



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

GGH - 06
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**COMPARATIVO ENTRE DUAS ESTRUTURAS DE CONTROLE PARA REGULADORES DE TENSÃO DE
HIDROGERADORES**

Daniel dos Santos Mota *

Clovis Goldemberg

Voith Siemens Hydro Power Generation

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este artigo compara o comportamento de duas estruturas diferentes de controle automático da tensão de hidrogeradores com sistemas de excitação estáticos. Estes sistemas alimentam o enrolamento de campo do gerador através de pontes trifásicas tiristorizadas totalmente controladas conectadas aos terminais do gerador por meio de um transformador abaixador. A primeira estrutura, denominada de Controle Direto, compara a tensão terminal do gerador com uma tensão de referência e, através de um regulador PI, atua diretamente no ângulo de disparo do conversor estático, aumentando ou diminuindo a tensão de campo do gerador. A segunda estrutura emprega dois reguladores PI e é chamada de Controle Cascata. Ela compara a tensão terminal com a referência de tensão e, através do PI adicional externo, fornece a corrente de campo de referência ao regulador PI interno que se encarrega de controlar a corrente de excitação do gerador.

PALAVRAS-CHAVE

Reguladores, Tensão, Hidrogeradores, Controle, Cascata, Modelagem.

1.0 - INTRODUÇÃO

A motivação para este trabalho foi analisar os efeitos da utilização de um acionador comercial de motores de corrente contínua em sistemas de excitação estática. Tais acionadores, fabricados em larga escala, possuem uma ponte retificadora tiristorizada, circuitos de disparo e placas eletrônicas com funções de controle de corrente incorporadas. Estes equipamentos possuem uma estrutura de "Controle Cascata" na qual uma malha externa de velocidade comanda uma malha interna de corrente. Na adaptação proposta, a malha externa corresponderia à malha de tensão terminal do gerador enquanto que a malha interna de corrente seria preservada.

Para comparar estas duas estruturas de controle foi necessário modelar a ponte de tiristores e o comportamento do gerador. O comportamento dinâmico de tais sistemas ocorre em escalas muito diferentes de tempo, desde fenômenos de comutação de tiristores de potência que ocorrem em períodos de tempo da ordem de alguns μ s aos decorrentes do controle do sistema que ocorrem em períodos de até centenas de ms, por esta razão duas abordagens de modelagem são apresentadas. Foram utilizados neste trabalho dados de projeto de um gerador real e os requisitos técnicos do ONS para o dimensionamento do sistema de excitação estática. Os dados como tensão e corrente nominais de campo, tensão secundária do transformador de excitação e tensão de teto, utilizados durante a fase de modelagem, correspondem a projetos reais de um gerador e sistema de excitação.

A comparação entre estas duas estruturas de controle abrange também regras de ajuste dos reguladores PI, sendo apresentadas técnicas para o ajuste de ambas as estruturas de controle.

A resposta dinâmica das duas filosofias de controle é comparada frente a pequenas e grandes variações na referência de tensão do gerador, sendo que as grandes variações excitam as não-linearidades do equipamento, mais especificamente a saturação do conversor. Discute-se o comportamento observado e a atuação dos reguladores PI durante a saturação do conversor de potência. Nas conclusões comenta-se sobre a relação entre a

* Rua Friedrich von Voith, 825 – Prédio 36 – CEP 02995-000 – São Paulo – SP – BRASIL
Tel.: +55 11 3944 5375 – Fax: +55 11 3944 5181 – e-mail: daniel.mota@vs-hydro.com

natureza física das grandezas controladas pelo Controle Cascata e as dificuldades encontradas na utilização de tal filosofia de controle.

2.0 - ESTRUTURAS DE CONTROLE DIRETO E DE CONTROLE CASCATA

O Controle Direto, ver Figura 1 – (a), compara a tensão terminal do gerador com a referência de tensão. O erro resultante é aplicado na entrada de um controlador PI (proporcional-integral) que produz a tensão de controle do circuito de gatilho da ponte de tiristores. Esta última alimenta o enrolamento de campo do gerador. Na outra estrutura, denominada de Controle Cascata (Figura 1 – (b)), existem dois controladores do tipo PI em cascata. O PI externo compara a tensão terminal do gerador com uma referência de tensão, produzindo um sinal que corresponde à referência de corrente de campo. O PI interno compara a referência de corrente de campo com a corrente de campo medida, produzindo em sua saída a tensão de controle do circuito de gatilho da ponte de tiristores.

