



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

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS PRÓS E CONTRAS DAS APLICAÇÕES DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS E ESTÁTICA EM PCHs

Francisco Galvão Junior *

**Fábio José Garcia
ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL LTDA**

Cláudio Dias

RESUMO

No cenário de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), os sistemas de excitação usualmente aplicados são brushless e estática. Assim, este trabalho tem por finalidade apresentar estudos que devem contribuir na definição de qual sistema é mais técnica e economicamente viável para uma determinada aplicação. Para tal finalidade, serão abordados aspectos técnicos, econômicos e operacionais de algumas aplicações de pequenas centrais hidrelétricas. As aplicações apresentadas retratam sistemas elétricos reais, onde os dados implementados nas simulações computacionais foram obtidos junto aos fornecedores dos equipamentos de geração e transmissão de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de Excitação, Regulador de Tensão, Pequenas Centrais Hidrelétricas

1.0 - INTRODUÇÃO

A função do sistema de excitação é atuar no controle da corrente de campo do gerador, exercendo ações de regulação e proteção da máquina. As ações de regulação, as quais incluem os controles das tensões terminais do gerador e do fluxo de potência reativa, devem garantir o funcionamento satisfatório do gerador nos regimes de operação contínuos e transitórios. De um modo geral, o controle direto das tensões terminais do gerador é realizado em aplicações onde a unidade geradora (UG) está conectada a uma rede elétrica isolada. Já em sistemas elétricos interligados, o sistema de excitação deve atuar no controle do fluxo de potência reativa trocada entre a máquina e a rede de suprimento. As ações de proteção exercidas pelo sistema de excitação devem garantir o funcionamento do gerador dentro dos limites operacionais definidos em projeto, que estão indicados na sua curva de capacidade.

Como poderá ser observado nas simulações apresentadas, o sistema de controle da excitação deve atuar dinamicamente no ajuste da corrente de campo durante perturbações na rede elétrica que provoquem oscilações nas tensões dos barramentos. Durante os estudos destas oscilações, é importante ressaltar que não se deve considerar somente a excitação e as características operacionais da máquina, tendo em vista que as características da rede, onde a UG será conectada, influenciam diretamente no comportamento dinâmico do sistema.

Além de apresentar os comportamentos dinâmicos dos sistemas de excitação estática e brushless em diversas aplicações de PCHs, o trabalho mostra os resultados de um estudo sobre o custo e a viabilidade da aplicação de cada sistema.

2.0 - SISTEMAS DE EXCITAÇÃO APLICADOS EM PCH

Dentre os principais componentes do sistema de excitação, se destacam os seguintes: a excitatriz, que poderá ser estática ou rotativa, o conversor e o regulador de tensão com seus limitadores e compensadores.

(*) Avenida Charles Schneider, s/n – CEP 12040-001 – Taubaté – SP – Brasil
Tel.: (012) 3608-3058 – Fax.: (012) 3608-3286 – e-mail: francisco.galvao.junior@power.alstom.com

De um modo geral os sistemas de excitação empregados em PCH's possuem as características mínimas necessárias para garantir o funcionamento adequado do gerador dentro de sua curva de capacidade. Assim sendo, os limitadores comumente empregados são sobrecorrente de excitação, subcorrente de excitação, sobretensão do gerador, subtensão do gerador, sobrecorrente no estator e Voltz/Hertz.

Em ambos os sistemas de excitação, os reguladores permitem o funcionamento nos seguintes modos de operação:

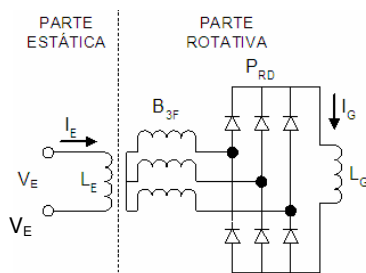
- Modo Automático: o controle da tensão nos terminais do gerador é efetuado de forma automática através de uma realimentação negativa da tensão proveniente da saída do estator.
- Modo Manual: o controle da tensão é feito em malha aberta, sendo o ajuste inserido de modo manual tendo como referência a corrente de campo ou a tensão de saída nos terminais da máquina.

