para detecção de faltas incipientes em máquinas síncronas de velocidade constante. Esta técnica tem como princípio o monitoramento de componentes de frequência, múltiplas da frequência mecânica do gerador síncrono, a partir

Este trabalho foi parcialmente custeado pelo CNPq.

de sinais proporcionais à derivada temporal do campo magnético externo do gerador. A assinatura magnética carrega informações de características estruturais e operacionais do gerador síncrono, de modo que sua monitoração permite a detecção de faltas incipientes, bem como é capaz de revelar alterações do ponto de operação da máquina [5]. Dada a lacuna existente no monitoramento da condição de turbinas eólicas de velocidade variável baseadas em geradores síncronos, e os promissores resultados do monitoramento da condição de geradores síncronos através da assinatura magnética, este artigo realiza uma investigação sobre influência das alterações de frequência no campo magnético externo de geradores síncrono. Uma vez que a frequência elétrica e a velocidade de rotação do gerador síncrono estão diretamente relacionados, pretende-se verificar o impacto da alteração de velocidade nos métodos de detecção de faltas incipientes a partir da assinatura magnética do gerador.

II. Configurações comerciais dos sistemas de conversão de energia eólica

Os sistemas eólicos apresentam atualmente quatro principais configurações (Tipo I, Tipo II, Tipo III e Tipo IV). Tais configurações são baseadas na combinação de diferentes tipos de componentes, tais como gerador elétrico, caixa de engrenagens e conversor eletrônico de potência.

A configuração de sistemas eólicos do Tipo I é baseada em um gerador de indução com rotor de gaiola de esquilo (SCIG). A velocidade da turbina é praticamente fixa, operando em uma faixa estreita em relação à velocidade síncrona [6]. O SCIG operando em velocidade fixa é um conceito que foi largamente utilizado em turbinas das décadas de 1980 e 1990. A popularização foi devida à simplicidade mecânica e à robustez da máquina de indução, uma vez que não utiliza escovas, demandando baixa manutenção [7]. Por outro lado, a configuração apresenta pontos negativos. Como a velocidade do vento flutua, e a velocidade da turbina é fixa, as variações da velocidade do vento são convertidas em flutuações mecânicas e, consequentemente, em flutuações de potência elétrica, implicando em elevado estresse mecânico [6]. Além disso, esta topologia apresenta limitado controle de qualidade de energia, não é capaz de controlar seu consumo de potência reativa e não possui controle de velocidade para otimizar sua eficiência [6].

Os sistemas do Tipo II utilizam geradores de indução de rotor bobinado (WRIG) associado a um sistema de variação de resistências adicionais ao rotor. O controle da resistência do rotor permite a operação da máquina com variação da velocidade tipicamente de 0 a 10% em relação à velocidade nominal [6], [8]. Como vantagens, esta configuração apresenta um aumento da faixa de velocidade de operação em relação ao SCIG operando em velocidade fixa, reduzindo as cargas mecânicas e as flutuações de potência causadas por rajadas de vento. Entretanto, como desvantagens, a faixa de velocidade ainda é limitada quando comparada a outras opções atualmente disponíveis no mercado, apresenta consequente aumento das perdas com o aumento da resistência do rotor, e apresenta um pobre controle sobre a potência ativa e reativa [6].

Na configuração comercial Tipo III, o sistema eólico utiliza um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) [6], [8], [9], [10]. Diferentemente da configuração Tipo II, o DFIG utiliza um conversor de energia (conversor com interruptores estáticos), conectado ao circuito do rotor, em vez do sistema de adição de resistência, permitindo assim a operação numa faixa de velocidade mais larga [6], [8]. O conversor acoplado ao circuito do rotor, de modo geral, possui capacidade de aproximadamente 30% da potência nominal do gerador, o que reduz o custo do conversor, o peso, e a alocação de espaço na nacele [9]. A principal função do conversor eletrônico é controlar a velocidade do rotor, permitindo variação de ± 30% em torno da velocidade síncrona. Além disso, ele permite o controle da potência ativa e da reativa injetada na rede, bem como dispensa o uso do *soft-starters* [6]. Adicionalmente, a elevada eficiência de conversão, o baixo nível de estresse em componentes mecânicos, o desempenho dinâmico aprimorado e a robustez contra perturbações no sistema de potência podem ser citadas como outras vantagens do sistema Tipo III em relação aos sistemas Tipo I e Tipo II [9]. Por outro lado, apresentam-se como desvantagens, o elevado custo inicial e a complexidade do sistema, em função da presença do conversor de potência. Além disso, é inadequado para parques eólicos *off-shore* em função da manutenção regular necessária no sistema de escovas e anéis deslizantes do DFIG e da caixa de engrenagens [9]. Adicionalmente, o sistema eólico Tipo III apresenta dificuldade em atender os requisitos de rede no caso de faltas no sistema elétrico [10]. Apesar das desvantagens citadas, o sistema eólico Tipo III é uma das configurações dominantes na atual conjuntura de geração de energia eólica, representando em torno de 50% da fatia de mercado [9].

