

Estimação de Parâmetros de Máquinas Síncronas Usando Sincrofasores

GDS

Valmor Zimmer*

Ildemar C. Decker

Aguinaldo Silveira e Silva

- Introdução
- Conceitos Envolvidos
- Metodologia Desenvolvida
- Estudos de Caso
- Conclusões

OBJETIVO

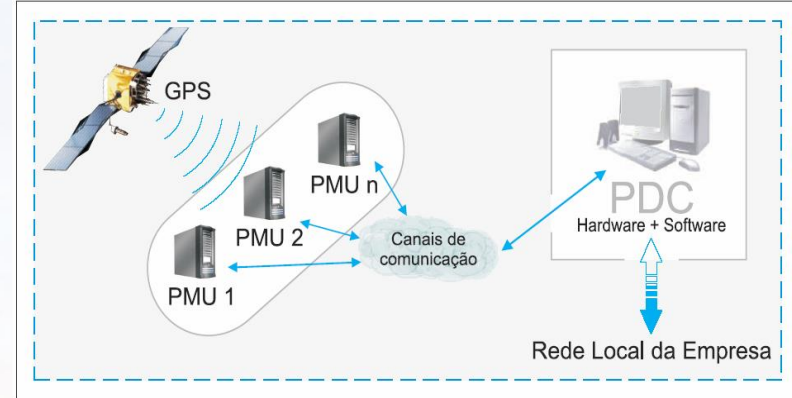
Apresentar uma metodologia de estimação de parâmetros de máquinas síncronas desenvolvida no âmbito do Projeto MedFasee que emprega:

- Dados de Medição Sincronizada de Fasores
- Perturbações Naturais do Sistema Elétrico
- Simulação Dinâmica Híbrida
- Métodos de Estimação baseados em Mínimos Quadrados

CONCEITOS ENVOLVIDOS

Medição Sincronizada de Fasores

- Medição simultânea de grandezas elétricas em instalações distantes geograficamente usando PMUs (*Phasor Measurement Units*)
- Sincronização temporal por sinal do sistema GPS (*Global Positioning System*)
- Aquisição e tratamento de dados em sítio remoto (*Phasor Data Concentrator – PDC*)
- **Taxa de atualização >> SCADA**
- **Viabiliza o monitoramento e o controle da dinâmica dos SEE**
- **Novo paradigma para a operação dos SEE**



www.medfasee.ufsc.br/temporeal

CONCEITOS ENVOLVIDOS

Modelo da Máquina Síncrona

- Máquina de pólos salientes
- Modelo de 5ª ordem
- Parâmetros Mecânicos
 - H, D
- Parâmetros Elétricos
 - De regime (r_a, x_d, x_q)
 - Transitórios (x'_d, T'_{do})
 - Subtransitórios ($x''_d, x''_q, T''_{do}, T''_{qo}$)

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e - D(\omega - \omega_0))$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d)I_d]$$

$$\dot{E}''_q = \frac{1}{T''_{do}} [E'_q - E''_q + (x'_d - x''_d)I_d]$$

$$\dot{E}''_d = \frac{1}{T''_{qo}} [-E''_d - (x_q - x''_q)I_q]$$

$$V_q = E''_q - r_a I_q + x''_d I_d$$

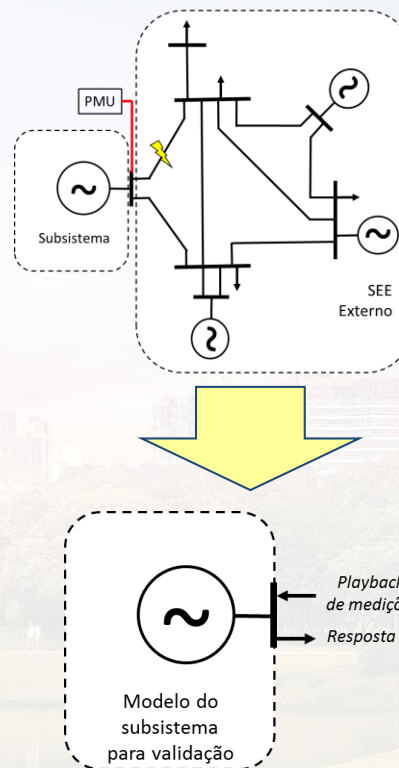
$$V_d = E''_d - r_a I_d - x''_q I_q$$

METODOLOGIA

Obtenção de Discrepâncias

Simulação Dinâmica Híbrida

- Injeção de dados de medição em programas de simulação
- Permite simular o desempenho do componente sem representar o sistema completo e a sequência de eventos
- Pode ser interpretada como uma interface entre sistemas reais e simulações convencionais