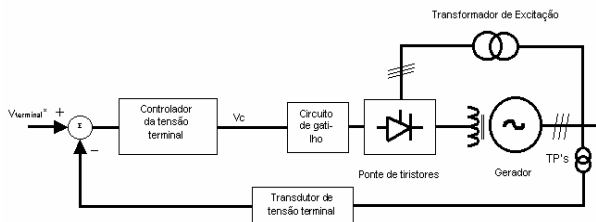


FIGURA 1 – (a): Sistema de Excitação com Controle Direto

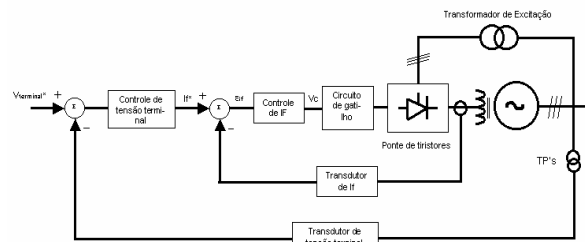


FIGURA 1 – (b): Sistema de Excitação com Controle em Cascata

Para comparar as duas estruturas de controle foi feita uma modelagem matemática dos diferentes subsistemas.

3.0 - MODELAGEM DO CONVERSOR ESTÁTICO

O conversor estático é um retificador trifásico totalmente controlado a tiristores. Para a modelagem deste conversor serão utilizadas duas abordagens diferentes.

Um modelo “pseudo-contínuo” (1)(2) totalmente linear, sem limitadores ou saturação representado por um filtro de primeira ordem e por um ganho proporcional que reproduzem somente o valor médio da tensão de saída da ponte. O sistema de disparo dos tiristores é incorporado de uma maneira simplificada ao comportamento do conversor estático. Tal representação, chamada de modelo simplificado, permite o ajuste rápido dos controladores PI.

Outra representação para a ponte de tiristores pode ser feita considerando-se os tiristores como interruptores ideais. A forma de onda da tensão de saída do conversor estático é composta por uma série de trechos de senoide que são recortes das tensões de entrada do conversor. Tais trechos são selecionados em função de quais tiristores estão conduzindo em cada instante. Este modelo será denominado de representação detalhada da ponte de tiristores.

A Figura 2 compara as tensões de saída dos dois modelos do conversor estático.

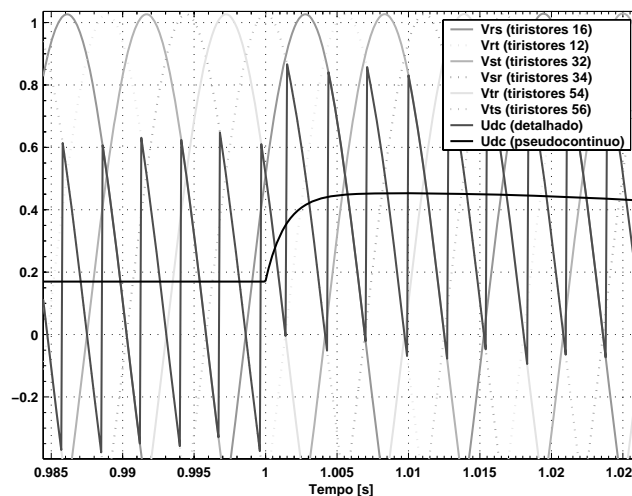


FIGURA 2: Tensões de entrada e de saída do conversor estático

4.0 - MODELAGEM DO GERADOR

A modelagem do gerador partiu de um projeto real (3). A Tabela 1 contém alguns dados do gerador simulado.

TABELA 1: Dados do Gerador e Excitação

Gerador					Excitação				
V	A	KVA	cos ϕ	Hz	Condição	$U_n\%$	$I_n\%$	U_f (V)	I_f (A)
13800	2845	68000	0.95	60	Vazio	100	0	95	695
$X_{d_{uns}}$	R_f (20°C)	R_f (130°C)	L_f (75°C)	T_{do}^*	Carga nom.	100	100	183	1133
1.05 pu	0.113 Ω	0.161 Ω	0.65H	4.73s					

A determinação dos parâmetros dos reguladores PI foi realizada com um modelo linear do gerador em vazio (4). O enrolamento de campo foi considerado como uma carga RL linear com resistência e indutância constantes de valores 0.15 Ω e 0.75H. O efeito dos enrolamentos amortecedores foi modelado por uma função de transferência de primeira ordem com uma constante de tempo de 20ms. Esta simplificação simula apenas um atraso entre corrente de campo e tensão terminal, mas não considera os efeitos dos enrolamentos amortecedores sobre o enrolamento de campo.

