

ESTIMAÇÃO DA REATÂNCIA SÍNCRONA DE EIXO EM QUADRATURA EMPREGANDO O ENSAIO DE EXCITAÇÃO CONSTANTE

EDSON C. BORTONI, BRUNO T. ARAUJO, JOSÉ V. BERNARDES JR., PAULO V.V. SILVA, RAFAEL BRAGANÇA

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303 – CEP 37501-903 Itajubá-MG
E-mails: borton@unifei.edu.br

Abstract— This paper introduces the Constant Excitation Test to be applied in synchronous machines. The results obtained from this test allow the determination of the quadrature axis synchronous reactance of the salient pole synchronous machines. Despite standards presents methods for its determination, the proposed method is suitable for large installed machines. The method basis is described and it is applied to several existent hydro generators. The calculated quadrature axis synchronous reactances are compared to the values supplied by the manufacturers resulting in very good agreement. The appendix shows the quadrature axis location from the previous calculations results to obtain transient parameters from load rejection test.

Keywords— Synchronous machines, quadrature-axis synchronous reactance, parameter estimation.

Resumo— Este trabalho introduz o Ensaio de Excitação Constante aplicável às máquinas síncronas, a partir do qual pode-se determinar a reatância síncrona de eixo em quadratura em máquinas síncronas de polos salientes. Embora as normas apresentem métodos para a sua determinação, o método proposto é ideal para grandes máquinas instaladas em campo. As bases do método são descritas e é aplicado a vários geradores de centrais hidrelétricas. As reatâncias síncronas de eixo em quadratura são comparadas aos valores fornecidos por fabricantes, resultando em excelente conformidade.

Palavras-chave— Máquinas síncronas, reatância síncrona de eixo em quadratura, estimação de parâmetros.

1 Introdução

As máquinas síncronas são mundialmente empregadas em diversas plantas para a geração de energia elétrica. Desde o começo do século XX, esta tem sido estudada e modelada a fim de otimizar o seu projeto e suas condições operativas em regimes permanente e transitório.

A convergência da modelagem destas máquinas foi alcançada com a introdução da teoria da dupla reação de Park, na qual as indutâncias variáveis em coordenadas de fase eram substituídas por indutâncias constantes nas coordenadas $dq0$ (Krause et al., 2013).

Desde então, métodos para obtenção de parâmetros de eixo direto e quadratura – que são um conjunto de reatâncias e constantes de tempo para regimes permanente, transitório e sub-transitório – têm sido propostos. Os métodos mais bem sucedidos têm sido compilados e referenciados nas principais normas de ensaio de máquinas síncronas e determinação e parâmetros (IEEE, 2009; IEC, 2008).

Dentro dos parâmetros tradicionais, a reatância síncrona de eixo em quadratura é a mais difícil de ser obtida. Diferentemente da reatância síncrona de eixo direto que pode rapidamente ser obtida quando a máquina alimenta carga puramente reativa, a reatância de eixo em quadratura é obtida quando o fluxo principal é alinhado com o ponto médio entre dois polos consecutivos, isto é, em um carregamento especial no qual o ângulo do fator de potência tem o mesmo valor absoluto do ângulo de carga (Steven, 1961).

Felizmente, vários métodos padronizados permitem a obtenção da reatância síncrona de eixo q : Ensaio de baixo escorregamento, máxima excitação negativa, medição do ângulo de carga, rejeição de carga sob o eixo q , e resposta em frequência (Shepherd e Kilbourne, 1943). Entretanto, a grande maioria dos métodos normatizados são mais adequados às máquinas de pequeno porte, com grandes dificuldades de aplicação em grandes máquinas instaladas em campo.

No ensaio de baixo escorregamento é muito difícil de obter um escorregamento adequado em máquinas de polos salientes com enrolamentos amortecedores devido às correntes induzidas e torques pulsantes, que tendem levar a máquina ao sincronismo. Adicionalmente, altas tensões podem ser induzidas no circuito de campo e altas correntes nos amortecedores são induzidas para grandes escorregamentos (Darabi et al., 2014).

