



GRUPO 1 – GGH

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS POR MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DA FUNÇÃO GERAÇÃO
EM HIDROGERADOR DA UHE CANASTRA: INOVAÇÃO EM *HARDWARE* E *SOFTWARE*,
APLICAÇÕES E TESTES PRELIMINARES**

Fabrizio L. Freitas(*)
AQTech

Vitor A. Marques
AQTech

Eric M. Fortunato
AQTech

Bruno de Borba
AQTech

Tiago K. Matsuo
AQTech

Bruce P. Cabrera
UFSC

Luis Otavio S. Grillo
UFSC

Aguinaldo S. e Silva
UFSC

Ildemar C. Decker
UFSC

Jeferson M. Rodrigues
CEEE-GT

RESUMO

Este informe técnico descreve um protótipo em desenvolvimento para diagnóstico de falhas por monitoramento de parâmetros da função geração. Entre as aplicações a serem implementadas está o diagnóstico de falhas do gerador síncrono baseado no método de identificação de parâmetros, que possibilita o monitoramento da condição estrutural da máquina e a predição de falhas. O artigo descreve uma nova abordagem para a identificação de parâmetros da máquina síncrona, que é realizada com base na aquisição de dados com a máquina em operação normal e conectada ao sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogeradores, monitoramento da função geração, diagnóstico de falhas em geradores, modelagem matemática, monitoramento *on-line*.

1.0 - INTRODUÇÃO

A função geração envolve vários componentes das plantas geradoras, sendo os principais: tomada d'água, comporta, conduto, turbina, gerador síncrono e seus controles (regulador de tensão e velocidade), transformador e disjuntor. O monitoramento da função geração através de identificação de parâmetros apresenta o grande potencial de permitir o monitoramento da operação e o diagnóstico de falhas em elementos deste sistema, aumentando a confiabilidade e disponibilidade dos ativos de geração. A identificação de parâmetros do gerador síncrono, principal elemento da função geração, permite monitorar as condições estruturais deste equipamento e, através da comparação com um modelo de referência, com parâmetros iniciais obtidos do gerador em perfeito funcionamento, possibilita a identificação de falhas estabelecidas ou incipientes.

Este trabalho descreve o desenvolvimento inovador de *hardware* e *software*, as aplicações e os testes preliminares do projeto de P&D nº PD-5785-4101/2015 do programa ANEEL, intitulado "Protótipo de sistema de diagnóstico de hidrogeradores a partir do monitoramento permanente e em tempo real de parâmetros da função geração", que têm como etapa de validação a aplicação piloto do protótipo de sistema de diagnóstico a partir do monitoramento da função geração na UHE Canastra da CEEE-GT. Esta usina é localizada em Canela/RS e possui duas unidades geradoras de 25MVA compostas por geradores síncronos de 13,8kV, 360 RPM, 20 polos e turbinas Pelton com dupla injeção.

O foco inicial do projeto é o desenvolvimento da infraestrutura, de hardware e software, e da metodologia de identificação dos parâmetros de hidrogeradores (geradores síncronos de polos salientes) em operação a ser usada para validação de modelos e diagnóstico de falhas em geradores.

(*) Rua Lauro Linhares, 2055, Max&Flora Center, torre Flora, sala 501, Trindade, Florianópolis, SC, Brasil, CEP 88036-003. Tel: +55 (48) 3338-0007 – E-mail: fabrizio@aqtech.com.br

Neste artigo são descritas as características da infraestrutura de hardware e software do protótipo e uma das suas aplicações, um método de identificação de parâmetros do gerador, usando dados da operação normal. O método de identificação deverá ser usado para a validação de modelos e como parte de um módulo de diagnóstico de falhas a ser implementado como uma das funcionalidades do protótipo.

2.0 – CARACTERÍSTICAS DE HARDWARE E SOFTWARE

A implementação de funções de detecção e diagnóstico de falhas através de modelos de referência exige um hardware com capacidade adequada para processamento dos dados adquiridos e para a simulação da máquina, além de facilidades para programar as funções associadas. O sistema deve possuir um software robusto para implementação de modelos por diagramas de blocos (funções de transferência) e flexível para refinamento do algoritmo de diagnóstico e programação de novas funcionalidades sem a necessidade de redesenhar o layout de hardware.