Os sistemas eólicos do Tipo IV podem ser implementados com diferentes tipos de geradores. Pode-se implementar a configuração Tipo IV com os geradores de indução WRIG ou SCIG, bem como com os geradores síncronos de rotor bobinado (WRSG), de ímãs permanentes (PMSG) e baseados em supercondutores de alta temperatura (HTS-SG) [6], [8], [9]. Dentre os possíveis tipo de geradores para esta configuração, o PMSG é o mais popular atualmente [9] e corresponde a sistemas de velocidade variável com conversor de potência de escala total, possibilitando o controle de até 100% da faixa de velocidade do gerador [6]. Nesta configuração, o estator do gerador é conectado à rede através de um conversor de potência, sendo possível até dispensar o uso de um transformador elevador, dependendo do nível de tensão do conversor utilizado. A utilização da caixa de engrenagens é opcional, caso o gerador utilizado seja síncrono e com elevado número de polos, conforme ilustrado na Fig. 1. [6], [9]. Os geradores de acionamento direto (*direct driven*), os quais dispensam a caixa de engrenagens, rotacionam em baixa velocidade, uma vez que o rotor do gerador é conectado diretamente ao rotor aerodinâmico. A remoção da caixa de engrenagens resulta na redução de perdas, menores custos e maior confiabilidade devido à eliminação de componentes mecânicos [6]. Além das vantagens apresentadas pela possível eliminação da caixa de engrenagens, a configuração Tipo IV possui também controle total das potências ativa e reativa, conexão suave com a rede elétrica em razão da utilização de conversor de potência, bem como não apresenta estresse em componentes mecânicos devido ao total controle de velocidade. Em comparação com a configuração Tipo III, apresenta maior eficiência, bem como atende melhor os requisitos de rede em caso da ocorrência de faltas. Como desvantagens da configuração Tipo IV, cita-se o elevado custo do conversor e as suas respectivas perdas, dado que o conversor deve atender 100% da capacidade do gerador. Além disso, o arranjo Tipo IV necessita de maior espaço na nacele para comportar o conversor. Adicionalmente, se comparada às

demais configurações, a Tipo IV apresenta maior complexidade do sistema [6], [9]. Apesar das citadas desvantagens, uma possível redução do custo de dispositivos semicondutores de potência, a possível eliminação de anéis e escovas, pode tornar a configuração comercial Tipo IV dominante em breve [6].

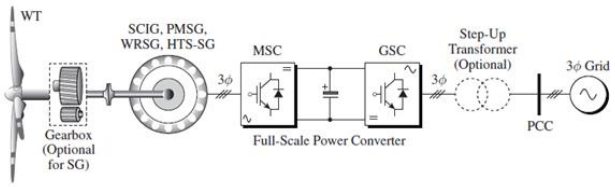


Fig. 1. Configuração do sistema eólico Tipo IV [9].

III. METODOLOGIA

A. *Aparato experimental*

Um Gerador Síncrono (GS) de 10 kVA e 8 polos salientes, parte de uma bancada experimental, apresentada na Fig. 2, foi utilizado para avaliação da influência da velocidade sobre a assinatura magnética da máquina síncrona. O GS tem como máquina primária um motor de corrente contínua (CC). A bancada experimental conta com um painel de controle que permite o ajuste da excitação do campo do GS e da velocidade da máquina primária, bem como sincronização com a rede elétrica e controle manual do ponto de operação durante operação sincronizada. A bancada de testes permite a imposição, de forma controlada, de diferentes tipos de defeitos, sejam de natureza elétrica ou mecânica, no rotor e no estator. Permite a retirada de espiras de polos do rotor e do estator, excentricidade estática (deslocamento de eixo), desbalanceamento do rotor (vibração), perda de barras da gaiola de amortecimento e curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator. Estas são as faltas possíveis de serem simuladas na bancada.



Fig. 2. Bancada experimental com um gerador síncrono de 10 kVA e 8 polos salientes.