O ensaio de excitação negativa deve ser aplicado com extrema cautela. Posto que a corrente de armadura é inversa ao valor da reatância síncrona de eixo em quadratura, que em geral é menor que um p.u., ter-se-á uma corrente maior que a nominal, levando a máquina a operar fora da curva de capacidade.

A medição do ângulo de carga requer instrumentação especial (de Mello, 1994; Sumina et al. 2010). O ensaio de resposta em frequência necessita alinhamento exato com o eixo quadratura, o que pode conduzir a grandes erros em pequenas máquinas de laboratório ou apresentar dificuldade de aplicação em máquinas com grande número de pares de polo (Bortoni e Jardini, 2004).

Modelagem da máquina com suas dimensões físicas requer um profundo conhecimento do projeto, material aplicado, e construção (Canay, 1970). Técnicas recentes para identificação de parâmetros síncronos e transitórios envolvem respostas no domínio do tempo e da frequência (Wamkeue et al. 2011; Arjona et al. 2011; Kyriakides et al. 2005).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é introduzir o Ensaio de Excitação Constante e apresentar uma metodologia para estimar a reatância síncrona de eixo em quadratura a partir de simples medições de potências ativa e reativa, assumindo constante a excitação, e cálculos simplificados. O método proposto é adequado para máquinas médias e grandes instaladas em campo, quando a resistência da armadura pode ser desprezada.

Os resultados obtidos são úteis para avaliar considerações de projeto, validar informações de fabricantes, ou simplesmente reaver informações perdidas, virtualmente sem risco ou custo. Vários estudos de caso são apresentados com aplicação da metodologia proposta em máquinas com potências de 1,75 MVA a 823,5 MVA, testificando a adequabilidade do método.

2 O Ensaio de Excitação Constante

O Ensaio de Excitação Constante consiste em variar a potência ativa em uma máquina recém-sincronizada à rede, mantendo-se a corrente de excitação constante. Como consequência, observa-se uma redução da potência reativa com o aumento da potência ativa. Para cada valor de potência ativa, registram-se os valores de potência ativa, reativa e tensão. Considere o diagrama de potência ativa versus reativa de uma máquina síncrona descrito na Fig. 1. Neste diagrama, o ponto L é descrito por potências ativa e reativa, definindo o ângulo de fator de potência. Este ponto de carga também pode ser conectado ao ponto extremo V^2/X_q , definindo o ângulo de potência.

Adicionalmente, observam-se duas cordas neste diagrama, uma que tem comprimento a que vai de V^2/X_q à borda do semi-círculo, e outra com comprimento b que vai da borda do semi-círculo ao ponto L . As potências ativa e reativa podem ser descritas em função destas cordas:

$$P = (a + b) \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

$$Q = (a + b) \cdot \cos(\delta) - \frac{V^2}{X_q} \quad (2)$$

Onde:

$$a = \left(\frac{V^2}{X_q} - \frac{V^2}{X_d} \right) \cdot \cos(\delta) \quad (3)$$

$$b = \frac{EV}{X_d} \quad (4)$$

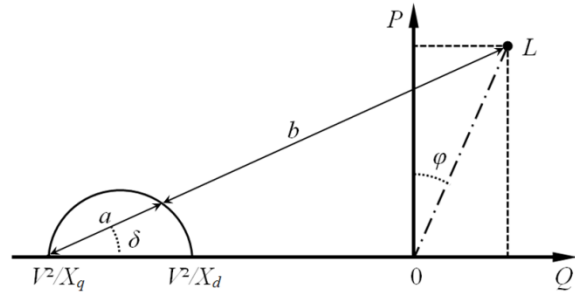


Figura 1. Diagrama de potências para máquina de polos salientes.

