



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

CB/GGH/15

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 1

GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRAULICA - GGH

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS ATRAVÉS DO ENSAIO SSFRT E REDES NEURAIS

**Kornrumpf, L. H. D.
EPUSP/UNINOVE**

**Nabeta S. I.
EPUSP**

RESUMO

O ensaio de resposta em frequência em geradores síncronos vem ganhando espaço nas últimas décadas, porém o alto custo dos equipamentos empregados para realização do ensaio ainda é um empecilho, tanto para fabricantes como para consumidores finais. Este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de obtenção de parâmetros, através do uso de redes neurais. Esta trata os resultados concebidos através de ensaios frequenciais, nos quais a proposta foi a utilização de equipamentos de baixo custo para a realização dos mesmos. Adicionalmente, foi proposto durante o desenvolvimento deste trabalho um processo de otimização da rede neural utilizada.

PALAVRAS-CHAVE

Máquinas síncronas, máquinas elétricas, ensaios elétricos, redes neurais

1.0 - INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma matriz energética composta em sua grande maioria por hidro geradores, 61% da potência total instalada (BIG, 2016). Composto em sua grande maioria por máquinas síncronas, torna-se inegável a importância de tais máquinas para o país.

Decorrido mais de um séculos do princípio dos estudos das máquinas síncronas (Blondel, 1913), (Adkins, 1957), entre outros, é possível afirmar que esta tecnologia se encontra bem embasada e amplamente estudada. Com os avanços tecnológicos, capacidade e velocidade de processamento de dados, através das últimas décadas, é possível o desenvolvimento de modelos mais complexos, que representam a máquina elétrica com maior fidelidade. Ainda é possível que análises sejam realizadas em diversas situações de operação da máquina síncrona e assim melhorar e garantir sua estabilidade durante a operação, esta que é regulada por rigorosos contratos de fornecimento de energia.

Devido ao elevado custo, a prototipagem de máquinas de grande porte torna-se inviável, sendo que em muitos casos o protótipo torna-se o produto final. Por essa razão a simulação através de modelos que reproduzam com fidelidade o funcionamento da máquina síncrona é indispensável, tanto nas fases de projeto quanto na operação. Por meio de ensaios consagrados, como curva de saturação em vazio e curto-circuito trifásico abrupto, é possível a determinação de diversos parâmetros que são utilizados nos modelos equivalentes das máquinas síncronas. No entanto tais ensaios não são recomendados para máquinas síncronas com tempo de operação elevado devido ao estresse magnético provocado pelo ensaio, que pode propiciar risco à máquina síncrona.

Nesse cenário, os ensaios estáticos, como o ensaio de resposta em frequência, SSFRT (Standstill frequency response test), onde um sinal de baixa amplitude, com uma banda de frequência que varia na ordem de mili-Hertz até algumas centenas de Hertz (IEEE115, 2009) é aplicado a uma série de configurações dos enrolamentos de

campo e armadura da máquina síncrona, que tem seu rotor posicionado segundo orientação do eixo que deseja-se realizar as medições e depois bloqueado para que mantenha a posição. Através dos resultados obtidos no ensaio é possível o desenvolvimento de modelos de ordem superior, mais detalhados, bem como a observação de diversas situações de operação da máquina síncrona.

Dessa forma neste trabalho é proposta uma metodologia de ajuste de curva para obtenção de parâmetros da máquina síncrona ensaiada com um arranjo de baixo custo (Souza, 2011).

Por não oferecer estresse magnético à máquina síncrona e ainda fornecer reatâncias, tanto no eixo direto, como no eixo em quadratura, tanto em regime permanente como nos regimes transitórios e subtransitórios, o ensaio estático de resposta em frequência é de fundamental interesse tanto para fabricantes de máquinas síncronas, quanto para proprietários de geradores síncronos.

2.0 - ENSAIOS TRADICIONAIS

2.1 Ensaio de curto circuito trifásico brusco

O ensaio de curto circuito trifásico brusco é considerado um ensaio tradicional aplicado a geradores síncronos, para obtenção de parâmetros elétricos, seja em regime permanente, transitório ou subtransitário, porém somente é possível a obtenção de parâmetros relativos ao eixo direto do gerador síncrono.