São utilizados sensores do tipo bobina de indução para captar o campo magnético externo de maneira não invasiva. Os sensores são posicionados de forma a concatenar, preferencialmente, a componente tangencial do campo magnético disperso (evitando regiões de cabeça de bobina), uma vez que esta componente é preservada na transição do campo magnético entre a estrutura metálica do GS e o ar [11]. A Fig. 3 apresenta a estrutura geral de medição da força eletromotriz $v(t)$, na qual N é o número de espiras da bobina, μ_0 é a permeabilidade magnética do ar, S é a seção do sensor, e H_{tan} e H_{nor} são as componentes tangencial e normal, respectivamente, do campo magnético H disperso [12]. Devido à atenuação do campo magnético pela carcaça do GS, a intensidade do campo externo tende a ser relativamente muito baixa, induzindo no sensor de campo por indução tensões da ordem de milivolts ou até microvolts. Além disso, as componentes de alta frequência são significativamente atenuadas pela carcaça. Dessa maneira, existe a necessidade de uma etapa de condicionamento analógico, composta por estágios de amplificação e filtragem, para garantir uma boa relação sinal/ruído e elevar a amplitude do sinal para etapa de conversão analógico/digital (A/D) [13]. A partir do sinal digitalizado, obtém-se os dados sinal pretendido, ou seja, a forma de onda digitalizada da derivada temporal do campo magnético externo.

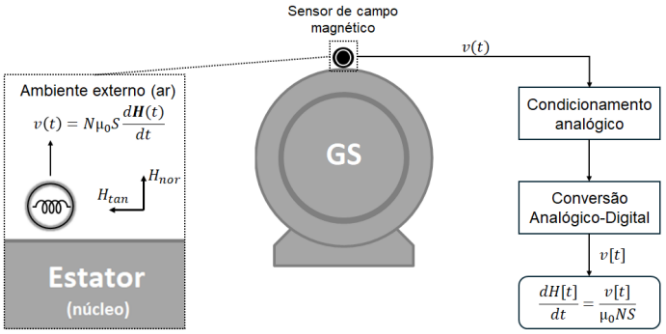


Fig. 3. Estrutura geral de medição da derivada temporal do campo magnético externo [12].

B. *Obtenção da assinatura magnética*

A partir da derivada temporal do campo magnético externo ($dH[t]/dt$), inicia-se uma etapa de processamento de dados visando a obtenção da assinatura magnética. O espectro de frequências pode ser obtido pela aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) sobre a derivada temporal do campo magnético externo. Após a transformada, uma etapa de rastreamento automático da frequência de rotação real da máquina (fundamental mecânica) e suas harmônicas é aplicado sobre o espectro de frequências obtido, de modo a indicar a posição relativa das harmônicas no espectro, bem como as respectivas amplitudes [12]. A estrutura de processamento para obtenção da assinatura magnética é apresentada, de maneira simplificada na Fig. 4. O rastreamento das harmônicas da frequência de rotação é realizado com base em (1), onde f_e é a frequência elétrica de operação do GS, p é o número de pares de polos, k é a ordem da harmônica e f_h é a frequência associada à harmônica de ordem k identificada. Para $k=1$, tem-se a frequência f_m (fundamental mecânica). Para o caso da máquina de 8 polos da bancada experimental, se $k=4$, tem-se a frequência f_e.

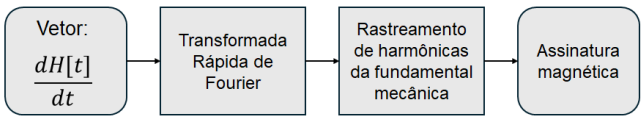


Fig. 4. Estrutura de processamento para obtenção da assinatura magnética.

$$f_h = k\frac{f_e}{p} \tag{1}$$

De modo geral, após o rastreamento das harmônicas de interesse, as suas amplitudes são armazenadas em séries temporais que guardam o histórico da assinatura magnética da máquina e que podem ser avaliados para detectar faltas ou mudanças de operação do gerador [12].

C. *Desafios da obtenção da assinatura magnética em GSs operando em velocidade variável*

A detecção de faltas incipientes em geradores síncronos que operam em regime de velocidade constante, com base na

análise do histórico de amplitudes da assinatura magnética obtida a partir da derivada temporal do campo magnético externo, é uma realidade. Embora a mudança do ponto de operação do gerador síncrono, a partir de modificações no respectivo despacho de potência ativa e reativa, influencie na amplitude das harmônicas que compõem a assinatura magnética, tal mudança não costuma ter dinâmica rápida, sendo o ponto de operação mantido por longos períodos [5]. Assim, em máquinas síncronas operando em regime de velocidade variável, como no caso de turbinas eólicas do Tipo IV, espera-se que a correspondente variação de frequência também provoque inconvenientes à detecção de faltas incipientes baseadas na assinatura magnética. Assim, é importante que a influência da variação da velocidade do gerador, e consequentemente da frequência elétrica, sobre a detecção de faltas incipientes baseada na análise do histórico de amplitudes da assinatura magnética seja devidamente avaliada, dada a sua dinâmica rápida relativamente a um sistema de monitoramento tal como o de [13]. Desse modo, espera-se que seja possível diferenciar componentes do histórico da assinatura magnética da máquina, modificadas pela variação da frequência elétrica da máquina, daquelas modificadas pela ocorrência de uma falta incipiente.