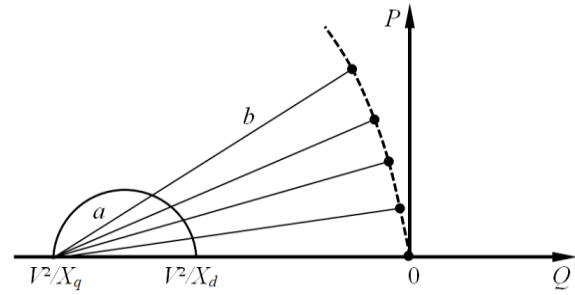


Figura 2. Lugar geométrico de potências para excitação constante.

Se uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito tem sua potência ativa aumentada, mantendo-se constante a corrente de excitação, de acordo com as equações acima, até ao limite de estabilidade, o ângulo de potência irá aumentar seguindo a potência ativa (1) e a potência ativa irá diminuir, posto que varia com o cosseno do ângulo de potência (2). Pela mesma razão, o valor de a irá diminuir (3).

Ainda, mantendo-se a corrente de campo constante, a tensão induzida na máquina (E) será constante. Considerando a situação em que o barramento é forte o suficiente para manter a tensão terminal constante, e desprezando pequenas variações em X_d , o valor de b não irá variar, mantendo o seu comprimento constante (4).

A linha tracejada na Figura 2 descreve a excursão do ponto de carga de um gerador sincronizado a um barramento infinito, tendo sua potência ativa aumentada por ação da máquina primária, mantendo sua corrente de excitação constante. Observa-se que enquanto a potência ativa aumenta, a reativa diminui. A excursão do ponto de carga é uma limaçon de Pascal, que é o lugar geométrico da potência complexa para corrente de campo constante.

Assim, ao Ensaio de Excitação Constante é realizado tão logo a máquina seja sincronizada ao sistema, com potências ativa e reativas nulas, e a corrente de excitação é aquela necessária para obter tensão nominal na curva de saturação em vazio. Tão logo a máquina seja sincronizada à rede, a excitação é colocada em modo de operação manual. A potência ativa é aumentada em passos de 10%, registrando-se os valores de tensão, potência ativa e potência reativa, estabelecendo um conjunto de pontos medidos.

3 Estimação da Reatância Síncrona de Eixo Q

As equações apresentadas mostram que os parâmetros correlacionados são potência ativa (P), potência reativa (Q), tensão terminal (V), tensão induzida (E), reatâncias de eixo direto (X_d) e de eixo quadratura (X_q), e ângulo de potência (δ). Destas sete variáveis, três são medidas (P , Q e V) e uma é dada (X_d), resultando em três incógnitas e apenas duas equações (1) e (2). Entretanto, se a tensão induzida (E) é mantida constante, como no Ensaio de Excitação Constante, restarão somente duas variáveis (δ e X_q), e o sistema poderá ser resolvido para um conjunto de equações. Depois de conduzir o Ensaio de Excitação Constante para várias potências ativas, ter-se-á disponível um conjunto de equações que pode ser resolvido matematicamente de várias formas. Em geral, a solução do sistema é encontrada tão logo uma função de mérito atinja seu valor mínimo. Métodos de otimização, equações simultâneas, ou mínimos quadrados podem ser usados para atingir este mínimo e obter um valor de X_q .

Deve-se notar que, embora a excitação seja mantida constante, o comprimento b poderá variar em função de variações na tensão terminal. Assim, o valor de b deverá ser conveniente corrigido com a tensão, resultando em b^* (6). Finalmente, a função de mérito é escolhida como uma medida da variação dos desvios destes valores corrigidos em relação à média (7). Um algoritmo simples para a determinação de X_q a partir de um conjunto de n pontos medidos é:

1. Adote $X_q = X_d$

2. Calcule o ângulo de potência para o i -ésimo ponto medido:

$$\delta_i = \text{ATAN}\left(\frac{P_i}{Q_i + V_i^2/X_q}\right) \quad (5)$$

3. A partir de (1) e (3), determine o valor corrigido b^* para todos os pontos:

$$b_i^* = \left[\frac{P_i}{\sin(\delta_i)} - \left(\frac{V_i^2}{X_q} - \frac{V_i^2}{X_d} \right) \cdot \cos(\delta_i) \right] \cdot \frac{1}{V_i} \quad (6)$$