Geralmente, o modo de operação manual é empregado durante o comissionamento do gerador para levantar as suas curvas características.

2.1 Sistema de Excitação Brushless

Em pequenas centrais hidrelétricas, a utilização de sistema de excitação brushless é bastante comum, tendo em vista os benefícios inerentes a este sistema em determinadas aplicações. De um modo geral, os benefícios estão associados ao custo da sua aplicação e à inexistência dos conjuntos de anéis coletores e escovas.

A ausência de anéis coletores e escovas está relacionada ao fato do acoplamento entre a excitatriz e o campo do gerador ser eletromagnético. Analogamente a um gerador síncrono, o fluxo magnético produzido pela circulação de corrente contínua (I_E) nas bobinas dos pólos (L_E), resulta na indução de três tensões defasadas eletricamente de 120° nas bobinas do rotor (B_{3F}). A tensões induzidas são retificadas pela ponte a diodos (P_{RD}), e o sinal DC aplicado ao campo do gerador.



Onde:

- L_E – campo da excitatriz (parte estática);
- V_E – tensão no campo da excitatriz;
- I_E – corrente no campo da excitatriz;
- B_{3F} – conjunto trifásico de bobinas (parte rotativa);
- P_{RD} – ponte trifásica rotativa a diodos;
- L_G – campo do gerador principal.

Figura 1 – Sistema de Excitação Brushless

Geralmente, o projeto eletromagnético da excitatriz brushless define baixos valores de tensão (V_E) e corrente (I_E) no campo da excitatriz. Esta característica operacional reduz significativamente a potência do circuito de alimentação do campo do gerador, baixando a complexidade e os custos do transformador, bem como dos dispositivos de eletrônica de potência, proteção e etc.. Para ilustração, a figura 2 mostra uma excitatriz brushless montada no eixo do gerador.

2.2 Sistema de Excitação Estática

No sistema de excitação estático, a corrente do campo do gerador é suprida por um retificador trifásico. Os terminais de saída DC do mesmo estão ligados a um conjunto de escovas que fecha o circuito através do contato com um par de anéis coletores.

Usualmente, o retificador é uma ponte trifásica tiristorizada (6 pulsos) que é alimentada no lado AC por um transformador isolado a seco, denominado transformador de excitação. A diferença preponderante entre este sistema e a excitação brushless é notória quando se analisa a potência do transformador de excitação. A potência do transformador é especificada a partir da tensão de teto (*ceiling*) e a corrente máxima de operação em regime contínuo do campo do gerador, conforme as equações (1) e (2) apresentadas a seguir:

$$P_T = \sqrt{3} \times V_{FF} \times I_L \quad I_L = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times I_C \quad (1)$$

Assim,

$$P_T = \sqrt{2} \times V_{FF} \times I_C \quad (2)$$

Onde:

- P_T – potência aparente do transformador;
- V_{FF} – tensão de teto (Fase-Fase);
- I_L – máxima corrente de excitação (AC);
- I_C – máxima corrente de excitação (DC).

Comparando a potência do circuito de alimentação de um sistema brushless com um sistema estático, pode-se concluir que as dimensões e os custos do transformador de excitação e dos conversores de potência são bem mais expressivos no sistema estático.