Além da operação de um GS em velocidade variável (típica de turbinas eólicas Tipo IV) dificultar o processo de comparação de histórico de amplitudes da assinatura magnética devido à variação da frequência elétrica, os próprios métodos tradicionais de análise no domínio frequência (Transformada de Fourier) podem ser afetados pela característica não estacionária dos sinais envolvidos [14]. Uma forma de minimizar tal impacto, é a definição de limites máximos de variação dos sinais, descartando amostras que excedem tais limites [15]. Além disso, relacionado ao monitoramento da condição de turbinas eólicas de velocidade variável, técnicas alternativas à Transformada de Fourier têm sido exploradas, tais como, por exemplo, a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), a transformada *wavelet* contínua (CWT), visando reduzir o impacto da não estacionariedade de tais sinais [14]. Ressalta-se, entretanto, que apesar das dificuldades causadas pela não estacionariedade dos sinais, o presente trabalho limita-se a explorar a influência da variação de velocidade/frequência na assinatura magnética a partir de amostras estacionárias obtidas com o aparato experimental empregado.

D. Estruturação dos ensaios na bancada experimental

Diante dos desafios apresentados, os ensaios realizados na bancada do GS foram estruturados em dois grupos. No primeiro grupo de amostras, manteve-se a tensão do enrolamento de excitação do GS constante, de modo que a tensão terminal do GS variasse com a mudança de velocidade imposta pela máquina primária. No segundo grupo de amostras, realizou-se o ajuste da excitação do gerador, de modo que a tensão terminal do GS fosse a mesma nas diferentes velocidades impostas. Devido às características da bancada, variou-se a frequência entre, aproximadamente 45 Hz e 65 Hz, com intervalos de aproximadamente 5 Hz. Evitou-se obter amostras em intervalo muito próximo a 60 Hz, uma vez que o campo magnético, nessa faixa do espectro, sofre a influência de outras fontes eletromagnéticas presentes no ambiente. Evidentemente, o GS foi ensaiado não sincronizado à rede elétrica.

IV. Resultados

Os ensaios realizados no GS de 8 polos e 10 kVA da bancada experimental foram realizados com a máquina em vazio e não sincronizada à rede elétrica, devido à necessidade de operar em diferentes pontos de velocidade. Devido às configurações da bancada, diferentes velocidades de rotação foram impostas a partir do ajuste de frequência no painel de controle manual do GS. Dado o aspecto manual do ajuste, pequenas diferenças são observadas na frequência elétrica do GS detectada pelo algoritmo, se comparada àquelas previamente ajustadas no painel. Para cada frequência de operação foram aquisitadas várias amostras, cada uma com tempo de aquisição igual a 5 s e taxa de amostragem de 30 kHz. A Fig. 5 apresenta uma amostra da região de baixa frequência do espectro do sinal da derivada temporal do campo magnético externo, com o GS operando com frequência de 44,37 Hz e tensão terminal de 280 V. Nesta figura, observa-se que a presença da componente fundamental mecânica f_m se dá em 11,09 Hz. Nesta região de baixa frequência, percebe-se a presença das harmônicas de 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordens com frequências de 22,18 Hz, 33,28 Hz, 44,37 Hz e 55,46 Hz, respectivamente. A componente harmônica mecânica f_4 é também a componente fundamental elétrica f_e do GS, dada a quantidade de polos do máquina.

Dentro desta região do espectro na Fig. 5, nota-se a presença de ruído eletromagnético do ambiente em que a bancada está colocada, notadamente em 60 Hz. Além da componente fundamental de ruído em 60 Hz, componentes harmônicas múltiplas de 60 Hz, com amplitude significativa no espectro foram encontradas, tornando desafiador o rastreamento de raias das harmônicas do espectro em frequência, no caso em que a componente fundamental elétrica f_e ou alguma harmônica mecânica f_i do GS esteja situada sobre componentes de ruído.

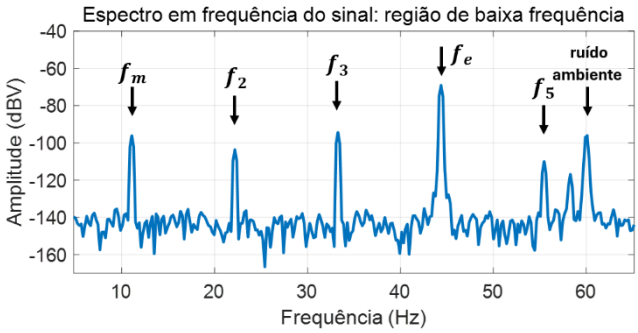


Fig. 5. Região do espectro em frequência para o GS operando em 44,37 Hz.