Coloca-se o gerador em vazio, subexcitado e em velocidade síncrona (IEEE 115, 2009), então curto circuita-se as três fases do enrolamento de armadura simultaneamente e registra-se o comportamento das correntes de fase e através desse registro é possível a obtenção das reatâncias de eixo direto X_d , X'_d e X''_d .

As desvantagens desse tipo de ensaio são, o estresse eletromecânico ao qual o gerador síncrono é submetido e não ser possível a obtenção de parâmetros no eixo de quadratura.

2.1 Ensaio de rejeição de carga

Por meio do ensaio de rejeição de carga é possível a obtenção de parâmetros tanto no eixo direto quanto no eixo em quadratura, isto pode ser feito analisando o alinhamento do fluxo magnético entre estator e rotor no momento de realização do ensaio.

Para realização do ensaio o gerador deve estar conectado à rede fornecendo potência reativa, indutiva ou capacitiva. Então repentinamente desconecta-se o gerador e através da queda de tensão nos terminais e da corrente de campo, são obtidos X_d , X'_d , X''_d , $T'd_0$ e $T''d_0$ para o eixo direto e X_q e X''_q para o eixo em quadratura. É costume realizar o ensaio com eixo arbitrário, monitorando o ângulo de carga e depois realizar a separação. As desvantagens desse ensaio estão na regulação da tensão de excitação em níveis constantes e também o monitoramento do ângulo de carga.

3.0 - ENSAIO EM FREQUÊNCIA

3.1 Ensaio de resposta em frequência com rotor em repouso

É um método no qual é possível estimar parâmetros do gerador síncrono, tanto no eixo direto como no eixo em quadratura. Com o rotor em repouso e travado, aplica-se sinal de baixa potência nos enrolamentos do gerador síncrono e os parâmetros são obtidos através de funções de transferência obtidas no ensaio, (Bortoni, 1998).

Um gerador de funções é utilizado para fornecer tensões alternadas com um range de frequência que varia de 0.001 Hz até 1000 Hz e através de um sistema de aquisição de dados são obtidos valores de tensão e corrente.

Os parâmetros do gerador síncrono são obtidos através de indutâncias operacionais $L_d(s)$ e $L_q(s)$. Após o ensaio é necessário a utilização de algoritmos de aproximação de curva para igualar as constantes de tempo com os valores obtidos do ensaio.

3.2 Ensaio de resposta em frequência em tempo real

No ensaio de resposta em frequência em tempo real o gerador síncrono é colocado em operação com valores nominais, com alta impedância o que garante a estabilidade do sistema. Aplicam-se então sinais senoidais à excitação do gerador e diversos parâmetros são monitorados. Através de parâmetros calculados do gerador e técnicas de minimização de diferenças os parâmetros do modelo são obtidos.

3.3 Impedâncias operacionais

Por meio das impedâncias operacionais é possível representar o gerador síncrono de maneira alternativa, evitando assim relacionar grandezas rotóricas como correntes de campo e amortecimento. (Concordia, 1951)

Por meio do desenvolvimento matemático utilizando a teoria do duplo-eixo chega-se as seguintes equações:

$$\psi_d = G(s)e_{fd} - L_d(s)i_d \quad (1)$$

$$\psi_q = -L_q(s)i_q \quad (2)$$

$G(s)$, $L_d(s)$ e $L_q(s)$, representam funções de transferência.

$$L_d(s) = \left. \frac{\psi_d}{i_d} \right|_{e_{fd}=0} \quad (3)$$

$$L_q(s) = \frac{\psi_q}{i_q} \quad (4)$$

$$G(s) = \left. \frac{\psi_d}{e_{fd}} \right|_{i_d=0} \quad (5)$$

Porém devido a necessidade do fluxo concatenado essa formulação não é muito aplicável, então funções de transferência adicionais e impedâncias operacionais são necessárias (IEEE 115, 2009):

$$Z_d(s) = R + sL_d(s) = \left. \frac{e_d}{i_d} \right|_{e_{fd}=0} \quad (6)$$

$$Z_q(s) = R + sL_q(s) = -\frac{e_q}{i_q} \quad (7)$$

$$G(s) = \left. \frac{e_d}{s e_{fd}} \right|_{i_d=0} \quad (8)$$

$$sG(s) = \left. \frac{i_{fd}}{i_d} \right|_{e_{fd}=0} \quad (9)$$

$$Z_{af0} = \left. \frac{e_{fd}}{i_d} \right|_{i_{fd}=0} \quad (10)$$

$$Z_{fa0} = \left. \frac{e_d}{i_{fd}} \right|_{i_d=0} \quad (11)$$

Agora tem-se relações que são dependentes de grandezas que podem ser medidas nos enrolamentos de armadura e campo. As impedâncias operacionais de eixo direto e de quadratura agora dependem de suas tensões e correntes e função da frequência.