4. Calcule a função de mérito, definida como o somatório dos quadrados das diferenças dos b_i^* em relação à média.

$$g_f = \sum_{i=1}^n (b_i^* - \bar{b}^*)^2 \quad (7)$$

5. Diminua o valor de X_q e retorne ao passo 2 até que a função de mérito atinja seu valor mínimo.

4 Estudos de Casos

O método proposto foi aplicado a várias máquinas de polos salientes de diferentes centrais e várias potências. As características nominais das máquinas testadas são apresentadas na Tabela 1, incluindo a informação dos parâmetros síncronos de eixo direto e quadratura disponíveis. O valor de X_d será usado no do algoritmo, enquanto o valor de X_q calculado será comparado ao valor fornecido.

Tabela 1. Características nominais de geradores testados.

Máquina	MVA	kV	Hz	FP	X_d	X_q
Furnas #2	160,0	15,0	60	0,95	0,859	0,581
Pehuenche #2	263,0	13,8	50	0,95	1,152	0,703
Itaipu #8	823,5	18,0	50	0,85	0,900	0,705
Itaipu #12	737,0	18,0	60	0,95	0,900	0,690
São Bernardo #1	1,750	6,60	60	0,75	1,461	1,115
Euclides Cunha #3	34,00	13,8	60	0,80	0,840	0,490
Joasal #4	2,000	6,60	60	0,85	1,130	0,795
Sogamoso #2	324,0	16,5	60	0,80	0,953	0,675

As medidas realizadas durante os testes são apresentadas nas tabelas a seguir e as reatâncias de eixo em quadratura calculadas são comparadas àqueles fornecidos pelos fabricantes.

2.1 UHE Furnas

O método foi aplicado à segunda unidade geradora da UHE Furnas, cujos resultados são mostrados na Tabela 2. O gráfico construído pelos pontos medidos e o semi-círculo de referência é mostrado na Figura 3. O valor de X_q calculado foi de 0,573 pu, que é 1,477% menor do que valor fornecido pelo fabricante.

Tabela 2. Medidas e valores calculados – Furnas #2.

P	Q	V	δ	b^*
0,092	0,014	1,020	2,873	1,203
0,168	0,004	1,020	5,255	1,201
0,267	-0,005	1,020	8,379	1,207
0,366	-0,024	1,020	11,548	1,211
0,444	-0,043	1,013	14,247	1,210
0,540	-0,083	1,007	17,753	1,201
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,573
Desvio do valor de referência (%)				-1,477

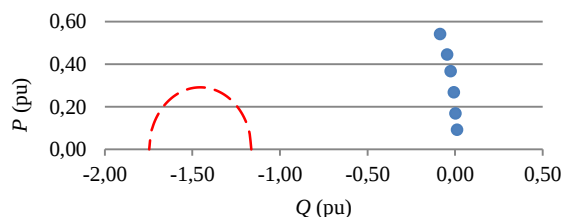


Figura 3. Potências para excitação constante – Furnas #2

2.2 UHE Pehuenche

A UHE Pehuenche é localizada no Chile. Medidas e resultados de cálculos são mostrados na Tabela 3. A Figura 4 apresenta os resultados gráficos. O valor de X_q obtido foi de 0,693 pu, que é 1,5% menor que o valor fornecido pelo fabricante.

2.3 UHE Itaipu

O Ensaio de excitação constante foi aplicado a uma máquina de 50 Hz e a uma máquina de 60 Hz. A tabela 4 mostra as medidas realizadas na unidade #8, 50 Hz, enquanto a tabela 5 mostra as medidas na unidade #12, de 60 Hz. Resultados gráficos são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Tabela 3. Medidas e valores calculados – Pehuenche #2.