5.0 - MODELAGEM DO TRANSDUTOR DE TENSÃO

O transdutor de tensão do gerador modelado se compõe de transformadores de potencial que alimentam um retificador trifásico de onda completa não controlado. A tensão de saída da ponte retificadora é filtrada resultando um sinal que reflete a tensão terminal do gerador (4). Um filtro de segunda ordem composto pela associação em série de dois filtros de primeira ordem, com constantes de tempo de 4ms, foi utilizado nesta modelagem.

As constantes de tempo introduzidas por estes filtros representam não apenas os filtros reais de um transdutor de tensão mas também os atrasos inerentes aos processos de digitalização destes sinais (os sistemas de excitação atuais utilizam dispositivos microprocessados).

6.0 - MODELAGEM DO TRANSDUTOR DE CORRENTE DE CAMPO

O transdutor de corrente de campo é composto por um shunt de medição conectado em série com o enrolamento de campo do gerador. O sinal proveniente deste shunt deve ser amplificado e digitalizado. Para modelar o circuito de medição de corrente de campo, foram utilizados os mesmos filtros que os da medição de tensão terminal do gerador.

7.0 - PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

A referência (5) estabelece que "A tensão de campo deve ser mantida em valor superior à tensão de campo à carga nominal, durante defeitos do lado de alta tensão do trafo elevador, supondo-se que a tensão terminal tenha sido reduzida a 35% da tensão nominal". Com base nesta exigência foi determinado que a tensão no secundário do transformador de excitação e a tensão de teto seriam, respectivamente, $U_2=440V$ e $U_{teto}=594V$.

8.0 - BASES PARA AS SIMULAÇÕES

Convém agora definir as bases para a realização das simulações computacionais.

TABELA 2: Bases para realização das simulações

Grandeza real	Valor correspondente a 1pu	Comentários
Tensão nominal do gerador	13800V	
Corrente de excitação nominal a plena carga	1133A	A corrente de campo nominal em vazio é de 0,613pu
Tensão de teto	594V	A tensão de campo nom. em vazio é de 0,173pu
Tensão de controle do circuito de gatilho (U_c)	1	$U_c=1$ equivale a requisitar U_{teto} da ponte

Para efetuar as comparações entre as duas estruturas de controle, é necessário ajustar as malhas de controle.

9.0 - AJUSTE DO CONTROLE DIRETO

A Figura 3 – (a) apresenta o modelo adaptado de (4) com o qual foi feita a sintonia dos parâmetros do regulador PI do Controle Direto. A TABELA 3 apresenta os dados utilizados na modelagem da ponte de tiristores, do gerador em vazio e dos transdutores para ambas as filosofias de controle comparadas neste artigo.

TABELA 3: Dados utilizados na modelagem (Direto e Cascata)

T_b	K_b	T_{do}	K_{ifvg}	T_a	T_{fbk}
1,4ms	3,3486	4,73	1,7270	20ms	4ms

A escolha da constante de tempo de integração do regulador é feita de maneira a se cancelar o pólo dominante referente ao tempo de resposta do enrolamento de campo do gerador (2)(4)(6). A escolha da constante proporcional do regulador foi feita de maneira a se ter um sobressinal na resposta ao degrau de no máximo 5%.

10.0 - AJUSTE DO CONTROLE CASCATA

A sintonia dos parâmetros dos reguladores PI do controle cascata foi realizada utilizando-se o modelo linear presente na Figura 3 – (b).