$$L_d(s) = \frac{(1 + T'_{d0}s)(1 + T''_{d0}s)}{(1 + T'_{d0}s)(1 + T''_{d0}s)} L_d \quad (12)$$

$$L_q(s) = \frac{(1 + T'_{q0}s)}{(1 + T''_{q0}s)} L_q \quad (13)$$

$$G(s) = \frac{(1 + T_{kd}s)}{(1 + T'_{d0}s)(1 + T''_{d0}s)} \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \quad (14)$$

Então é possível trabalhar os polos e zeros da função relacionando os ao diagrama da Figura 1. (Adkins, 1957)

É possível então extrair os valores de L_d em baixas frequências no primeiro patamar, os valores de L'_d em frequências médias no patamar intermediário e os valores de L''_d em frequências altas no terceiro e último patamar ver Figura 1.

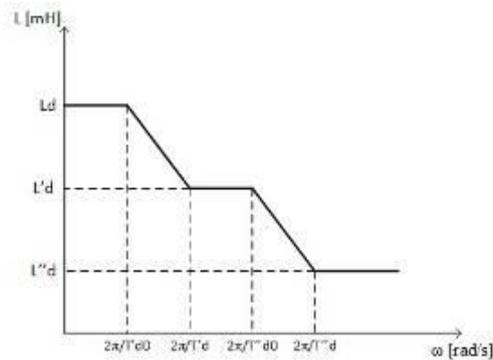


FIGURA 1 – Diagrama de Bode para $L_d(s)$
Fonte: IEEE: 2009

4.0 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para o experimento foi utilizado um inversor de frequência de uso comercial em substituição ao gerador de frequências visando a redução de custo do ensaio. Um filtro passa-baixa foi implementado no circuito para redução de harmônicos devido ao uso do inversor e para aquisição de dados, foram utilizados equipamentos comuns de laboratório. (Souza, 2011)

O Gerador síncrono ensaiado tem potência de 2 kVA, nn 1800 rpm, 60 Hz conectado em duplo-estrela com tensão e corrente nominais nessa configuração de 230 V e 5 A.

4.1 Resultados do ensaio

Obteu-se um total de 35 pontos de medição e foram anotados valores de frequência tensão e corrente. Com os valores de tensão e corrente obtidos calculou-se a impedância da armadura.

$$Z_{arm} = \frac{V_{arm}}{I_{arm}} \quad (15)$$

Para a impedância de eixo direto é necessário considerar apenas uma bobina do enrolamento, logo:

$$Z_d = \frac{Z_{arm}}{2} \quad (16)$$

Com objetivo de manter a resistência do enrolamento com valor constante durante a realização do ensio procurou-se manter constante a temperatura do enrolamento.

$$X_d = \sqrt{Z_d^2 - R_a^2} \quad (17)$$

A indutância é então definida por:

$$L_d = \frac{X_d}{\omega} \quad (18)$$

Devido a limitações do inversor de frequência o range de frequência abrangidos pelo ensaio foi definido entre 0,7 Hz até 120 Hz ver Figura 2

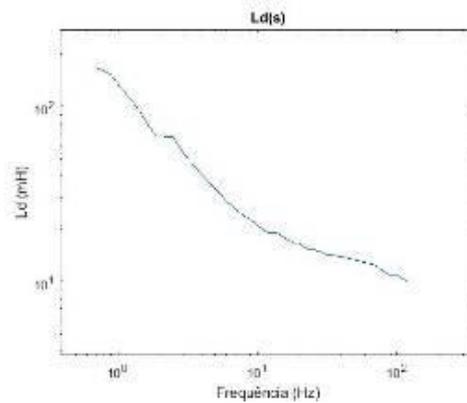


FIGURA 2 – Curva Frequência x Ld(s) (35 pontos)

4.2 Rede Neural

Utilizando-se redes neurais desenvolveu-se uma metodologia para, dentro do intervalo de dados obtido no ensaio, aumentar o número de pontos de ensaio, buscando com isso facilitar o ajuste da curva utilizando-se a equação 12 e assim encontrar seus pólos e zeros, pelos quais serão obtidos os valores de $L'd(s)$ e $L''d(s)$.