2.1 Características de hardware

Em um primeiro momento, a equipe de pesquisa realizou a investigação de componentes de hardware comerciais para a composição do hardware do protótipo. Além de desempenho, requisitos de confiabilidade, facilidade de manutenção e acessibilidade de custo foram considerados na especificação do hardware. Para a aquisição de dados, por exemplo, foi considerada a integração de hardware da fabricante National Instruments. Entretanto, tanto para esta função quanto para outras como processamento, isolamento e comunicação, a busca por componentes de mercado demonstrou que não existem equipamentos que atendam os requisitos de desempenho e também custo acessível para atender às especificações do protótipo com custo-benefício adequado. Os componentes mais atrativos ainda eram importados, o que resultaria em uma solução com dependência tecnológica de empresas estrangeiras. Considerando estes aspectos, a equipe de projeto decidiu desenvolver um hardware próprio, 100% nacional, sob o domínio tecnológico de pesquisadores brasileiros.

As opções de plataforma de processamento embarcado consideradas foram as arquiteturas PC x86/x64, ARM e FPGA (*Field-Programmable Gate Array*). Os componentes que utilizam arquitetura x86/x64 tem ótimo desempenho e flexibilidade de programação, porém deixam a desejar em robustez (são poucos os modelos que suportam faixa de temperatura industrial, por exemplo), longevidade e custo. A arquitetura ARM, muito popular nos últimos anos, tem custo acessível, robustez e facilidade de programação, mas em geral tem quantidade limitada de núcleos de processamento. Já os FPGA com sua lógica programável possuem grande poder de processamento, paralelismo, flexibilidade e adaptabilidade, porém são difíceis de programar. Ao contrário das plataformas x86/x64 e ARM que são programáveis em linguagem C++, os FPGA são programados em linguagem de descrição de *hardware* (HDL) como VHDL e Verilog, muito mais complexas.

A escolha da equipe para o projeto após a avaliação das alternativas foi a plataforma Cyclone V SoC da fabricante Altera (hoje parte do grupo Intel), que integra um FPGA de 28 nanômetros e um núcleo ARM® Cortex®-A9 no mesmo encapsulamento. Esta topologia permite um ótimo equilíbrio entre capacidade de processamento, paralelismo e adaptabilidade do FPGA com a flexibilidade e facilidade de programação da tecnologia ARM (ambos executam Linux embarcado, o que permite a execução do *software* embarcado de diagnóstico). Os chips Cyclone V SoC possuem versão em temperatura industrial (-40°C a 85°C), o que traz robustez para aplicações em usinas de geração.

Um dos aspectos que pesou muito para a adoção de uma plataforma baseada em FPGA foi a possibilidade de reprogramar o hardware em campo atualizando o *firmware* em linguagem de descrição de *hardware* (HDL). Esta prática permite correções e aprimoramento do algoritmo de diagnóstico proposto sem a necessidade de alterações no layout da placa de circuito impressos, o que é demorado e caro. Além disso, a possibilidade de executar operações intensivas em processamento diretamente no FPGA abre o potencial para superar as arquiteturas x86/x64 em desempenho.

O hardware do protótipo possui entradas analógicas (para aquisição de sinais dos diversos sistemas da função geração), entradas digitais (aquisição de estados de relés, disjuntores e etc.) e saídas digitais (para sinalizações e acionamento de proteções). Os canais têm as seguintes configurações:

- Entradas analógicas 16 bits isoladas e configuráveis em:
 - 115V_{ac} (faixa dinâmica -325V a +325V) para medição de tensões trifásicas do gerador originados de Transformadores de Potencial (TP);
 - 5A_{ac} (sensor tipo clamp) para medição de correntes trifásicas do gerador originadas de Transformadores de Corrente (TC);
 - ±10V (faixa dinâmica -30V a +30V) e ±20mA (faixa dinâmica -30mA a +30mA) para medição isolada de:
 - Corrente de Campo originada de shunt e conversor analógico;