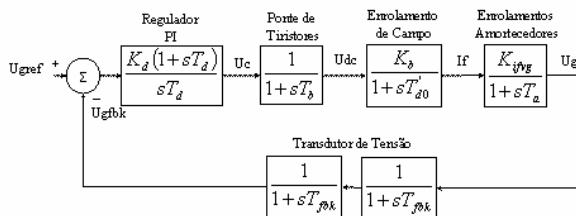


FIGURA 3 – (a): Modelo linear - Controle direto

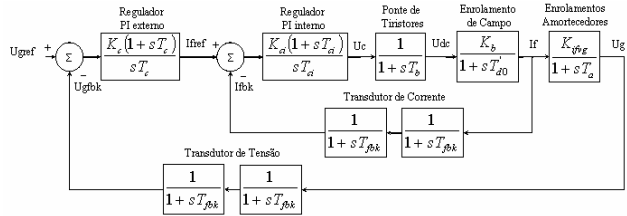


FIGURA 3 – (b): Modelo linear - Controle Cascata

A constante de tempo de integração do regulador PI interno foi ajustada de maneira a se cancelar o pólo dominante do sistema. A escolha da constante de tempo proporcional do PI interno, considerando-se um sobressinal na resposta ao degrau de no máximo 5% não deu bons resultados. O ganho proporcional fica próximo a 80. Erros da ordem de 1% na entrada do PI interno implicam em valores do sinal de controle da ponte de tiristores (U_c) próximos a 1, provocando a saturação da ponte de tiristores.

Para evitar a saturação mencionada anteriormente, optou-se por ajustar o PI interno de maneira a se ter um sistema com amortecimento crítico.

A malha interna de controle compensa a constante de tempo dominante, sobrando apenas, neste caso, uma série de pequenas constantes de tempo. Estas pequenas constantes não podem ser totalmente compensadas por reguladores PID (1). A estratégia adotada foi a de utilizar a constante do integrador externo para compensar, não uma pequena constante de tempo específica, mas a soma de todas estas (6), que é igual a 0,05s. Este ajuste inicial foi refinado através de simulações no domínio do tempo, variando-se a constante de tempo do integrador do regulador PI externo, resultando um valor de 0.03s para T_c . A Figura 4 mostra a resposta ao degrau para diferentes constantes do integrador externo. A resposta do sistema com $T_c=0,03s$ é a mais rápida sem apresentar sobressinal. O ponto marcado na figura, $t=0,156s$ e amplitude=0,834, pertence à resposta ao degrau do sistema com $T_c=0,05s$.

A constante proporcional do regulador PI externo foi escolhida de maneira a se ter no máximo 5% de sobressinal na resposta do sistema ao degrau, resultando o valor de 0,3.

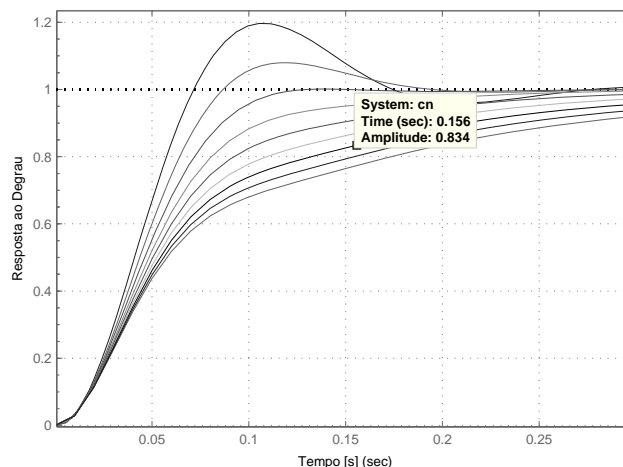


FIGURA 4: Resposta ao degrau do sistema com Controle Cascata – Modelo Linear

11.0 - RESPOSTAS AO DEGRAU DE 2% NA REFERÊNCIA DE TENSÃO (MODELO LINEAR)

Os ajustes finos dos parâmetros dos reguladores (ver Tabela 4) foram feitos através de simulações dos modelados lineares (Figura 3). As simulações computacionais são mais simples e rápidas para este tipo de modelo.

TABELA 4: Parâmetros dos PI's do sistema com Controle Cascata e Direto

Controle Cascata		
Constante proporcional do PI interno	Kci	45
Constante integrativa do PI interno	Tci	4,73s
Constante proporcional do PI externo	Kc	0,39
Constante integrativa do PI externo	Tc	0,03s

Controle Direto		
Constante proporcional do PI	Kd	14,2
Constante integrativa do PI	Td	4,73s

A FIGURA 5 – (a) mostra que o sistema em cascata responde mais rapidamente com o mesmo sobressinal que o sistema com controle direto, os tempos de subida são respectivamente de 55ms e 75ms. A Figura 5 – (b) mostra a referência de corrente de campo do sistema com controle em cascata, a corrente de campo do sistema com controle cascata e a corrente de campo do sistema com controle direto (em ordem crescente de tempo de subida).