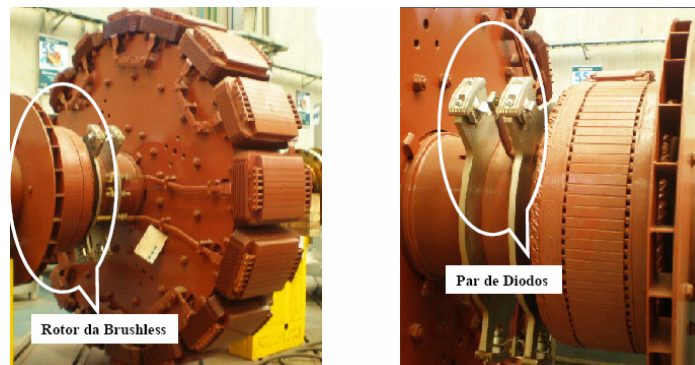


Figura 2 – Excitatriz Brushless

3.0 - REGULADORES DE TENSÃO

Com a evolução tecnológica dos dispositivos de eletrônica de potência e controladores programáveis, a lógica de controle em malha fechada do sistema de excitação passou a atuar com maior eficiência, agindo mais rapidamente durante as variações de demanda da rede elétrica e ocorrências de oscilações de tensão. A maior eficiência dos sistemas atualmente empregados é notória quando se faz a comparação com o método de regulação empregado quando os primeiros reguladores automáticos de tensão foram introduzidos no mercado. Antes do advento dos reguladores automáticos, os operadores da central hidrelétrica controlavam a corrente de campo manualmente, respeitando os procedimentos operacionais pré-definidos e a demanda da rede elétrica, que era acompanhada através de medidores analógicos de grandezas elétricas.

Nos reguladores atualmente empregados, quando se trata de sistema de excitação estática, o sinal de saída do regulador de tensão deve atuar no circuito de disparo associado à ponte trifásica a tiristores, respeitando a resposta produzida na saída da malha de controle implementada. Analogamente ao regulador de tensão aplicado no sistema de excitação estática, na excitação brushless a atuação no regulador é no semicondutor de potência conectado em série com o campo da excitatriz. Geralmente, o semicondutor empregado pelos fabricantes de reguladores de tensão é o IGBT (Insulated Bipolar Gate Transistor).

Basicamente, o regulador possui um processador digital compatível com as necessidades operacionais do sistema, uma fonte de alimentação, conversores de sinais e um determinado número de entradas e saídas digitais e analógicas para as interfaces com os dispositivos externos. No processador, as funções matemáticas PID são implementadas para exercer as funções de controle. Os reguladores de tensão implementados nas simulações apresentadas na seção 5, foram modelados de acordo com modelos AC1 e ST1 padronizados pelo IEEE.

4.0 - ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA DAS APLICAÇÕES DE BRUSHLESS E ESTÁTICA EM PCH

Nesta seção do trabalho, está apresentada uma comparação operacional e construtiva entre os sistemas de excitação estática e brushless, segundo a experiência prática da ALSTOM.

4.1 Influência das Características do Gerador no Projeto do Sistema de Excitação

A potência elétrica necessária para alimentar o campo do gerador principal e a rotação nominal da máquina estão entre os principais fatores que influenciam na escolha do tipo de excitação a ser utilizado em uma determinada PCH, pois o tamanho da excitatriz Brushless está diretamente relacionado a estas duas grandezas.

As dimensões da excitatriz tendem a aumentar de forma significativa em geradores de baixas rotações. Nestes casos, a aplicação da excitatriz impacta diretamente no dimensionamento de diversos componentes do gerador principal, tais como: eixo, bases e revestimentos. A seguir está apresentado um breve comparativo entre os sistemas de excitação estática e brushless, sendo possível observar diversos itens influenciados pela excitatriz no projeto do gerador principal.

Tabela 1 – Estática x Brushless

ITEM	SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA	SISTEMA DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS
Rotação nominal do Gerador	Não influencia.	Impacto nas dimensões da excitatriz.
Distância entre Mancais	Menor distância entre mancais.	Maior distancia entre mancais, acrescendo o eixo
Massa total do gerador	Não tem influência na massa total do gerador.	Acréscimo na massa do gerador.
Tensão de Teto (ceiling)	Ceiling positivo e negativo.	Ceiling positivo.
Descarga de Campo	Descarga de campo imediata devido à presença do resistor de descarga.	Descarga de campo com constante de tempo natural.
Monitoramento de campo	Monitoramento permanente da tensão e corrente de campo.	Dificuldade no monitoramento da corrente do campo do gerador.
Manutenção	Necessidade de manutenção periódica das escovas.	Inexistência dos problemas relacionados ao contato entre os anéis e as escovas.

Na tabela 1 se verifica que a escolha da excitação influencia diretamente nas dimensões finais do gerador. A utilização de excitatrizes rotativas pode representar um aumento de 5,0% a 8,0% na massa final do gerador. Em geral, este acréscimo de massa se deve ao redimensionamento do eixo para atender ao cálculo da rotação crítica e da massa adicional em componentes como bases, mancais e revestimento.