Para análise da influência da variação de velocidade do GS sobre a assinatura magnética, foi realizado um estudo de correlação entre a amplitude da componente que corresponde à frequência elétrica de operação da máquina f_e com a amplitude das harmônicas obtidas no processo de rastreamento. Para o estudo, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, buscando uma relação linear entre as variáveis analisadas. No estudo de correlação, a frequência elétrica é considerada como variável independente x. A amplitude de determinada harmônica, medida para os diversos pontos de frequência, é considerada a variável dependente y. O coeficiente de correlação de Pearson é dado pela relação entre a covariância entre as variáveis estudadas e suas próprias variâncias. Utiliza-se as equações para a variância das variáveis x e y representadas por (2) e (3), respectivamente, e

a covariância delas por (4), de modo que o coeficiente de correlação de Pearson pode ser calculado conforme (5)

$$S_{xx} = \frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4)$$

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (5)$$

em que, n é o número de amostras, $\bar{x}$ é a média de todas as amostras da variável independente (frequências), $\bar{y}$ é a média de todas as amostras da variável dependente (amplitudes da harmônica h_i).

O coeficiente r_{xy} varia na faixa de $-1 \leq r_{xy} \leq 1$, e quando possui valores próximos aos extremos do intervalo, caracteriza alta correlação linear [16]. Após a determinação do coeficiente de correlação r_{xy}, realizou-se o teste "t" de Student para avaliar a significância da correlação (p) para a correlação entre as amplitudes de cada componente harmônica e a frequência elétrica de operação. Uma vez que p seja menor do que 0,05 (95% de confiança), a correlação é considerada estatisticamente significativa. Para as componentes harmônicas que apresentaram elevada correlação da respectiva amplitude com a frequência de operação do GS, calculou-se também, através de regressão linear, a inclinação da reta de ajuste, definida por

$$y = a + bx \quad (6)$$

em que b indica a sensibilidade da variável independente y em relação a uma unidade de mudança na variável independente x e a é o intercepto y. A inclinação b, a partir dos dados de ensaio, é calculada através de (7).

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (7)$$

A. *Fluxo de excitação constante (φ_{cte})*

Para este ensaio considerou-se o GS com excitação constante, representando o comportamento de um gerador de ímãs permanentes, utilizado frequentemente em modernas plantas de geração eólicas Tipo IV. Nestas máquinas, em geral PMSGs, não se tem a possibilidade de controlar o fluxo de excitação da máquina. Assim, para este grupo de ensaios, a única variável manipulada foi a frequência de rotação da máquina, através do ajuste da corrente de excitação do motor CC utilizado como máquina primária do GS. Assim, foram ajustados manualmente 5 pontos de velocidade igualmente espaçados, correspondente a uma faixa de 45 Hz a 65 Hz no painel de monitoramento de frequência do GS. O ajuste realizado foi manual, justificando pequenas diferenças das frequência medidas em relação às previamente setadas via painel de controle. A tensão terminal do GS, dado o fluxo constante, modificou-se proporcionalmente ao ajuste de frequência, sendo limitada a 280 V para o ensaio de maior frequência.

Através da obtenção das amostras e posterior processamento destas no algoritmo de rastreamento, obteve-se 82 harmônicas simultaneamente detectadas nas amostras das diferentes frequências ensaiadas. Destas 82 harmônicas, 46 apresentaram amplitudes com correlação $r_{xy} > |0{,}9|$, e $p < 0{,}05$. Devido à quantidade reduzida de amostras, em que $n = 5$, mesmo harmônicas que possuem amplitudes com alta correlação com a frequência elétrica ($r_{xy} > |0{,}9|$), elas possuem elevada variabilidade, ou seja, as amplitudes destas harmônicas mostram-se bastante dispersas em torno do valor esperado (curva de ajuste). Assim, devido ao baixo número de amostras, buscando minimizar o impacto do limitado conjunto de dados, selecionou-se apenas as harmônicas com amplitudes com $r_{xy} > |0{,}99|$ com a frequência elétrica. O resultado obtido é apresentado na Tabela I, num total de 13 harmônicas, ordenado pela maior sensibilidade b. Na Fig. 6 é apresentado o comportamento da amplitude de um conjunto de harmônicas da Tabela I em função da frequência de operação do GS.

TABELA I. PRINCIPAIS HARMÔNICAS CORRELACIONADAS COM A FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO, MANTENDO O FLUXO DE EXCITAÇÃO DO GS CONSTANTE.