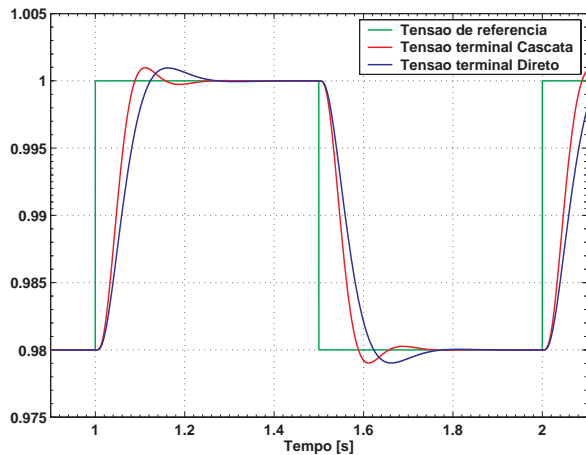


FIGURA 5 – (b): Resposta ao degrau de 2% - Tensões terminais

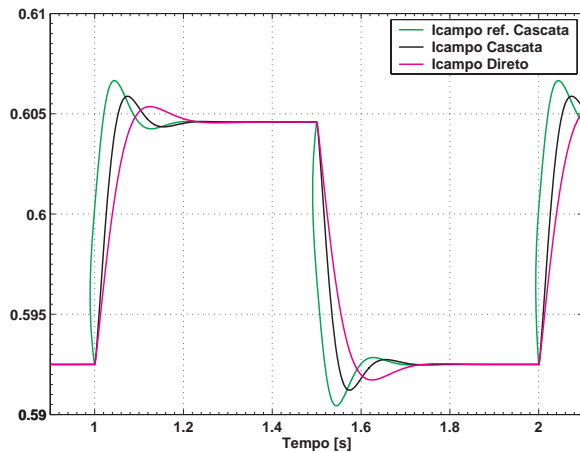


FIGURA 5 – (b): Resposta ao degrau de - Correntes de Campo

Verifica-se que, considerando a modelagem totalmente linear, o sistema com controle em cascata responde mais rapidamente ao degrau na referência de tensão do que o sistema com controle direto.

12.0 - RESPOSTAS AO DEGRAU DE 2% NA REFERÊNCIA DE TENSÃO (MODELO DETALHADO)

As duas filosofias de controle foram comparadas fazendo uso do modelo detalhado da ponte de tiristores aplicando-se um degrau de 2% na referência de tensão. Foi adicionado um ruído branco com amplitude de 0,2% aos sinais de realimentação de tensão e de corrente dos transdutores, representando condições realistas existentes em sistemas de excitação.

A resposta da corrente de campo em ambos os sistemas modelados se assemelha à resposta obtida com o modelo simplificado (Figuras 5 e 6). Pode-se distinguir na Figura 6 – (b), por ordem crescente de tempo de subida, a referência de corrente de campo do controlador cascata e as correntes de campo dos sistemas com controle cascata e direto respectivamente.

As diferenças observadas na resposta dinâmica da corrente de campo se atenuam consideravelmente quando se observa a saída dos transdutores de tensão, ver FIGURA 6 – (b).