Adicionalmente a processo de expansão do número de pontos de ensaio, foi desenvolvido uma metodologia para otimização do número de neurônios utilizados nas camadas intermediárias ocultas da rede neural. As entradas e saídas da rede neural foram definidas como mostrado na Tabela 1.

TABELA 1 – Definição de entradas e saídas da rede neural.

Entrada	Saída
Frequência	Ld (indutância operacional de eixo direto)

4.2.1 Otimização da rede neural

Com objetivo de melhorar a performance da rede neural e prevenir a memorização dos dados de treinamento, *overfitting*, neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia de otimização para processo de construção da rede neural. Segundo Haykin (2001), a utilização de diversas camadas ocultas em redes neurais pode não ser vantajoso para o processo de treinamento, então no desenvolvimento deste trabalho foram propostos dois cenários. Para ambos os cenários e ambas situações foram estabelecidos critérios de controle para a otimização.

O tipo de rede utilizada foi a *feed-forward backpropagation* (Nunes, 2011) (Haykin, 2001) e a função de treinamento foi a *Gradient descent with momentum and adaptive learning rate backpropagation*. Utilizando o software Matlab® a rede foi treinada com um conjunto de dados equivalente a 88% da base de dados. Ao término de cada treinamento a rede era simulada com os dados de entrada dos 12% de dados restantes da base de dados, e a saída da rede neural (Ld) era comparada com o valor de Ld obtido no ensaio pertencente aos 12% da massa de dados restante.

Esse processo foi repetido até que o erro entre os dados fornecidos pela rede treinada e os 12% originais da massa de dados atingisse valor inferior a 2%. Os resultados do processo de otimização podem ser vistos na Tabela 2.

TABELA 2 – Resultados obtidos com o processo de otimização da rede.

Cenário	Número de camadas ocultas	Número máximo de neurônios por camada oculta	Erro (%)
1	3	100	14.5
1	3	50	10.2
2	2	100	2.3
2	2	50	1.3

A configuração da rede neural que apresentou melhores resultados pode ser vista na Figura 3.

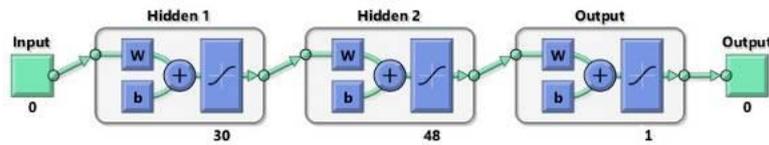


FIGURA 3 – Rede neural resultante do processo de otimização

4.3 Ajuste de curva

Com os novos valores de L_d , utilizou-se a equação 12 para calcular L_d segundo os diversos pontos de frequência, que foram utilizados como entrada da rede neural.

Tanto os valores de L_d obtidos pela equação 12, quanto os valores de L_d obtidos pela rede neural foram submetidos a um processo de linearização de dados, esse processo é necessário para que se possa calcular o desvio quadrático entre eles, então com o auxílio de uma rotina evolucionária do software Microsoft Excel®, foi realizada a minimização da somatória de desvios onde as variantes para tal minimização eram os valores de constante de tempo da equação 12, dessa maneira é realizado o ajuste de curva da indutância de eixo direto L_d e assim determinadas as constantes de tempo bem como os valores de L_d' e L_d'' .

5.0 - RESULTADOS

Através dos processos apresentados no item anterior foram obtidos os valores de $T'd$, $T''d$, $T'd0$, $T''d0$, $L'd$ e $L''d$ apresentados na Tabela 3 e Tabela 4.