Representação do Sistema Original

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, z, u, p) \\ 0 &= g(x, z, u, p) \\ y &= h(x, z, u, p)\end{aligned}$$

f – função vetorial que define as equações diferenciais
 g – função vetorial que define as equações algébricas
 h – função vetorial que define as equações de saída
 x – vetor de variáveis de estados diferenciais
 z – vetor de variáveis de estados algébricos
 u – vetor de entradas
 p – vetor de parâmetros
 y – vetor de saídas

P.V.I.

Sistema Equivalente da SDH

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= f(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p) \\ 0 &= g(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p) \\ y &= h(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)\end{aligned}$$

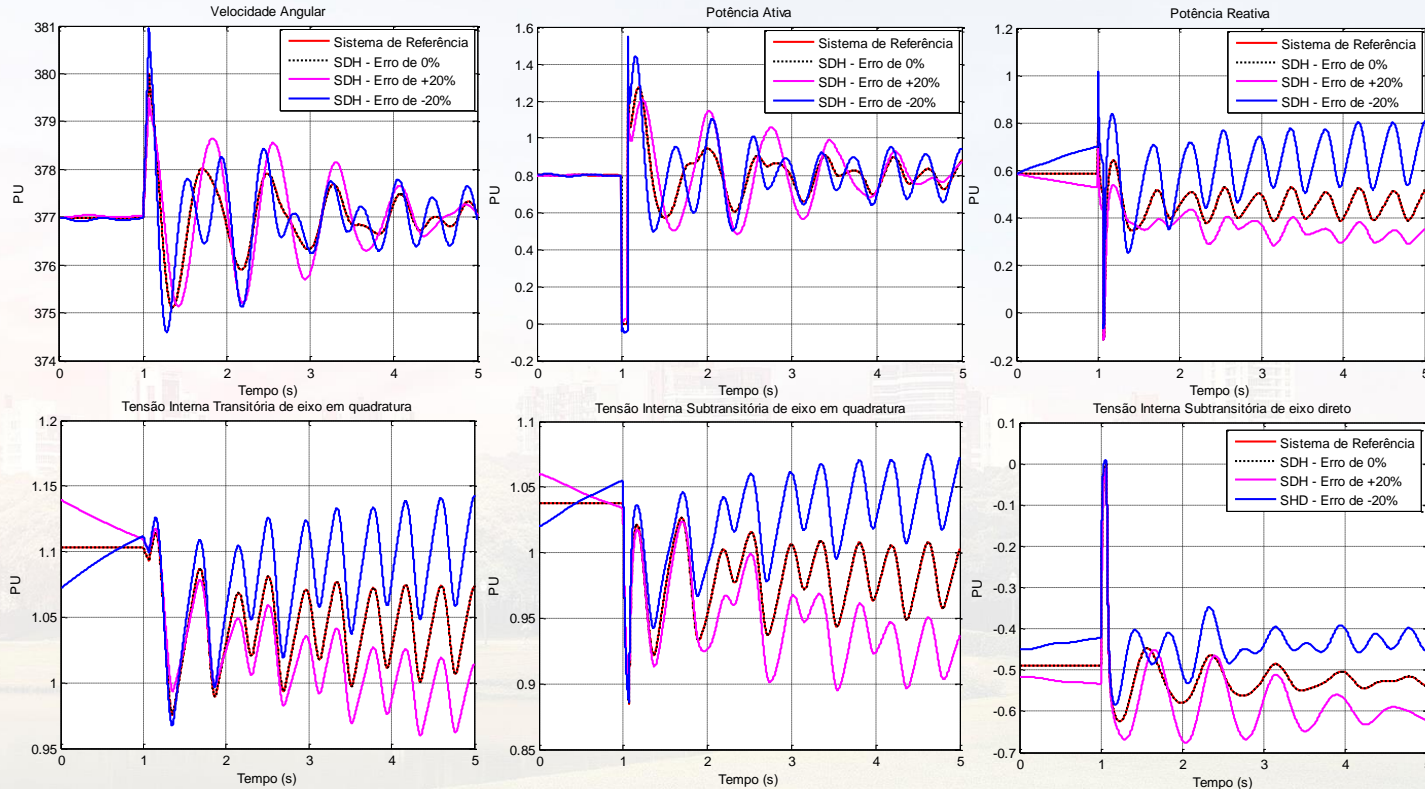
x^*, z^*, u^* – variáveis conhecidas
 x', z', u' – vetores originais sem variáveis conhecidas

P.V.I.