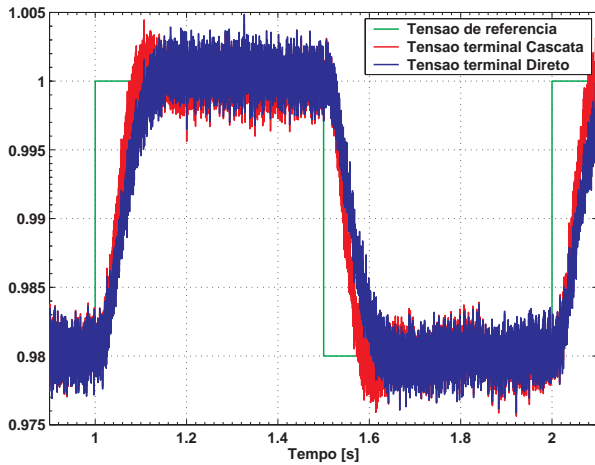


FIGURA 6 – (a): Resposta ao degrau de 2% - Tensões Terminais

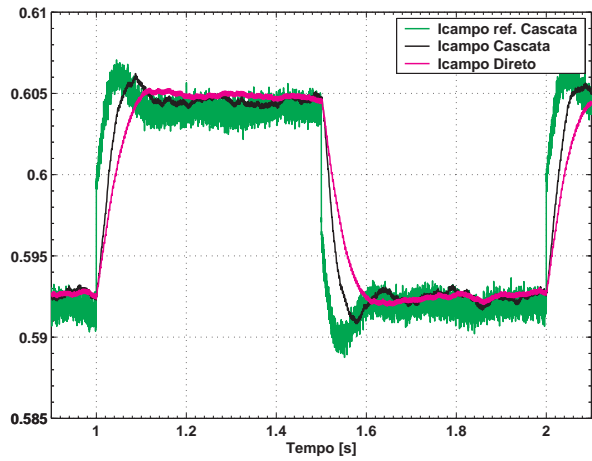


FIGURA 6 – (b): Resposta ao degrau de 2% - Correntes de Campo

13.0 - RESPOSTAS AO DEGRAU DE 6% NA REFERÊNCIA DE TENSÃO TERMINAL

Com relação aos modelos simplificados não há diferenças entre um degrau de 2% ou 6%, pois tais modelos não levam em conta as não-linearidades presentes nos sistemas reais. Entretanto, nos modelos detalhados há diferenças. A Figura 7 apresenta o comportamento da tensão do gerador e da corrente de campo após o degrau. O Controle Cascata apresenta maior sobressinal na tensão do gerador e na corrente de campo.

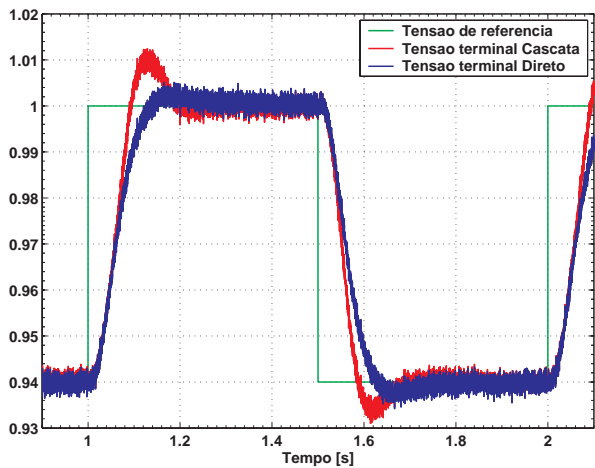


FIGURA 7 – (a): Tensão terminal – Modelos detalhados

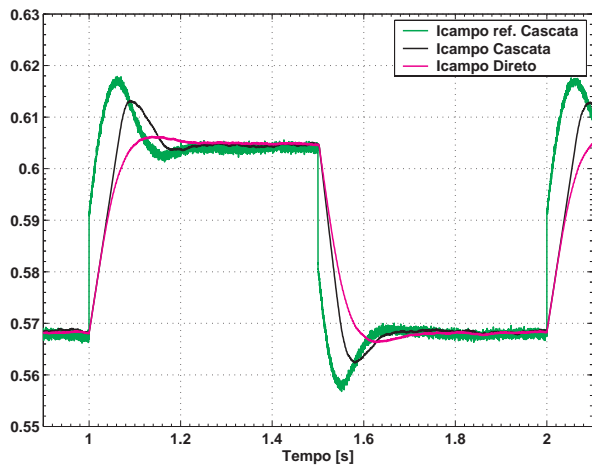


FIGURA 7 – (b): Correntes de Campo – Modelos detalhados

Analisando o comportamento da ponte de tiristores nos instantes próximos à 1s, quando o degrau de 6% foi aplicado, verifica-se que ambas as estruturas de controle provocam a saturação conversor (Figura 8). Mas nota-se que as diferenças entre o modelo simplificado (pseudocontínuo) e o detalhado do Controle Cascata são maiores do que as diferenças entre os dois modelos do Controle Direto.