- Tensão de Campo originada de divisor resistivo e conversor analógico;
- Entradas analógicas 16 bits *single ended* e configuráveis em $\pm 10V$ ou $\pm 20mA$ para medição não-isolada de sensores industriais diversos (vibração relativa, deslocamento, velocidade, posição linear, posição angular, nível, pressão, rotação, entre outros);
- Entradas analógicas 24 bits para medição de vibração absoluta de acelerômetros em padrão IEPE (Integrated Electronic Piezo Electric);
- Entradas analógicas 15 bits para medição de temperaturas originadas de sensores RTD (Resistance Temperature Detectors, termoresistências como PT100);
- Entradas digitais isoladas (níveis até $250V_{dc}$) para medição de proteções como relés, disjuntores, atuadores e estados de diversos subsistemas;
- Saídas digitais (relé NA-NF contato seco);

A taxa de amostragem pode chegar a 20 kHz e a aquisição de dados é sincronizada e independente por canal. O sincronismo é realizado através de IRIG-B (GPS) ou NTP (Network Time Protocol, via Ethernet) e a interface para comunicação com outros sistemas na planta é realizado através de porta RS-485 isolada ou Ethernet em protocolo padrão ModBus (TCP ou RTU).

2.2 Características de software

A plataforma de software do protótipo de sistema de diagnóstico foi projetada levando em consideração requisitos de robustez, flexibilidade e suporte para a implementação de diferentes aplicações. É composta por um software embarcado no hardware, responsável por processar amostras em tempo real, realizar registros de monitoramento e executar o algoritmo de diagnóstico e um software desktop (aplicativo), cuja função é apresentar as informações de monitoramento aos usuários e extrair informações de diagnóstico do software embarcado.

O software embarcado é um kernel (núcleo) de aquisição de dados multiplataforma e foi desenvolvido em linguagem de programação C++ originalmente para ambientes Windows e Linux em arquitetura x86, e posteriormente foi otimizado para arquitetura ARM e Altera/NIOS II ("soft processor" implementado em FPGA) em ambientes Linux, plataformas mais restritas em capacidade de processamento. Os cálculos e processamento matemático no software embarcado são realizados através de modelos de cálculo representáveis em diagrama de blocos (programabilidade alinhada à norma IEC1131), função fundamental para a implementação do diagnóstico por modelo de referência. O software embarcado também armazena em memória informações pertinentes ao monitoramento para que sejam acessadas posteriormente através de seus serviços de rede. O sistema dispõe ainda de diversos serviços via socket TCP/IP em protocolo proprietário para visualização e controle do processo de monitoramento e diagnóstico, além de possibilitar a integração com sistemas já existentes na planta através do protocolo Modbus TCP ou Modbus RTU. O software foi desenvolvido visando os padrões ANSI C (*American National Standards Institute for the C programming language*) e POSIX (*Portable Operating System Interface*), especificado pela ISO/IEC 9945 (ISO/IEC/IEEE 9945:2009), o que torna o software compatível com a maioria dos compiladores.

O software de visualização do diagnóstico, por sua vez, tem o objetivo de monitorar, controlar e extrair informações do software embarcado, através de protocolos proprietários. Estes protocolos estão na camada de aplicação do modelo de referência OSI (camada 7) e rodam sobre TCP/IP. Dentre as informações extraídas do software embarcado estão registros de sinais sob demanda em altas taxas de amostragem, registros periódicos em baixa taxa de amostragem e registros sequenciais de eventos. O software desktop é desenvolvido sobre as bibliotecas e plataformas já consolidadas no pacote de software comercial da AQTech, que permitem também a visualização de dados de forma instantânea, a parametrização do software embarcado e outras funcionalidades. O software para visualização de diagnóstico é programado em linguagem C# em ambiente Microsoft Visual Studio para execução em plataforma Windows.