METODOLOGIA

Obtenção de Discrepâncias

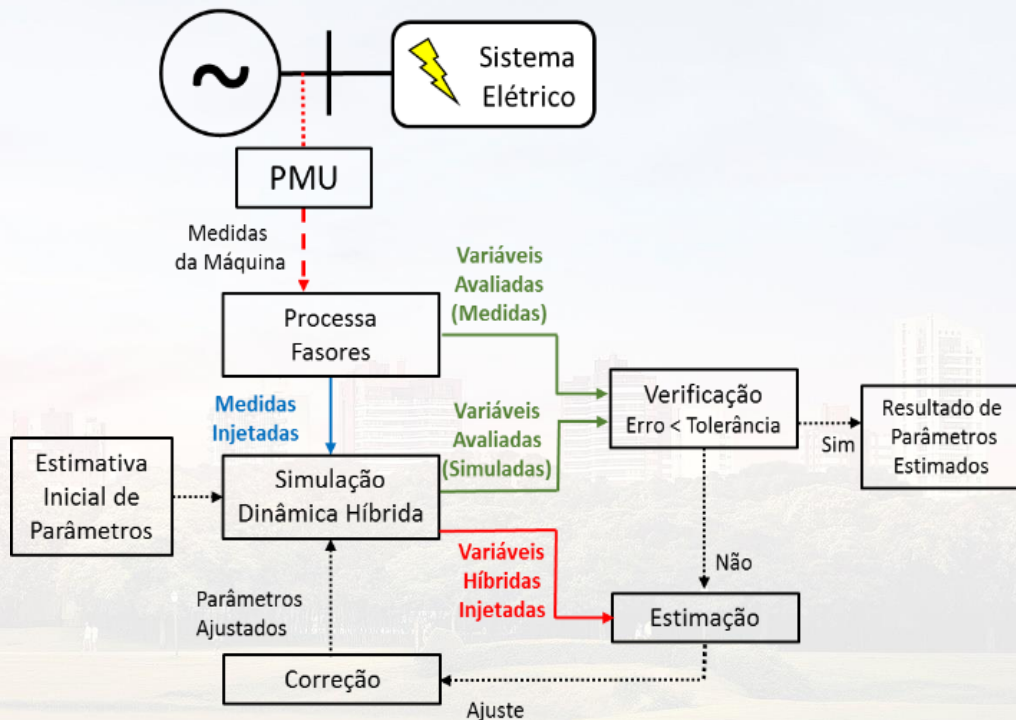
- Dificuldades na inicialização
- Desempenho das variáveis ω , P_e e Q_e utilizando SDH com diferentes níveis de erro.
- Desempenho das variáveis internas E'_q , E''_q e E''_d utilizando SDH com diferentes níveis de erro.



METODOLOGIA

Processo de Estimação

- Divisão do Processo de Estimação
 - Parâmetros Mecânicos
 - Parâmetros Elétricos
- Restrições
 - Limites mínimos e máximos
 - Limites relacionais
(ex.: $x''_d < x'_d$ e $x'_d < x_d$)
 - PDPI
- Condições iniciais das variáveis internas como parâmetros



METODOLOGIA

Processo de Estimação

- Divisão do Processo de Estimação
 - Parâmetros Mecânicos
 - Parâmetros Elétricos

- Restrições
 - Limites mínimos e máximos
 - Limites relacionais (ex.: $x''_d < x'_d$ e $x'_d < x_d$)

- Condições iniciais das variáveis internas como parâmetros

Estimação Acoplada		Medidas Injetadas	$V_t, \theta_t, E_{fd}, P_m$
		Variáveis Híbridas Injetadas	$E'_q, E''_q, E''_d, \omega$
		Variáveis Avaliadas	P_e, Q_e
		Parâmetros Estimados	$E'_{q0}, E''_{q0}, E''_{d0}, H, D, x_d, x'_d, x''_d, x_q, x''_q, T'_{d0}, T''_{d0}, T''_{q0}$
Estimação Pseudoacoplada	Parâmetros Mecânicos	Medidas Injetadas	P_e, P_m
		Variáveis Híbridas Injetadas	ω
		Variáveis Avaliadas	ω
		Parâmetros Estimados	H, D
	Parâmetros Elétricos	Medidas Injetadas	$V_t, \theta_t, E_{fd}, P_m$
		Variáveis Híbridas Injetadas	$E'_q, E''_q, E''_d, \omega$
		Variáveis Avaliadas	P_e, Q_e
		Parâmetros Estimados	$E'_{q0}, E''_{q0}, E''_{d0}, x_d, x'_d, x''_d, x_q, x''_q, T'_{d0}, T''_{d0}, T''_{q0}$