4.2 Comparação de Custos (Brushless x Estática)

Na fase de definição de qual sistema de excitação deve ser aplicado, os componentes integrantes dos sistemas, bem como os seus impactos na massa do gerador devem ser analisados conjuntamente. Conforme mencionado, nos sistemas de excitação estática a potência nominal de campo do gerador é suprida diretamente por um conversor controlado trifásico, cujos terminais de saída CC estão conectados aos anéis coletores. Nesse sistema, o conversor de potência e o transformador de excitação têm um peso considerável no custo total do sistema de excitação, devido às elevadas potências dos componentes estáticos.

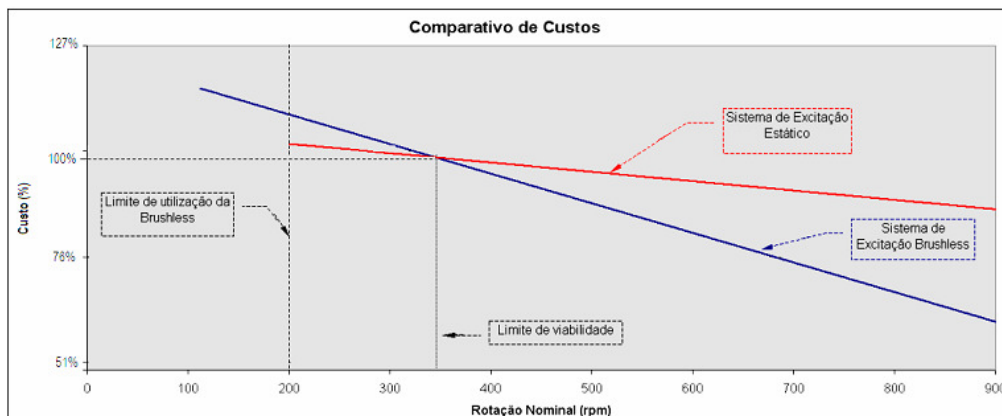


Figura 3 – Comparativo de Custos

Já nos geradores com excitatriz brushless, os componentes de potência são responsáveis pela alimentação dos pólos da excitatriz rotativa. Nos projetos eletromagnéticos das excitatrizes brushless, uma corrente de baixo valor é responsável pela produção do fluxo magnético que induzirá no rotor da brushless a tensão necessária para alimentar o campo do gerador. Com isso, os custos dos componentes estáticos de potência passam a ter um peso muito menor no custo final do sistema de excitação.

No gráfico apresentado na figura 3, se apresenta um comparativo de custos entre os sistemas de excitação estática e brushless em geradores de 60Hz com potência nominal compreendida entre 12 e 17 MVA, sendo possível verificar a influência da rotação no custo final dos sistemas de excitação.

5.0 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO COM SISTEMAS DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS E ESTÁTICA

A estabilidade do sistema de potência pode ser definida como a capacidade do sistema retornar a um estado de operação de equilíbrio após a ocorrência de um distúrbio na rede elétrica. A configuração do sistema e sua condição operacional antes do distúrbio influenciam no comportamento da rede elétrica durante um período de instabilidade.

As condições para que um sistema elétrico de potência opere estavelmente estão relacionadas à manutenção do sincronismo entre os geradores que alimentam a rede e ao controle das tensões nos barramentos do sistema elétrico. Especificamente neste artigo, os estudos que estão apresentados nesta seção abordam apenas a estabilidade de tensão de uma dada rede elétrica durante a ocorrência de distúrbios de diversas magnitudes. Como apresentado nos itens subseqüentes, em distúrbios pequenos, por exemplo, variações de cargas no sistema, a estabilidade deve ser retomada pelas ações dos geradores e dos compensadores da rede. Em situações de curto-circuito e conseqüentes perdas de linhas de transmissão e unidades geradoras, o sistema deve suprir a máxima carga possível, buscando minimizar os efeitos decorrentes dos distúrbios.