3.0 – APLICAÇÕES DO PROTÓTIPO: IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DO GERADOR SÍNCRONO

A identificação dos parâmetros do gerador síncrono assegura a modelagem correta para estudos de desempenho do sistema. Os parâmetros reais de um gerador podem ser desconhecidos ou apresentar erros com relação aos parâmetros originais, decorrente do desgaste natural do equipamento ao longo da sua vida útil. Ensaaios durante o comissionamento, para identificar os parâmetros ou validar dados de fabricante, ou identificação periódica são então necessários para manter os parâmetros atualizados.

Adicionalmente, variações significativas com relação a parâmetros de referência podem indicar falhas incipientes. Métodos de detecção de falhas podem ser classificados em métodos baseados na extração de características no domínio do tempo ou frequência e métodos baseados em modelos de referência [1].

No primeiro caso, características são extraídas dos sinais medidos e comparadas com características normais de operação do equipamento e discrepâncias são usadas para avaliar a ocorrência de uma falha incipiente. Nesta categoria incluem-se o método de monitoramento de descargas parciais, de fluxo no entreferro e de análise do espectro de frequência [1]. Métodos baseados em modelos de referência comparam a resposta de um modelo com a obtida do equipamento através das medições. Discrepâncias entre estas respostas são associadas a variações de parâmetros da máquina, que podem então ser um indicativo de falha [1]. O método de identificação descrito neste artigo é parte de um módulo que usa a abordagem por modelo de referência.

Os métodos de identificação de parâmetros podem ser classificados como *off-line* ou *on-line*. Nos métodos *off-line*, as medidas são obtidas com o gerador submetido a uma condição especial de operação, com a máquina desconectada da rede elétrica [2], em condição de curto circuito nos terminais da máquina ou na rede elétrica [3], e rejeição de carga [4], resultando em interrupção da geração. Nos métodos *on-line*, medidas de variáveis do gerador, em operação normal, são usadas. Com isso, além do apreciável impacto econômico associado à manutenção dos geradores em operação, estes métodos possibilitam a contínua validação dos modelos utilizados, conferindo maior confiabilidade e segurança na simulação da planta de geração nos segmentos de planejamento da operação, planejamento da expansão e operação em tempo real dos sistemas de potência. O método descrito neste artigo é um método *on-line* de identificação.

3.1 Modelo do Gerador Síncrono de Polos Salientes

Um modelo de quinta ordem considerando as dinâmicas do estator, rotor e dois enrolamentos amortecedores, descrito em termos dos parâmetros fundamentais, é usado [5-8].

O modelo é descrito por (1), onde o operador derivada $\frac{d}{dt}$ será simplificado pela notação ' p ' e ω_r é a velocidade síncrona da máquina. Como são consideradas perturbações muito pequenas, o valor de ω_r será fixado em $\omega_r = 2\pi f_n$, onde f_n é a frequência nominal da rede elétrica. As quantidades $v(t)$, $i(t)$ e $\varphi(t)$ são tensões instantâneas, correntes instantâneas e enlace dos fluxos, respectivamente. Todos os parâmetros e quantidades elétricas do rotor são referidas no estator, representadas pela notação ($'$) [6,8].

$$\begin{aligned}
 v_d(t) &= -R_s i_d(t) + p\varphi_d(t) - \omega_r \varphi_q(t) & \varphi_d(t) &= -L_d i_d(t) + L_{md}[i_f'(t) + i_D'(t)] \\
 v_q(t) &= -R_s i_q(t) + p\varphi_q(t) + \omega_r \varphi_d(t) & \varphi_q(t) &= -L_q i_q(t) + L_{mq} i_Q'(t) \\
 v_f'(t) &= R_f' i_f'(t) + p\varphi_f'(t) & \varphi_f'(t) &= L_f' i_f'(t) + L_{md}[i_D'(t) - i_d(t)] \\
 v_D'(t) &= R_D' i_D'(t) + p\varphi_D'(t) & \varphi_D'(t) &= L_D' i_D'(t) + L_{md}[i_f'(t) - i_d(t)] \\
 v_Q'(t) &= R_Q' i_Q'(t) + p\varphi_Q'(t) & \varphi_Q'(t) &= L_Q' i_Q'(t) - L_{mq} i_q(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde R_s é a resistência de fase do estator, L_d é a indutância própria de eixo direto, L_q é a indutância própria de eixo em quadratura, L_l é a indutância de dispersão, L_{md} é a indutância de magnetização de eixo direto, L_{mq} é a indutância de magnetização de eixo em quadratura, R_f é a resistência de campo de eixo direto, L_f é a indutância própria do campo de eixo direto, L_D é a indutância própria do enrolamento amortecedor de eixo direto, L_Q é a indutância própria do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura, R_D é a resistência do enrolamento amortecedor de eixo direto e R_Q é a resistência do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura.