METODOLOGIA

Processo de Estimação

- Funções de Sensibilidade Híbridas

Funções de Sensibilidade da Trajetória

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial p} = \frac{\partial f(x, p, u)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p_i} + \frac{\partial f(x, p, u)}{\partial p_i}$$

$$\frac{\partial y}{\partial p} = \frac{\partial h(x, p, u)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial h(x, p, u)}{\partial p}$$

Funções de Sensibilidade da Trajetória Híbridas

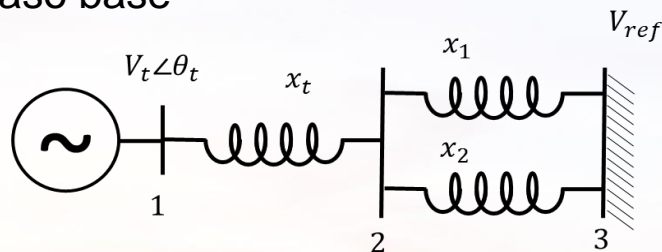
$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial p} = \frac{\partial f(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p_i} + \frac{\partial f(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)}{\partial p_i}$$

$$\frac{\partial y}{\partial p} = \frac{\partial h(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial h(x', x^*, z', z^*, u', u^*, p)}{\partial p}$$

- Algoritmos de *Levenberg - Marquardt*

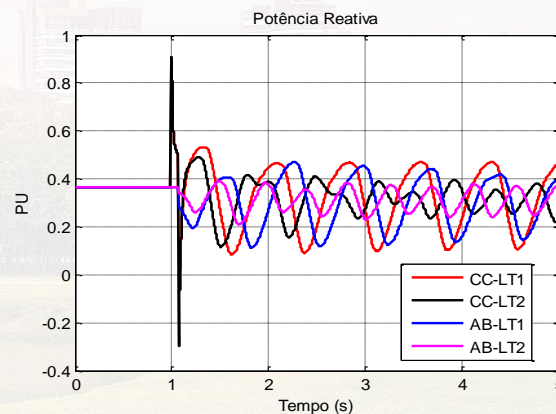
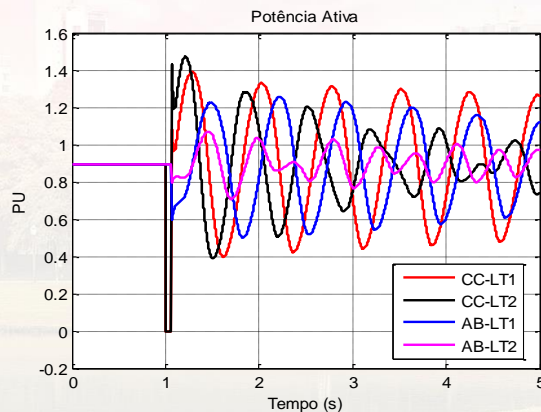
RESULTADOS Simulações

• Caso base



Condição Inicial	Dados do Sistema	Parâmetros da Máquina	
$P = 0,9 \text{ pu}$	$x_t = 0,07 \text{ pu}$	$H = 3,5$	$D = 1$
$V_t = 1,00 \text{ pu}$	$x_1 = 0,15 \text{ pu}$	$x_d = 1,81 \text{ pu}$	$x_q = 1,76 \text{ pu}$
$V_{ref} = 0,95 \angle 0^\circ$	$x_2 = 0,30 \text{ pu}$	$x'_d = 0,30 \text{ pu}$	$x''_q = 0,25 \text{ pu}$
Parâmetros do AVR (ST1 – IEEE)		$x''_d = 0,23 \text{ pu}$	$T''_{qo} = 0,07 \text{ s}$
$K_A = 200$	$Lim_{sup} = 5 \text{ pu}$	$T'_{do} = 8,00 \text{ s}$	
$T_A = 0,05 \text{ s}$	$Lim_{inf} = -5 \text{ pu}$	$T''_{do} = 0,03 \text{ s}$	