TABELA 3 – Constantes de tempo

$T'd$	0.01
$T''d$	0.0042
$T'd0$	0.057
$T''d0$	0.0094

TABELA 4 – $L'd$ e $L''d$

Ensaio	
$L'd$	16.36
$L''d$	9.97

Uma comparação dos valores obtidos através da metodologia proposta com o ensaio de curto-circuito trifásico é apresentada nas Tabela 5 e Tabela 6.

TABELA 5 – Comparação entre métodos

Método	$T'd0(s)$	$T'd(s)$	$T''d0(s)$	$T''d(s)$
Ensaio de Curto-Circuito Trifásico Abrupto	-----	0,0120	-----	0,0060
Ensaio Estático de Resposta em Frequência (ajuste de curva, redes neurais)	0,057	0,01	0,0094	0,0057
Desvio (%)		20		5,2

TABELA 6 – Comparação entre métodos

Método	$L'd (mH)$	$L''d (mH)$
Ensaio de Curto-Circuito Trifásico Abrupto	16,15	11,83
Ensaio Estático de Resposta em Frequência (ajuste de curva, redes neurais)	16,36	9,97
Desvio (%)	1,3	18,6

Observa-se um desvio máximo de 20% entre os valores do ensaio de curto-circuito e da metodologia proposta, o que pode ser considerado aceitável, haja vista que a extração de parâmetros pelo ensaio de curto-circuito brusco é baseada em metodologia gráfica, na qual, principalmente na região subtransitória, há poucos pontos de medição disponíveis.

6.0 - CONCLUSÃO

A metodologia de ensaio de resposta em frequência proposta pela norma IEEE 115 – 2009, utiliza equipamentos específicos e de elevado custo, já a metodologia proposta utilizando o inversor de frequência de uso comercial

(Souza, 2011) para gerar os sinais senoidais necessários para realização do ensaio reduz o custo do ensaio com equipamentos. Porém a utilização de equipamentos de menor qualidade, requer que os resultados do ensaio sejam tratados por uma combinação de algoritmos que consigam suprir de maneira satisfatória o uso de equipamentos não específicos para determinado fim. A proposta do trabalho foi atendida, já que ao compararmos os valores das constantes de tempo com valores obtidos em ensaios tradicionais encontram-se dentro de valores aceitáveis para a proposta.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE 115. Test Procedures for Synchronous Machines. – IEEE - New York de 2010.
- (2) ADKINS, B – The General Theory of Electrical Machines. – Chapman and Hall – London de 1957.
- (3) BLONDEL, A. E. – Synchronous Motors and Converters: Theory and methods of calculation and tests. – McGraw-Hill Book Company – New York de 1903.
- (4) BORTONI, E. C. – Modelagem de máquinas síncronas de polos salientes empregando técnicas de resposta em frequência. – Tese Doutorado – Universidade de São Paulo, 1998.
- (5) SOUZA, M. – Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelos ensaios de resposta em frequência: Proposta de metodologia com inversor de frequência. – Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo – 2011.
- (6) CONCORDIA, C. – Synchronous machines: theory and performance. – John Wiley & Sons. – London de 1951.
- (7) HAYKIN, S. – Redes neurais: princípios e prática. – Bookman. – Porto Alegre. de 2001.
- (8) DA SILVA, I. N., FLAUZINO R. A., SPATTI D. H. – Redes neurais artificiais para engenharia. – Artliber. – São Paulo. de 2011

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Luiz Henrique D. Kornrumpf, nascido em São Paulo, SP, em 1982, graduou-se Engenheiro Eletricista-Produção pelo Centro Universitário da FEI, 2012, Mestre pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 2016. Trabalhou com projeto de geradores síncronos na Voith Hydro em São Paulo. Atualmente é Professor Universitário na Universidade Nove de Julho.

Silvio Ikuyo Nabeta, nascido em São Paulo, SP, em 1960. Graduação e Mestrado pela Escola Politécnica da USP (EPUSP) em 1983 e 1990, respectivamente, e Doutorado pelo INPG-Institut National Polytechnique de Grenoble em 1994. Atuou como engenheiro de projetos de máquinas elétricas nas empresas Bardella- Borriello Eletromecânica, Engesa Elétrica, Emhart do Brasil e como pesquisador no IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Atualmente é Professor Titular do PEA-Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da EPUSP.