3.2 Método de Identificação de Parâmetros

Diversas técnicas, que permitem o monitoramento de parâmetros de uma máquina síncrona, partem do pressuposto que o ângulo de carga $\delta(t)$ é um sinal conhecido [9,10]. Na prática, contudo, este sinal não é de fácil medida. Poucos trabalhos realizam a identificação dos parâmetros do gerador sem a necessidade do conhecimento do ângulo de carga $\delta(t)$ [11,12]. Existem soluções na literatura que consideram o ângulo $\delta(t)$ através de instalação de sensores [13], cálculos indiretos que necessitam do conhecimento prévio de alguns parâmetros (normalmente a indutância de eixo em quadratura e a resistência de fase do estator) [14] e métodos não convencionais [15], os quais envolvem análises de harmônicas e sensores para o campo eletromagnético. O método descrito neste artigo evita o uso direto do ângulo de carga $\delta(t)$.

3.2.1 Análises e Simplificações do Modelo do Gerador Síncrono de Polos Salientes

Para o processo de identificação de parâmetros, são feitas algumas simplificações no modelo apresentado em (1) de modo a eliminar o ângulo de carga $\delta(t)$ do equacionamento da máquina síncrona, evitando a necessidade da sua medição, que geralmente não está disponível.

Para obter uma formulação independente de $\delta(t)$, parte-se do pressuposto que o gerador está conectado à rede elétrica e opera com variações lentas de carga. Neste caso, as dinâmicas do estator e dos enrolamentos amortecedores podem ser desconsideradas [7]. O conjunto de equações (1) é reduzido para três equações:

$$\begin{aligned} v_d(t) &= -R_s i_d(t) + \omega_r L_q i_q(t) \\ v_q(t) &= -R_s i_q(t) - \omega_r L_d i_d(t) + \omega_r L_{md} i_f'(t) \\ v_f'(t) &= R_f' i_f'(t) \end{aligned} \quad (2)$$

A partir destas equações e utilizando algumas relações e conceitos apresentados em [6,8], é possível definir expressões associadas com a corrente e a tensão de campo, independentes do ângulo $\delta(t)$.

$$i_f^{modelo}(t) = m_1 \left(\frac{m_2(t)}{\sqrt{m_3(t)}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{v_f(t)}{i_f(t)} = \left(\frac{R_{f(pu)} S_n}{(L_{md(pu)} i_{f(nominal)})^2} \right) \quad (4)$$

Onde:

$$\begin{aligned} -m_1 &= \frac{i_{f(nominal)} \omega_{base}}{\omega_r V_{s(base)}}, \\ -m_2(t) &= L_{s(base)}^2 L_d(pu) L_q(pu) \omega_r^2 I_t^2(t) + Z_{s(base)}^2 R_{s(pu)}^2 I_t^2(t) + 2V_t(t) I_t(t) R_{s(pu)} Z_{s(base)} \cos(\vartheta(t)) + \\ &V_t(t) I_t(t) \omega_r (L_d(pu) + L_q(pu)) L_{s(base)} \sin(\vartheta(t)) + V_t^2(t); \\ -m_3(t) &= L_{s(base)}^2 L_q(pu) L_q(pu) \omega_r^2 I_t^2(t) + Z_{s(base)}^2 R_{s(pu)}^2 I_t^2(t) + 2V_t(t) I_t(t) R_{s(pu)} Z_{s(base)} \cos(\vartheta(t)) + \\ &V_t(t) I_t(t) \omega_r (L_q(pu) + L_d(pu)) L_{s(base)} \sin(\vartheta(t)) + V_t^2(t). \end{aligned}$$

Em (3) e (4), $I_t(t)$ é o módulo do fasor da corrente terminal e $V_t(t)$ é o módulo do fasor de tensão terminal, calculados com base nos valores instantâneos das fases a , b e c de corrente e tensão do estator, respectivamente. Além disso, $\vartheta(t)$ é o ângulo do fator de potência, obtido a partir das potências ativa $P(t)$ e reativa $Q(t)$.