P	Q	V	δ	b*
0,005	0,025	1,062	0,173	0,945
0,093	0,018	1,062	3,234	0,942
0,242	-0,021	1,055	8,668	0,921
0,345	-0,045	1,052	12,519	0,921
0,470	-0,082	1,045	17,461	0,925
0,599	-0,142	1,035	23,085	0,927
0,748	-0,230	1,014	30,808	0,939
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,693
Desvio do valor de referência (%)				-1,491

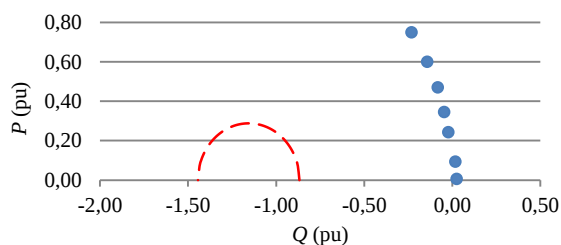


Figura 4. Potências para excitação constante – Pehuenche #2

Os erros nos valores de X_q calculados em relação aos fornecidos pelos fabricantes foram de 2,871% e 3,422%. Embora mais altos, estes erros estão bem abaixo dos erros admissíveis em norma, que são da ordem de 10%.

Tabela 4. Medidas e valores calculados – Itaipu #8.

P	Q	V	δ	b*
0,004	0,002	0,981	0,183	1,092
0,087	-0,003	0,981	3,783	1,090
0,172	-0,013	0,979	7,471	1,088
0,267	-0,030	0,976	11,769	1,087
0,341	-0,048	0,972	15,207	1,087
0,426	-0,072	0,967	19,292	1,089
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,725
Desvio do valor de referência (%)				2,871

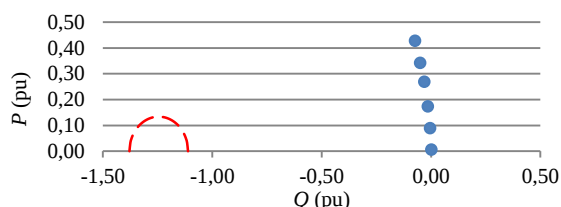


Figura 5. Potências para excitação constante – Itaipu #8.

Tabela 5. Medidas e valores calculados – Itaipu #12.

P	Q	V	δ	b*
0,026	0,065	1,031	0,940	1,209
0,102	0,059	1,029	3,787	1,205
0,190	0,049	1,027	7,083	1,203
0,291	0,033	1,023	10,988	1,202
0,379	0,014	1,021	14,397	1,204
0,471	-0,011	1,017	18,152	1,207
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,714
Desvio do valor de referência (%)				3,422

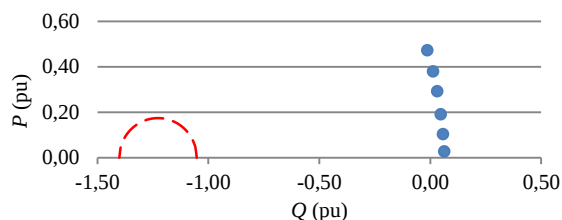


Figura 6. Potências para excitação constante – Itaipu #12.

2.4 PCH São Bernardo

São Bernardo é uma PCH pertencente à CEMIG com 600 m de queda e três grupos geradores Pelton. O Ensaio de excitação constante foi aplicado à unidade #1e as medidas realizadas são mostradas na Tabela 6. O gráfico da Figura 7 mostra os pontos medidos e o semi-círculo de referência.

Tabela 6. Medidas e valores calculados – SB #1.