- CC-LT1
- CC-LT2
- AB-LT1
- AB-LT2



RESULTADOS Simulações

- Resultados da estimação pseudoacoplada

	Par. Mecânicos		Parâmetros Elétricos								Iterações Mec/Elet
	H	D	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x''_q	T'_{do}	T''_{do}	T''_{qo}	
<i>Real</i>	3,500	1,0000	1,8100	1,7600	0,3000	0,2300	0,2500	8,0000	0,0300	0,0700	— — —
<i>Inicial</i>	3,850	1,1000	1,9901	1,9360	0,3300	0,2530	0,2750	8,8000	0,0330	0,0770	— — —
<i>CC – LT1</i>	3,4996	0,9431	1,8290	1,9852	0,3142	0,2364	0,2787	7,6711	0,0297	0,0730	6/270
<i>CC – LT2</i>	3,4996	0,9398	1,8205	1,9704	0,3130	0,2283	0,2766	7,7112	0,0317	0,0728	6/502
<i>AB – LT1</i>	3,4999	1,0081	1,8171	1,9653	0,3140	0,2382	0,2775	7,5847	0,0289	0,0685	4/555
<i>AB – LT2</i>	3,4999	1,0071	1,8363	2,0044	0,3051	0,2316	0,2782	7,6146	0,0377	0,1000	5/191

- Resultado da estimação acoplada desprezando o parâmetro D

	H	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x''_q	T'_{do}	T''_{do}	T''_{qo}
<i>Final</i>	3,56	1,8306	1,9530	0,3016	0,2221	0,2743	8,0689	0,0303	0,0777

530 iterações

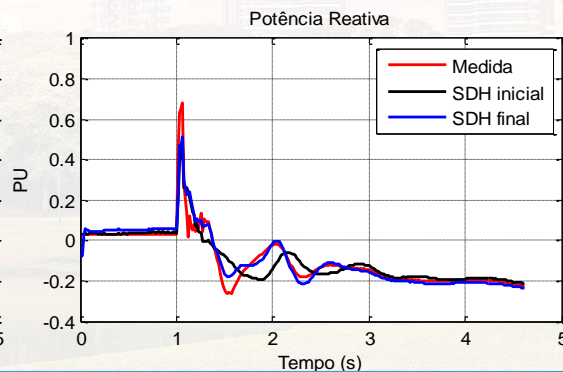
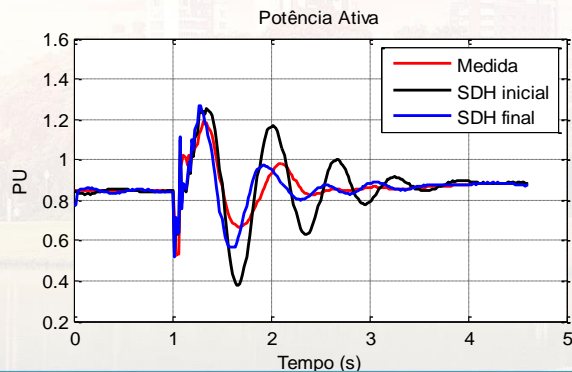
- Resultados de estimação com a presença de ruído (Modelo 3-Arrillaga)

Par.	H	D	E'_{qo}	E'_{do}	δ_0	x_d	x_q	x'_d	x'_q	T'_{do}	T'_{qo}
<i>Real</i>	3,5000	10,0000	1,1294	-0,3713	45,6833	1,8100	1,7600	0,3000	0,6500	8,0000	1,0000
<i>Média</i>	3,4999	10,0306	1,1393	-0,3704	45,6037	1,8089	1,7539	0,3086	0,6447	7,6121	0,9814
<i>Desvio Padrão</i>	0,0004	0,07146	0,0022	0,0005	0,0302	0,0003	0,0032	0,003	0,003	0,003	0,003
<i>Erro Absoluto</i>	0,0001	-0,0305	-0,0099	-0,0009	0,0796	0,0011	0,0061	-0,0086	0,0053	0,3879	0,0186
<i>Erro Rel. (%)</i>	0,0029	0,3055	0,8788	0,2478	0,1743	0,0602	0,3440	2,8550	0,8146	4,8483	1,8625

RESULTADOSCaso Real

- UG15 – UHE Itaipu (22/09/2015 – curto-circuito UG 10)