Harmônica	**Parâmetros**	
	r	***b (dBV/Hz)***
29	-0,9957	-1,1425
73	0,9927	0,3108
5	0,9915	0,2813
6	0,9937	0,2768
4	0,9975	0,2311
1	0,9974	0,2290
60	0,9975	0,2164
28	0,9939	0,2150
2	0,9991	0,1974
3	0,9999	0,1822
52	0,9900	0,1805
8	0,9990	0,1342
12	0,9921	0,0936

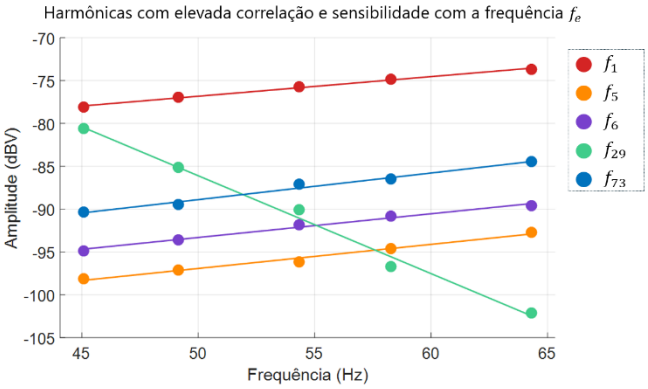


Fig. 6. Harmônicas com elevada correlação e sensibilidade com f_e, mantendo o fluxo de excitação do GS constante.

Nos resultados apresentados na Fig. 6, nota-se que as harmônicas f_1, f_5, f_6, f_{29} e f_{73}, têm amplitudes com comportamento característico linear. Percebe-se que as amplitudes de f_1, f_5, f_6 e f_{73} têm comportamento crescente com o aumento da frequência, enquanto f_{29} decresce. Entretanto, f_{29} apresenta a maior sensibilidade, com $b = -1{,}1425\ dBV/Hz$. Além destas harmônicas, a amplitude da harmônica correspondente à frequência elétrica fundamental do GS f_4, como esperado, demonstra elevada correlação com a frequência elétrica e apresenta a melhor relação sinal/ruído dentre todas as harmônicas. O comportamento de f_4 é apresentado na Fig. 7.

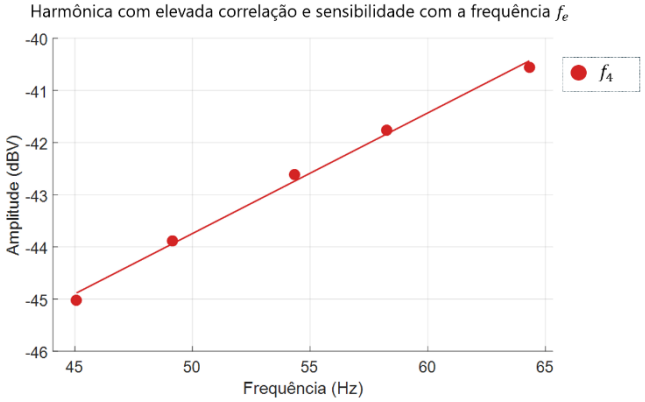


Fig. 7. Comportamento da amplitude de f_4 (fundamental elétrica f_e do GS) em diferentes frequências elétricas de operação, mantendo o fluxo de excitação do GS constante.

B. *Tensão terminal constante (V_{cte})*

Buscando estudar a influência da velocidade na assinatura magnética de uma máquina síncrona eletricamente excitada (EESG), realizou-se um estudo através de um conjunto de ensaios em que a tensão terminal do GS foi mantida constante em 280 V. Por exemplo, em turbinas eólicas Tipo IV, dotadas de EESG, a malha de controle da turbina controla a excitação do GS, podendo este operar com tensão terminal constante ou não. No caso do ensaio experimental, para manter a tensão terminal constante, foi necessário reajustar a corrente de excitação do GS a cada novo ponto de velocidade ω. A principal componente da tensão terminal do GS, a tensão interna eficaz E_a, é expressa por $E_a = K\varphi\omega$, em que K é uma constante que representa aspectos construtivos da máquina [17]. Assim, o ajuste do fluxo φ se dá de maneira inversamente proporcional ao ajuste da velocidade ω, para uma mesma tensão terminal do GS. Portanto, foram manipuladas neste ensaio, duas grandezas, a velocidade angular de operação do GS (controlado através da frequência elétrica no painel de instrumentos, dado que $\omega = 2\pi f$), e o fluxo φ (controlado indiretamente com a alteração da tensão para o valor alvo de 280 V por meio da modificação da corrente do enrolamento de campo do GS, uma vez que ela se relaciona diretamente com o fluxo φ. Esta máquina possui um entreferro relativamente significativo para poder inserir defeito de deslocamento de eixo).