P	Q	V	δ	b*
0,001	0,000	1,020	0,066	0,698
0,114	-0,014	1,021	6,953	0,693
0,228	-0,047	1,022	14,197	0,688
0,313	-0,069	1,020	19,660	0,697
0,400	-0,114	1,020	25,705	0,698
0,478	-0,176	1,018	31,991	0,694
0,569	-0,262	1,005	40,911	0,694
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,714
Desvio do valor de referência (%)				3,422

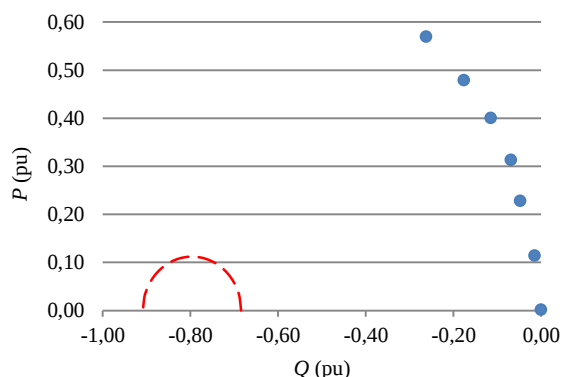


Figura 7. Potências para excitação constante – SB #1.

2.5 UHE Euclides da Cunha

Euclides da Cunha é uma UHE com quatro unidades geradoras totalizando 136 MVA pertencente à AES Tietê. O ensaio de excitação constante foi aplicado à unidade #3 e os resultados das medições são mostrados na Tabela 7. Resultado gráfico e semi-círculo de referência são mostrados na Figura 8.

Tabela 7. Medidas e valores calculados – EC #3.

P	Q	V	δ	b*
0,057	-0,013	0,974	1,712	1,147
0,109	-0,017	0,974	3,279	1,147
0,186	-0,027	0,974	5,613	1,145
0,290	-0,047	0,973	8,822	1,143
0,344	-0,058	0,972	10,513	1,144
0,401	-0,074	0,970	12,361	1,142
0,455	-0,092	0,969	14,127	1,141
0,513	-0,110	0,967	16,060	1,144
0,571	-0,135	0,966	18,041	1,144
0,621	-0,156	0,964	19,806	1,146
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,494
Desvio do valor de referência (%)				0,863

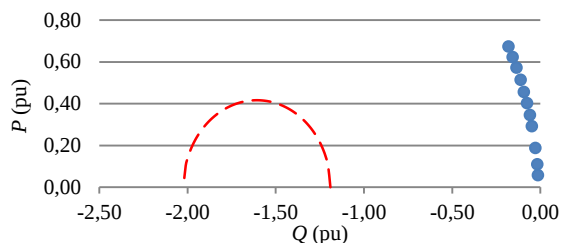


Figura 8. Potências para excitação constante – EC #3.

2.6 PCH Joasal

A PCH Joasal possui 8,4 MW divididos em quatro unidades geradoras e pertence à CEMIG. A tabela 8 apresenta as medidas obtidas com a aplicação do Ensaio de Excitação Constante ao grupo gerador #4, bem como os resultados dos cálculos realizados. O gráfico da Figura 9 mostra as medições e o semi-círculo de referência obtido com os resultados à tensão nominal. O valor da reatância de eixo quadratura obtido foi de 0,8 pu, que representa um erro de 0,686% quando comparado ao valor de referência usado pelo proprietário nos estudos de sistemas de potência.

Tabela 8. Medidas e valores calculados – Joasal #4.

P	Q	V	δ	b*
0,050	0,000	1,010	2,246	1,012
0,135	-0,025	1,010	6,167	0,993
0,250	-0,060	1,009	11,656	0,979
0,390	-0,100	1,009	18,426	0,989
0,520	-0,165	1,008	25,214	0,993
0,645	-0,250	1,000	32,840	0,998
0,715	-0,325	0,995	38,067	0,994
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,494
Desvio do valor de referência (%)				0,863

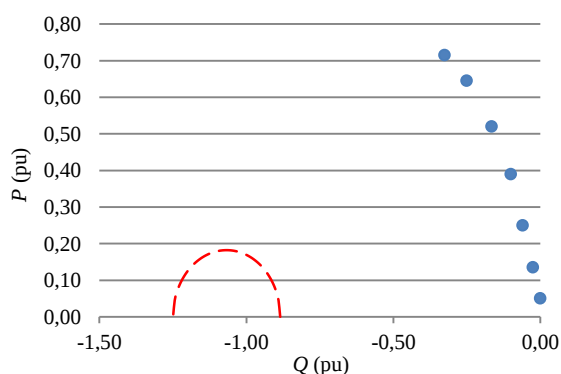


Figura 9. Potências para excitação constante – Joasal #4.