As variáveis envolvidas em (3) e (4) são medidas de tensão, corrente e potência comumente obtidas pelos sistemas de aquisição de dados, sem a necessidade da medição do ângulo $\delta(t)$. Estas duas relações são a base para o algoritmo de identificação desenvolvido, descrito a seguir, onde todas as variáveis medidas são consideradas em unidades reais e todos os parâmetros são considerados no sistema $p.u.$, como definido em [8].

3.2.2 Algoritmo de Identificação de Parâmetros

A identificação de parâmetros é tratada como um problema de otimização, baseado na minimização da diferença entre as saídas do modelo e do sistema real, para entradas conhecidas. O método de identificação envolve três etapas:

1. A partir dos registros de tensão terminal $V_t(t)$, corrente terminal $I_t(t)$, potência ativa $P_t(t)$ e potência reativa $Q_t(t)$ pode-se utilizar $i_f^{modelo}(t)$, calculado através de (3), o qual é comparado com registros de $i_f^{real}(t)$. Os parâmetros R_s , L_d e L_q são estimados resolvendo o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N [i_{f,i}^{real} - i_{f,i}^{modelo}]^2 \\ \text{s.a.:} \quad [(R_s - L_q) (R_s - L_d) (L_q - L_d)]^T \leq 0 \\ \mathbf{P}_{min} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

onde N é o número de registros coletados [16], \mathbf{P} é o vetor de parâmetros que devem ser estimados nesta etapa, dado por $[R_s \ L_q \ L_d]^T$, e \mathbf{P}_{min} e \mathbf{P}_{max} são os vetores com os valores mínimos e máximos de \mathbf{P} , respectivamente, utilizados para diminuir a região de convergência dos parâmetros estimados. A primeira desigualdade nas restrições reflete relações físicas de valor entre parâmetros e a segunda reflete limites máximos e mínimos destes parâmetros.

2. Com os registros da corrente de campo $i_f^{real}(t)$, tensão de campo $v_f^{real}(t)$ e da relação exposta em (4) estima-se R_f e L_{md} resolvendo o seguinte problema de otimização:

$$\min \sum_{i=1}^N \left[\frac{v_f^{real}(t)}{i_f^{real}(t)} - \frac{R_f S_n}{(L_{md} i_{f(nominal)})^2} \right]^2 \quad (6)$$

$$\text{s.a.: } [R_f - L_{md}] \leq 0$$

$$\mathbf{G}_{min} \leq \mathbf{G} \leq \mathbf{G}_{max}$$

onde \mathbf{G} é o vetor de parâmetros que devem ser estimados, dado por $[R_f \ L_{md}]^T$, e \mathbf{G}_{min} e \mathbf{G}_{max} são os vetores com os valores mínimos e máximos de \mathbf{G} , respectivamente, utilizados para diminuir a região de convergência dos parâmetros estimados nesta etapa. A primeira desigualdade nas restrições reflete relações físicas de valor entre parâmetros e a segunda reflete limites máximos e mínimos dos parâmetros estimados.

3. Estimado os valores de L_d e L_{md} , pode-se calcular L_l a partir da relação $L_d = L_{md} + L_l$. Então, utilizando a igualdade $L_q = L_{mq} + L_l$ encontra-se L_{mq} .

3.2.3 Solução dos Problemas de Otimização

Para resolver os problemas de otimização apresentados em (5) e (6), faz-se uso do Método dos Pontos Interiores Primal-Dual, o qual permite tratar os problemas de minimização considerando o uso de restrições de desigualdade, que neste caso estão associadas aos limites impostos às variáveis estimadas [17]. A versão primal-dual convencional é caracterizada pela rapidez de convergência, robustez e confiabilidade [18].