Obteve-se 48 harmônicas simultaneamente detectadas nas amostras das diferentes frequências ensaiadas. Destas 48 harmônicas, 20 apresentaram amplitudes com correlação $r_{xy} > |0{,}9|$ e $p < 0{,}05$ com a frequência elétrica. De maneira similar ao tratado no item anterior, devido à quantidade reduzida de amostras, selecionou-se novamente as harmônicas com amplitudes com $r_{xy} > |0{,}99|$ com a frequência elétrica. O resultado obtido, num total de 6 harmônicas, ordenado pela maior sensibilidade b, é apresentado na Tabela II. Na Fig. 8 é apresentado o comportamento das amplitudes de um conjunto de harmônicas da Tabela II em função da frequência de operação do GS. Nota-se, através dos comportamentos das harmônicas apresentados na Fig. 8, que as harmônicas f_5, f_9, f_{12}, f_{21} e f_{29} têm amplitudes com comportamento característico linear em função da alteração de frequência do GS.

TABELA II. PRINCIPAIS HARMÔNICAS CORRELACIONADAS COM A FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO, MANTENDO A TENSÃO TERMINAL DO GS CONSTANTE.

Harmônica	**Parâmetros**	
	r	***b* (*dBV*/*Hz*)**
29	-0,9980	-1,1132
9	-0,9915	-1,0093
21	-0,9929	-0,3460
5	0,9918	0,3398
12	-0,9941	-0,2951
4	0,9906	0,1118

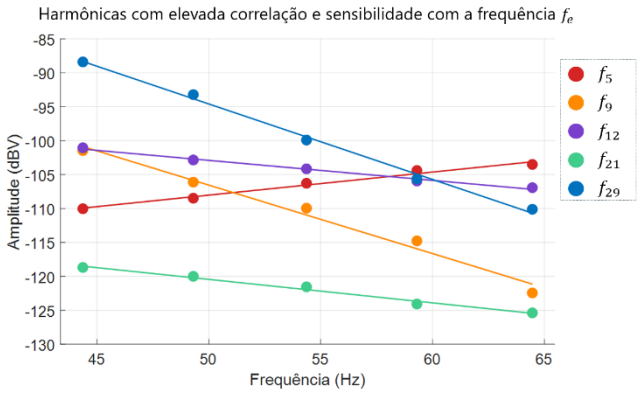


Fig. 8. Harmônicas com elevada correlação e sensibilidade com f_e, mantendo a tensão terminal do GS constante.

Analisando os resultados apresentados, percebe-se, em comparação ao caso anterior, que a f_5 e f_{29} permanecem com comportamento semelhante, apresentando elevada correlação e equivalente sensibilidade. Por outro lado, no caso anterior, f_9 e f_{21} apresentavam correlação $r_{xy} < |0{,}99|$. Assim, a elevada correlação das harmônicas f_9 e f_{21} é decorrente da variação do fluxo necessário para manter a tensão do GS constante. Por outro lado, a harmônica f_{12} apresentou novamente amplitude com correlação $r_{xy} > |0{,}99|$ com a frequência elétrica. Contudo, comparando a sensibilidade b para a harmônica f_{12} nos dois casos estudados, nota-se que no caso do ensaio com a tensão terminal do GS constante, a harmônica f_{12} apresenta $b = -0{,}2951\ dBV/Hz$ e correlação negativa (comportamento decrescente), enquanto no caso do ensaio com fluxo de excitação constante, apresentava $b = 0{,}0936\ dBV/Hz$ (comportamento crescente com o aumento da frequência). Para o ensaio do GS com tensão terminal constante, a harmônica correspondente à frequência elétrica fundamental do GS f_4, embora afetada também pela alteração do fluxo φ, novamente apresenta a melhor relação sinal/ruído dentre todas as harmônicas. Para este caso em que a velocidade ω e o fluxo φ são modificados, o comportamento de f_4é apresentado na Fig. 9.

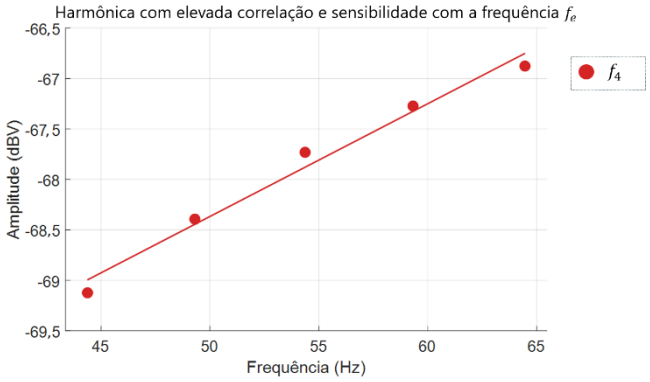


Fig. 9. Comportamento da amplitude de f_4 (fundamental elétrica f_e do GS) em diferentes frequências elétricas de operação, mantendo a tensão terminal do GS constante.