2.6 UHE Sogamoso

Sogamoso é a quarta maior central hidrelétrica da Colômbia. A casa de força subterrânea conta com três unidades totalizando 820 MW. O ensaio de excitação constante foi aplicado à unidade #2 obtendo as medidas mostradas na Tabela 9. A mesma tabela mostra os resultados dos cálculos da reatância síncrona de eixo em quadratura com um erro de 0,9% em relação ao fornecido pelo fabricante. A Figura 10 mostra as medidas no plano P-Q, junto com o semi-círculo de referência obtido com os parâmetros calculados, à tensão nominal.

Tabela 9. Medidas e valores calculados – Sogamoso #2.

P	Q	V	δ	b*
0,022	0,130	1,026	0,748	1,203
0,156	0,120	1,024	5,340	1,201
0,309	0,096	1,019	10,735	1,200
0,461	0,054	1,013	16,366	1,199
0,612	-0,002	1,001	22,491	1,203
Reatância síncrona de eixo Q - X_q (pu)				0,494
Desvio do valor de referência (%)				0,863

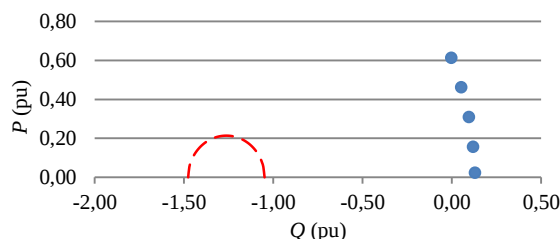


Figura 10. Potências para excitação constante – Sogamoso #2.

5 Conclusões

O artigo apresentou uma nova metodologia para estimar a reatância síncrona de eixo em quadratura de uma máquina síncrona, usando o Ensaio de Excitação Constante e cálculos simples usando os dados obtidos.

O método foi aplicado a oito máquinas de polos saliente obtendo-se excelentes resultados. Os valores das reatâncias calculados foram comparados com valores fornecidos por fabricantes ou calculados por outros métodos.

Devido à desconsideração da resistência da armadura e efeitos de saturação, três máquinas apresentaram erros menores que 1%, três outras máquinas apresentaram erros menores do que 1,5% e duas apresentaram erros menores que 3%, bem abaixo, portanto, dos erros admissíveis para a estimação de parâmetros síncronos preconizado em normas técnicas.

Deve-se enfatizar que o teste é de fácil aplicação, pode ser aplicado a qualquer máquina sem virtualmente nenhum risco ou custo. O método é considerado livre de risco porque não requer qualquer conexão especial, medidas podem ser obtidas de leituras de painel, e a máquina opera dentro da curva de capacidade. O único requisito é que a excitação permaneça constante durante toda a realização do ensaio. Tais operações não impõem nenhum risco à máquina sob teste.

O método é próprio para máquinas médias e grandes instaladas ou construídas em campo. As reatâncias obtidas são úteis para avaliação de considerações de projeto, para comparar com dados fornecidos por fabricantes, ou simplesmente obter informações perdidas.

Enquanto o método é próprio para obter a reatância síncrona de eixo em quadratura, deve-se ter em mãos o valor da reatância síncrona de eixo direto. Parâmetros sub-transitórios podem ser obtidos por rejeição de carga no eixo-q. A determinação da localização do eixo que é mostrada no Apêndice deste trabalho. A determinação de outros parâmetros síncronos e a análise da saturação sobre os resultados serão objeto de trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq e INERGE, pelo suporte ao desenvolvimento desta e de outras pesquisas. Agradecem também a Roberto Teixeira Siniscalchi, de FURNAS, Maro Auréio Siqueira Mauro, de Itaipu, a Gerson Andre Braulio, da CEMIG, e ao time de ensaios de campo da ABB, por executarem e fornecerem dados de medição do Ensaio de Excitação Constante em suas unidades geradoras.