Os resultados das simulações abordadas a seguir representam o comportamento de um sistema radial alimentado por uma PCH, onde os dois geradores do sistema, os transformadores, as linhas de transmissão e as cargas possuem as seguintes características elétricas.

Tabela 2 – Dados do Gerador

DADOS DE CADA GERADOR															
S [MVA]	U [kV]	Fp	Xd [pu]	X'd [pu]	X''d [pu]	X'q [pu]	Xl [pu]	Xq [pu]	T'd [s]	T''d [s]	Ra [s]	T'do [s]	T''do [s]	T''do [s]	H [s]
16.67	13.8	0.9	1.40	0.37	0.28	0.27	0.28	0.89	1.02	0.04	0.0078	4.07	0.06	0.12	2.40

Tabela 3 – Dados do Transformador e Linha de Transmissão

DADOS DO TRANSFORMADOR ELEVADOR				DADOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO					
Z [pu]	Sn [MVA]	V1 [kV]	V2 [kV]	R0 [ohm/km]	R1 [ohm/km]	L0 [H/km]	L1 [H/km]	C0 [nF/km]	C1 [nF/km]
0,12	37	13,8	138	0,4242	0,0974	0,0044	0,00123	5,89	9,52

A modelagem do gerador segue o modelo de Park (eixos d e q), de acordo com o circuito mostrado a seguir:

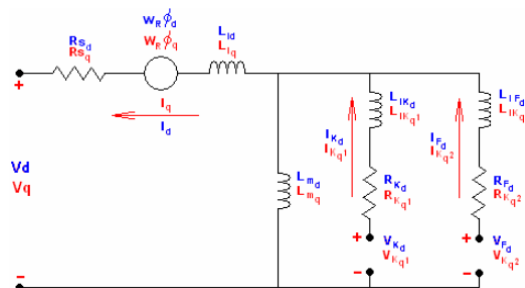


Figura 4 – Modelagem da Máquina.

Na figura 4, as variáveis apresentadas em azul correspondem ao eixo direto e as variáveis em vermelho o eixo em quadratura.

Os gráficos apresentados nas figuras 5 e 6 mostram as respostas dos sistemas de excitação brushless e estática, bem como o comportamento dinâmico da tensão quando ocorre uma entrada abrupta de carga no sistema em estudo. Para facilitar a interpretação dos resultados das simulações, os pontos a serem analisados correspondem às seguintes situações.

- T1: entrada do gerador no sistema.
- T2: entrada de uma carga equivalente a 20% da capacidade nominal do sistema.
- T3: entrada de uma carga equivalente a 40% da capacidade nominal do sistema.

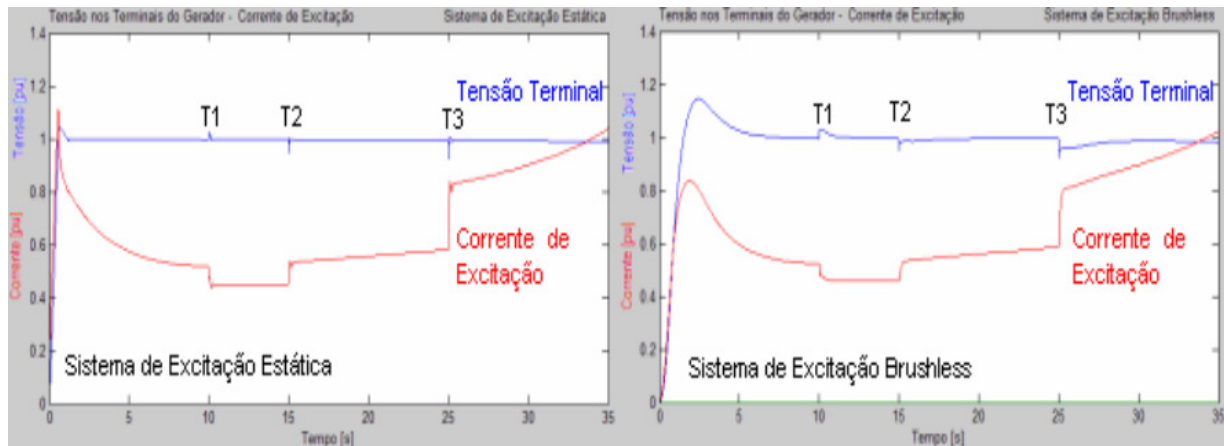


Figura 5 – Comportamento das tensões de excitação e terminal do gerador.