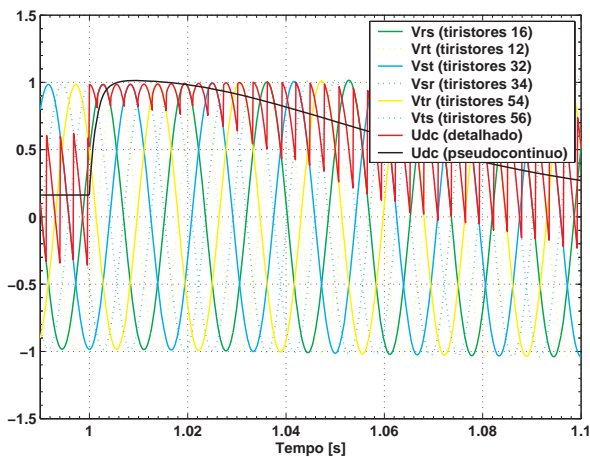


FIGURA 8 – (a): Ponte de tiristores – Controle Direto

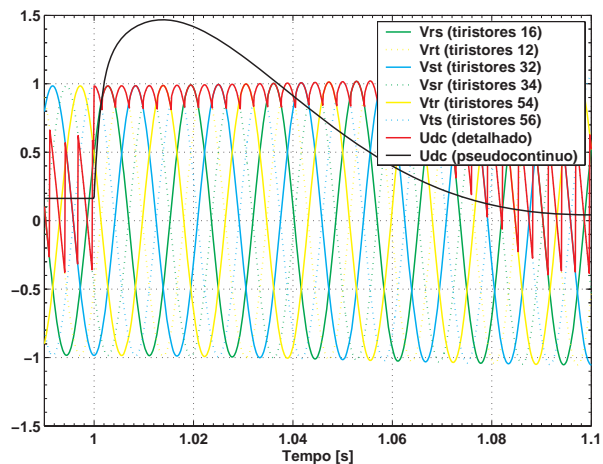


FIGURA 8 – (b): Ponte de tiristores – Controle Cascata

Comparando-se os modelos detalhado e simplificado novamente (Figura 9), verifica-se que a tensão terminal detalhada do Controle Direto (U_g) responde mais lentamente do que a tensão do modelo simplificado ($U_{g\text{linear}}$). No caso do Controle Cascata, além do atraso há o sobressinal excessivo.

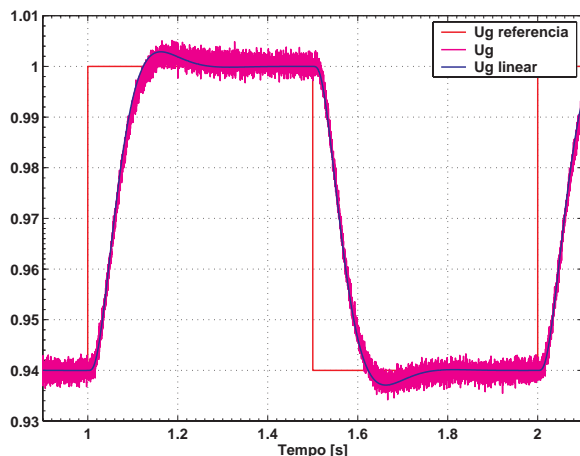


FIGURA 9 – (a): Modelo Simplificado e Detalhado – Controle Direto

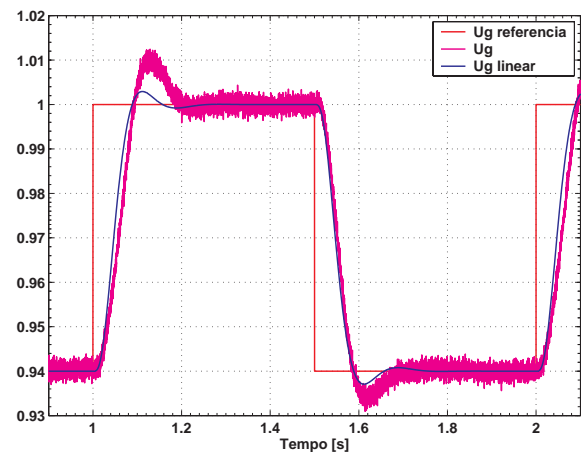


FIGURA 9 – (b): Modelo Simplificado e Detalhado – Controle Cascata

Convém discutir as razões que provocam o sobressinal na tensão terminal observado na Figura 7 – (a). Este sobressinal também aparece na corrente de campo, ver Figura 7 – (b). Uma primeira idéia seria eliminar este sobressinal limitando-se o sinal de referência de corrente de campo. Porém, esta referência não atingiu valores acima das faixas operativas de corrente de campo. O máximo valor atingido pela referência de corrente logo após o degrau é 0,618pu. Se tal corrente de campo se estabelecesse, a tensão do gerador chegaria a 1,02pu. A malha que comanda o disparo da ponte de tiristores já possui um mecanismo que evita o “wind-up” do termo integral. Entretanto, quando se utiliza o Controle Cascata, a malha externa que controla a tensão terminal não é afetada e continua calculado o termo integral, dando origem ao sobressinal observado.