Referências Bibliográficas

- Krause, P.C.; Wasynczuk, O.; Sudhoff, S.D.; Pekarek, S. (2013). "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems". John Wiley & Sons..
- IEEE Std. 115. IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part II—Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis. IEEE Power and Energy Society, New York, 2009.
- IEC 60034-4. Rotating electrical machines - Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests. Edition 3.0. International Electrotechnical Commission, Genève, Switzerland, 2008.
- Steven, R.E. (1961). An experimental effective value of the quadrature-axis synchronous reactance of a synchronous machine. Proc. of the IEE - Part A: Power Engineering, Vol. 108(42), pp. 559-566.
- Shepherd, R.V.; Kilbourne, C.E. (1943). The quadrature synchronous reactance of salient-pole synchronous machines. AIEE Transactions, Vol. 62(11), pp. 684-689.
- Darabi, A; Yousefifefat, M.; Nikkhoo, M. A. (2014). Review on Modelling of the Maximum Lagging Current Test Method of Salient Pole Synchronous Machines. IJEEE-10 (1) pp. 55-64.
- de Mello, F.P. (1994). Measurement of synchronous machine rotor angle from analysis of zero sequence harmonic components of machine terminal voltage. IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9(4), pp. 1770-1777.
- Sumina, D.; Šala, A.; Malarić, R. (2010) Determination of load angle for salient-pole synchronous machine. Measurement Science Review, Vol. 10(3), pp. 89-96.
- Bortoni, E.C.; Jardini J.A. (2004). A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines. IEEE Trans. on EC, Vol. 19(4), pp 687-691.
- Canay, I.M. (1970). Equivalent circuits of synchronous machines for calculating quantities of the rotor during transient processes and asynchronous starting - Part II: Salient-Pole Machines. Brown Boveri Review, 3-70, pp. 134-143.
- Wamkeue, R.; Jolette, C.; Mabwe, A.B.M.; Kamwa, I. (2011) Cross-Identification of Synchronous Generator Parameters From RTDR Test Time-Domain Analytical Responses. IEEE Trans. on EC-26(3), pp. 776-786.
- Arjona, M. A. ; Cisneros-González, M.; Hernández, C. (2011). Parameter Estimation of a Synchronous Generator Using a Sine Cardinal Perturbation and Mixed Stochastic-Deterministic Algorithms. IEEE Trans. on IE-58(2), pp. 486-493.
- Kyriakides, E.; Heydt, G. T.; Vittal, V. (2005). On line parameter estimation of round rotor synchronous generators including magnetic saturation. IEEE Trans. on EC-20(3), pp. 529-537.

Apêndice

A localização do eixo quadrature é fundamental para a rejeição de carga neste eixo e determinação de parâmetros transitórios relacionados. O eixo quadratura é obtido uma condição em que o ângulo de carga é igual ao ângulo do fator de potência, descrevendo um triângulo inscrito em uma semi-circunferência de diâmetro V^2/X_q . Qualquer ponto localizado no perímetro desta semi-circunferência está no eixo quadratura. Assim, para qualquer potência ativa, haverá uma potência reativa correspondente, dada por:

$$Q = \left[\left(\frac{V^2}{2X_q} \right)^2 - P^2 \right]^{1/2} - \frac{V^2}{2X_q}$$

Note que esta equação somente é factível para potências ativas menores que $V^2/2X_q$. O conhecimento deste ponto de carregamento conduz diretamente à localização do eixo quadratura, permitindo a realização de ensaio de rejeição de carga para determinação dos demais parâmetros transitórios da máquina sob teste.