	H	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x''_q	T'_{do}	T''_{do}	T''_{qo}	$It.$
<i>Placa</i>	5,389	0,949	0,678	0,317	0,252	0,252	8,5	0,09	0,19	---
<i>Sem interpolar (0,016)</i>	4,502	0,9122	0,6758	0,3082	0,1948	0,2491	7,4733	0,0269	0,2056	50
<i>Interp. Linear (0,0001)</i>	4,3443	0,8670	0,6769	0,3157	0,2297	0,2509	7,3769	0,0360	0,2030	197
<i>Interp. PCHIP(0,0001)</i>	4,3466	0,8671	0,6773	0,3161	0,2291	0,2510	7,3751	0,0361	0,2040	194
<i>Média das estimativas</i>	4.3976	0.8821	0.6767	0.3133	0.2179	0.2503	7.4084	0.0330	0.2042	---
<i>Desvio padrão</i>	0.0904	0.0261	0.0008	0.0045	0.0200	0.0011	0.0562	0.0053	0.0013	---
<i>Variação Percentual</i>	-18.39	-7.05	-0.19	-1.15	-13.54	-0.66	-12.84	-63.33	7.47	---



- Testes usando simulações apresentaram bons resultados de estimação
- Um teste inicial utilizando uma perturbação na UHE Itaipu levou a resultados próximos aos valores de placa
- Novos testes e abordagens estão sendo desenvolvidas visando melhorar os resultados

Valmor Zimmer

 (48) 3721-4871

 (48) 98452-9085

 valmorzimmer@gmail.com

 www.medfasee.ufsc.br

REP

1) A maioria dos curtos-circuitos são do tipo fase-terra. Até que ponto os desbalanços que normalmente são desprezados em modelos de estabilidade transitória podem prejudicar a metodologia proposta? Seria necessária a utilização de modelos trifásicos?

Resposta

Na metodologia proposta inicialmente as medidas fasoriais são obtidas em valores trifásicos de tensões e correntes, essas medidas são convertidas para variáveis fasoriais em p.u. de sequência positiva. O fasor de corrente é utilizado no cálculo de potência ativa e reativa, já o fasor de tensão, é utilizado no cálculo de potências e para a injeção no modelo da máquina por meio de simulação dinâmica híbrida, onde é convertido para coordenadas retangulares e transformado em coordenadas dq , utilizando a estimativa inicial do ângulo δ . Dessa forma, as perturbações são representadas na simulação por meio das variações dos fasores de sequência positiva das tensões e correntes, e o processo de estimação visa minimizar as discrepâncias existentes entre os valores das potências medidas e simuladas, não necessitando o uso de modelos trifásicos. Além disso, a metodologia tem se mostrado robusta na validação de modelos de máquinas com perturbações de pequeno impacto, como rejeições de carga, que podem ser consideradas equilibradas.

Pergunta 02

Potencialmente o trabalho poderia ser utilizado para depuração de bancos de dados dinâmicos utilizados nos estudos envolvendo simulações de estabilidade transitória? De forma geral, os maiores erros estão associados aos sistemas de controle, por sua complexidade inerente e por diversos motivos (erro de informação, erro de implementação de modelos, parâmetros digitados errados, etc.). Um dos problemas mais encontrados seriam relacionados a erros topológicos dos controladores e não apenas parâmetros. Os autores vislumbram a possibilidade de aplicação da metodologia para esta aplicação de identificação de controladores com problemas tanto nos parâmetros como com erros topológicos? Quais as possíveis dificuldades encontradas e será fruto de pesquisa futura dos autores?

Resposta

Sim, o trabalho pode ser utilizado para depuração de bancos de dados dinâmicos de máquinas síncronas. Para incluir a validação de controladores, deve-se empregar PMUs específicas para geradores, que permitem a obtenção de medidas sincronizadas de diversos equipamentos, (AVR, GOV e PSS) com isso, a validação dos controladores pode ser realizada individualmente. Atualmente a metodologia visa a identificação de parâmetros de modelos conhecidos, mas vislumbra-se a utilização em modelos padronizados de controladores, de modo a representar modelos complexos por modelos reduzidos aproximados.

O modelo utilizado contempla a representação de fenômenos subtransitórios, transitórios e de regime, contemplando inclusive a resistência da armadura e a saliência subtransitória da máquina síncrona. Com isso, leva-se em consideração grande parte dos fenômenos dinâmicos associados a máquinas síncronas. Entretanto, na evolução dessa pesquisa pretende-se explorar o uso de outros modelos de máquinas síncronas e a representação da saturação magnética.