3.3 Identificação utilizando dados sintéticos

Um teste inicial do algoritmo proposto é realizado usando dados sintéticos. Atualmente, o protótipo ainda está em fase de implantação na usina e os dados reais ainda não estão disponíveis. Com os dados obtidos por simulação, onde os parâmetros reais são conhecidos, é possível validar o método de identificação desenvolvido.

3.3.1 Dados iniciais para simulação

Os dados sintéticos foram gerados através de simulações do gerador síncrono de polos salientes, considerando uma máquina que apresenta potência nominal S_n de 187 MVA, tensão nominal de linha V_n de 13,8 kV, frequência nominal f_n de 60 Hz e corrente nominal de campo $i_{f(nominal)}$ de 1087 A. Os parâmetros fundamentais do gerador síncrono são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros em p.u. do Gerador Síncrono de Polos Salientes para Simulação

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
R_s	0,0029	L_{md}	1,1907	L_D	1,3723
L_d	1,3050	L_{mq}	0,3596	L_Q	0,7433
L_q	0,4740	R_f	0,0006	R_D	0,0117
L_l	0,1144	L_f	1,3043	R_Q	0,0197

A máquina é conectada a um barramento infinito por um transformador elevador de 13,8kV/230kV. A simulação é realizada com a máquina inserindo 70% de sua potência nominal, ou seja, cerca de 131MW. A frequência de amostragem é de 20kHz e o tempo de simulação é de 40 segundos. Pequenas perturbações são aplicadas à tensão de campo $v_f(t)$ para simular as perturbações naturais na operação normal da máquina síncrona conectada à rede elétrica.

3.3.2 Resultados

Para a validação do método, as simulações são realizadas a partir do software *MATLAB/SIMULINK*, com auxílio do *Toolbox SimPowerSystems*.

Aplica-se o método de identificação ao conjunto de dados sintéticos obtidos a partir da simulação. Os parâmetros são determinados em poucos segundos em arquiteturas modernas e estão apresentados na Tabela 2.

O cálculo do módulo do erro absoluto percentual da estimação dos parâmetros é dado por

$$|Erro(\%)| = 100 \times \frac{(x - \hat{x})}{x} \quad (7)$$

Onde:

- x é o valor em *p.u.* utilizado na simulação;
- \hat{x} é o valor estimado em *p.u.* a partir do método proposto.

Tabela 2 - Identificação dos Parâmetros - Pequenas Perturbações na Tensão de Campo.

Parâmetros	Valor Simulado	Valor Estimado	Módulo do Erro (%)
R_s	$2,9069 \times 10^{-3}$	≈ 0	-
L_d	1,3050	1,3125	0,5734
L_q	0,4740	0,4735	0,1126
L_l	0,1144	0,1212	5,9942
L_{md}	1,1907	1,1913	0,0527
L_{mq}	0,3596	0,3523	2,0543
R_f	$5,7947 \times 10^{-4}$	$5,8008 \times 10^{-4}$	0,1053

Observa-se uma boa estimativa para o conjunto de parâmetros. Os valores de L_l e L_{mq} apresentam os maiores desvios, não ultrapassando um limiar de 6%. Os parâmetros L_d , L_q e L_{md} apresentam desvios relativamente pequenos, inferiores a 1%, fornecendo assim uma boa estimativa destes parâmetros. Contudo, o método não conseguiu determinar o valor de R_s , uma vez que seu valor tende para o limite inferior da restrição de desigualdade, que é aproximadamente zero.

4.0 – CONCLUSÕES

O protótipo de aquisição de dados descrito neste artigo permite a monitoração da função geração e identificação dos parâmetros do gerador a partir de dados de medições realizadas durante a operação normal da máquina. A identificação dos parâmetros do gerador permite ainda a predição de falhas usando uma abordagem por modelo de referência.

O algoritmo para identificação de parâmetros do gerador desenvolvido apresenta boas estimativas dos parâmetros L_d , L_q , L_{md} , L_{mq} , L_l e R_f . A vantagem do método proposto é que não há necessidade da medição do ângulo de carga $\delta(t)$ para realizar a estimação dos parâmetros, sendo necessárias apenas medições simples de potência ativa, reativa, tensões instantâneas de fase, correntes instantâneas de fase, corrente de campo e tensão de campo, que são facilmente obtidas durante a operação normal da máquina.