V. Conclusão

Os geradores síncronos são grandes ativos das companhias de geração de energia elétrica. Na geração de energia elétrica em usinas convencionais, equipamentos baseados na assinatura magnética já são capazes de monitorar a condição dos geradores síncronos eletricamente excitados. Além da geração convencional, os GSs são cada vez mais utilizados em modernas plantas de geração de energia eólica. Neste tipo de geração com fonte de energia eólica, PMSGs são em geral empregados, os quais operam em regime de velocidade variável. A mudança de velocidade do rotor do GS, decorrente do comportamento estocástico do vento e das malhas de controle da turbina eólica, traz um grande desafio ao monitoramento da condição de GSs a partir da metodologia do emprego da assinatura magnética.

Além do desafio de utilizar métodos para extrair a assinatura magnética, os quais são mais apropriados para sinais estacionários, o presente estudo verificou que a variação de velocidade do GS sensibilizou, como esperado e em algum grau, uma vasta gama de harmônicas da assinatura magnética. Ou seja, qualquer harmônica que seja utilizada para detecção de algum tipo falta incipiente de GSs tem elevada probabilidade de ser afetada pela variação de frequência ou de velocidade típicas da operação em plantas geração de energia eólica.

O estudo revelou a existência de harmônicas da assinatura magnética do GS da bancada experimental que apresentam amplitudes com elevada correlação com frequência elétrica. As amplitudes de algumas destas harmônicas apresentam também elevadas sensibilidades à variação da frequência, como por exemplo a amplitude das harmônicas f_{29}, f_5 e f_4. Não é possível generalizar que estas harmônicas, em específico, face às variações de frequência, sejam também relevantes em outras máquinas, devido às características construtivas particulares de cada máquina (número de polos, ranhuras do pacote estatórico, assimetrias etc.). Entretanto, por inferência, é provável que cada GS tenha um conjunto de harmônicas da assinatura magnética que possuam amplitudes correlacionadas com a frequência elétrica de operação. A assinatura magnética do GS é afetada por diversos componentes, como fluxo principal, despacho de potência ativa, fator de potência, presença de defeitos, e como mostrado neste estudo, pela frequência elétrica de operação. Entretanto, ao conhecer o impacto de cada grandeza, contribui-se para permitir em breve, a partir da assinatura magnética, a detecção de faltas incipientes em geradores síncronos operando em regime de velocidade variável.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente custeado pelo CNPq.

Referências

[1] H. Henao *et al.*, "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques," *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 31–42, 2014.

[2] S. Li and J. Li, "Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective," *High Voltage*, vol. 2, no. 2, pp. 82–91, 2017.

[3] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song, "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review," *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 1–39, 2009.

[4] A. Yazidi, G. A. Capolino, F. Filippetti, and D. Casadei, "A new monitoring system for wind turbines with doubly-fed induction generators," in *MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, IEEE, 2006, pp. 1142–1145.

[5] L. O. S. Grillo, C. A. C. Wengerkievicz, N. J. Batistela, P. Kuo-Peng, and L. M. de Freitas, "A Method for Statistical Processing of Magnetic Field Sensor Signals for Non-Invasive Condition Monitoring of Synchronous Generators," *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8631, 2022.

[6] T. Letcher, *Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines*. Elsevier, 2023.

[7] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, and J. Rodriguez, "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks," *IEEE Transactions on Industrial electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, 2011.

[8] S. Sumathi, L. A. Kumar, and P. Surekha, *Solar PV and wind energy conversion systems: an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques*, vol. 1. Springer, 2015.

[9] V. Yaramasu and B. Wu, *Model predictive control of wind energy conversion systems*. John Wiley & Sons, 2016.

[10] H. Polinder, J. A. Ferreira, B. B. Jensen, A. B. Abrahamsen, K. Atallah, and R. A. McMahon, "Trends in wind turbine generator systems," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 1, no. 3, pp. 174–185, 2013.

[11] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Magnetic materials and 3D finite element modeling*. CRC press, 2013.

[12] L. O. S. Grillo *et al.*, "Equipment for Monitoring Synchronous Generators Condition through External Magnetic Field Waveforms," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 21, pp. 527–548, 2022.

[13] H. F. Dos Santos *et al.*, "Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 16, pp. 70–89, 2017.

[14] K. Kalista and J. Liska, "Time-frequency methods for signal analysis in wind turbines," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2015, p. 012012.

[15] W. Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, Y. Feng, and Y. Qiu, "Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges," *Wind energy*, vol. 17, no. 5, pp. 673–693, 2014.

[16] S. Dowdy, S. Wearden, and D. Chilko, *Statistics for research*. John Wiley & Sons, 2011.

[17] F. Edition and S. J. Chapman, "Electric machinery fundamentals," 2012.