A Figura 10 mostra um detalhe dos sinais dos reguladores PI do controle cascata. Os erros de tensão terminal (PI: Erro U_g) e de corrente de campo (PI: Erro I_f) permanecem próximos aos valores de zero pu, seus comportamentos refletem a diferença entre as referências ($U_{g\text{ref}}$ e $I_{f\text{ref}}$) e os respectivos valores de realimentação ($U_{g\text{fbk}}$ e I_f).

A tensão de controle da ponte de tiristores (U_c) atinge o seu limite logo após o degrau na referência de tensão e permanece em seu valor máximo durante cerca de 60ms. Durante este período, apesar da malha interna estar em seu limite de operação fornecendo tensão de teto, o regulador externo continua a aumentar a referência de corrente de campo ($I_{f\text{ref}}$). A malha interna de corrente atinge muito mais rapidamente a saturação do que a malha externa de tensão. O sobressinal excessivo ocorre devido ao fato do regulador PI externo não modificar o seu modo de operação durante os períodos de saturação da malha interna.

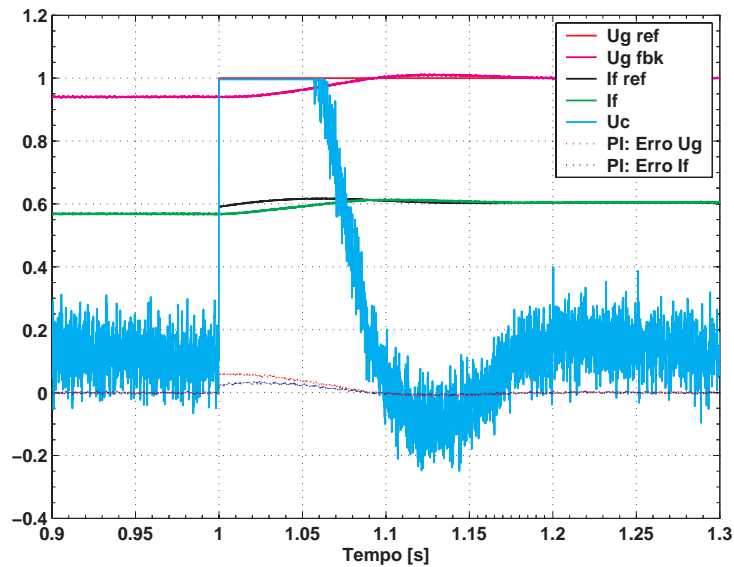


FIGURA 10: Detalhes dos reguladores PI do Controle Cascata

A concatenação entre a saturação de malhas em cascata é discutida nas referências (2) e (7).

14.0 - CONCLUSÕES

Este artigo modelou e comparou duas estruturas de controle de reguladores de tensão de hidrogeradores. As comparações mostraram que:

- O Controle Direto é mais facilmente parametrizável do que o Controle Cascata;
- As respostas dinâmicas das estruturas de controle frente a transitórios que não excitam não-linearidades não possuem diferenças relevantes;
- Demonstrou-se que existem dificuldades em concatenar a saturação das diferentes malhas no Controle Cascata.

Arranjos em cascata são normalmente utilizados para o controle de motores de corrente contínua. Nestes sistemas, as diferentes malhas controlam grandezas físicas de natureza e tempos de resposta diferentes (velocidade e corrente de armadura). O Controle Cascata aplicado a sistemas de excitação estáticos atua em grandezas com tempos de resposta semelhantes e que estão associadas à mesma grandeza física, o fluxo magnético no entreferro do gerador. Esta é a razão primordial das dificuldades em utilizar tal filosofia de controle.

15.0 - REFERÊNCIAS

- (1) BÜHLER, H., *Electronique de réglage et de commande*. Lausanne, Éditions Georgi, 1979.
- (2) BÜHLER, H., *Réglage de systèmes d'électronique de puissance. Volume 1: Théorie*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- (3) Voith Siemens Hydro Power Generation, São Paulo/BR, *Excitation Data: Corumbá IV*, 19-Set- 2002.
- (4) BARBUY, H. S.; ROCCO, L. A. F.; GOLDEMBERG, C., *Rectifier Choices for Synchronous Generator Exciters*.
- (5) *Requisitos Mínimos para a Conexão à rede Básica, Submódulo 3.8*, ONS – Operador do Sistema Elétrico, 2004.
- (6) FRÖHR, F.; ORTTENBURGER, F.; *Introduction to Electronic Control Engineering*. Berlin; München, Siemens-Aktiengesellschaft and Heyden & Son, 1970.
- (7) BÜHLER, H., *Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Volume 2: Entraînements Réglés*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.