Na sequência deste projeto, o algoritmo de identificação de parâmetros descrito deve ser estendido para estimar os parâmetros R_D , R_Q , L_D , L_Q e L_f . A validação deste algoritmo final junto com os dados reais da usina, a serem fornecidos pelo protótipo de aquisição de dados que está em fase de instalação, permitirá então o desenvolvimento de uma metodologia de detecção de falhas em geradores síncronos com base na monitoração de parâmetros.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FREITAS, F. L. et al. *Diagnóstico de hidrogeradores a partir do monitoramento permanente em tempo real de parâmetros da função geração*. VII ENAM – Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- [2] HASNI, M. et al. *Synchronous machine parameter identification in frequency and time domain*. Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 51-69, 2007.
- [3] CARI, E. P. T.; LANDGRAF, T. G.; ALBERTO, L. F. C. *A constrained minimization approach for the estimation of parameters of transient generator models*. Electric Power Systems Research, vol. 143, pp. 252-261, 2017.

- [4] RODRIGUES, G. G.; SILVA, A. S.; ZENI JR., N. *Identification of synchronous machine parameters from field flashing and load rejection tests with field voltage variations*. Electric Power Systems Research, vol. 143, pp. 813-824, 2017.
- [5] ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [6] KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O., SUDHOFF, S. D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [7] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [8] MATHWORKS. *Synchronous machine*. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html>>. Acesso em: 7 mar. 2017.
- [9] KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T. *Synchronous machine parameter estimation using a visual platform*. Energy Conversion, IEEE Transactions on, pp. 1381-1386, 2001.
- [10] KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T.; VITTAL, V. *On-line estimation of synchronous generator parameters using a damper current observer and a graphic user interface*. Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 3, pp. 499-507, 2004.
- [11] KARRARI, M.; MALIK, O. P. *Identification of physical parameters of a synchronous generator from online measurements*. Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 2, pp. 407-415, 2004.
- [12] RASOULI, M.; LAGOA, C. *A nonlinear term selection method for improving synchronous machine parameter estimation*. Electrical Power and Energy Systems, vol. 85, pp. 77-86, 2017.
- [13] AGRAWAL, V. K.; RAGHURAM, P. R.; KUMAR, S. P. *Load angle measurement using scada a unique tool for grid operation*. 2005.
- [14] SUMINA, D.; SALA, A.; MALARIÉ, R. *Determination of load angle for salient-pole synchronous machine*. Measurement Science Review, vol. 10, no. 3, pp. 89-96, 2010.
- [15] YAN, D. et al. *On-line measurement for power angle and circuit parameter in the turbo steam generator with the fem based*. Proceedings of IEEE TENCON, pp. 2038-2041, 2002.
- [16] ZWOLAK, J. W.; BOGGS, P. T.; WATSON, L. T. *Odrpack95: A weighted orthogonal distance regression code with bound constraints*. 2004.
- [17] NOCEDAL, S. J.; WRIGHT, J. *Numerical Optimization*. New York: Springer, 2006.
- [18] EL-BAKRY, A. S. et al. *On the formulation and theory of the newton interior-point method for nonlinear programming*. Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 89, pp. 507-541, 1996.

6.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Fabrizio Leal Freitas (*) nasceu em São Paulo/SP (1977) e é mestre em Engenharia de Produção (UFSC, 2010), graduado em Engenharia de Produção Elétrica (UFSC, 2005) e técnico em eletrônica (SATC, 1994). Desde 2003 trabalha com gestão de desenvolvimento de produtos inovadores em empresas de base tecnológica, especializado no projeto de sistemas de monitoramento e diagnóstico de geradores de energia elétrica. Atuou como pesquisador e coordenador em projetos de P&D financiados por entidades como CNPq, FAPESC e no programa ANEEL de P&D em cooperação com empresas do setor elétrico. Atualmente é gerente de Pesquisa & Desenvolvimento da AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.