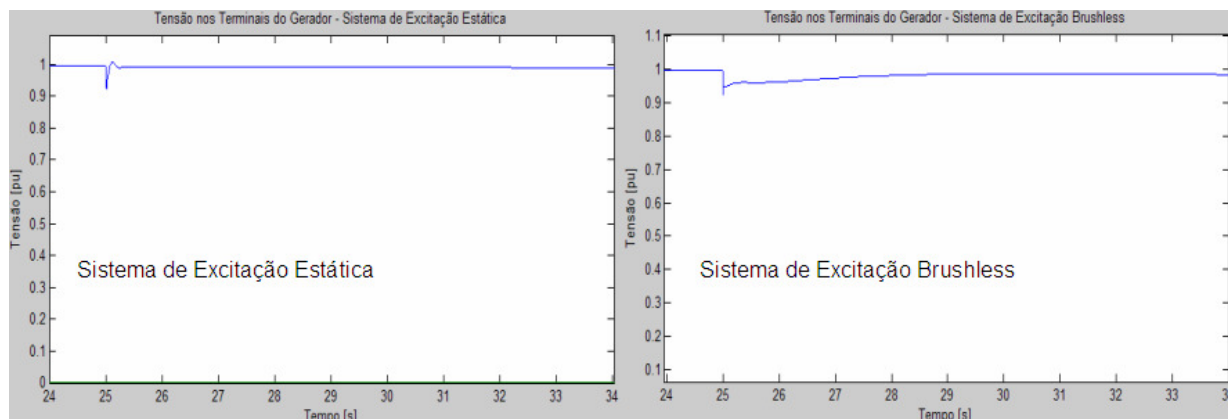


Figura 6 – Detalhe do comportamento da tensão no ponto T3.

Conforme apresentado nas curvas em vermelho mostradas na figura 5, as variações de carga resultam em ações corretivas do sistema de excitação da máquina. As quedas nos valores de tensão ilustradas pelos pontos T2 e T3 resultam do acréscimo na demanda de energia provocada pelas entradas de 20% e 40% de carga no sistema, respectivamente

Os resultados das simulações expostos nos gráficos 5 e 6 retratam uma situação com elevado grau de severidade para a estabilidade do sistema. Diante desta situação, é esperado que a excitação do gerador exerça ações corretivas que contribuam para a manutenção da tensão dentro da sua faixa nominal de operação. Diante do exposto nos gráficos supracitados, para o sistema radial em questão, tanto o sistema de excitação estática quanto o sistema brushless possuem uma capacidade de recuperação satisfatória neste transitório analisado, promovendo o retorno da tensão a sua faixa nominal de operação em um curto intervalo de tempo.

Ao se observar os gráficos das figuras 5 e 6, é possível notar que o menor tempo de resposta da excitação estática reflete no tempo de retorno da tensão a sua faixa nominal de operação. Ao analisar a figura 6, se verifica que a entrada de carga representada por T3, a tensão terminal do sistema com excitação estática retorna a sua faixa nominal em aproximadamente 0,4 segundo, ao passo que a tensão no sistema com excitatriz brushless leva aproximadamente 2 segundos para atingir a faixa nominal de operação.

Apesar da diferença entre o tempo de resposta dos sistemas estático e brushless, a performance do sistema de excitação brushless neste caso é completamente aceitável, tendo em vista que o nível de exigência dos critérios de estabilidade aplicados a uma PCH é mais ameno.

Os próximos dois gráficos apresentados nas figuras 7 e 8, apresentam os comportamentos da corrente de excitação e da tensão terminal do gerador diante de uma situação de curto-circuito fase-terra com desligamento da linha de transmissão em curto após 120 ms da ocorrência da falta. As condições operacionais do sistema antes da ocorrência do curto são as mesmas das simulações apresentadas nas figuras 5 e 6.

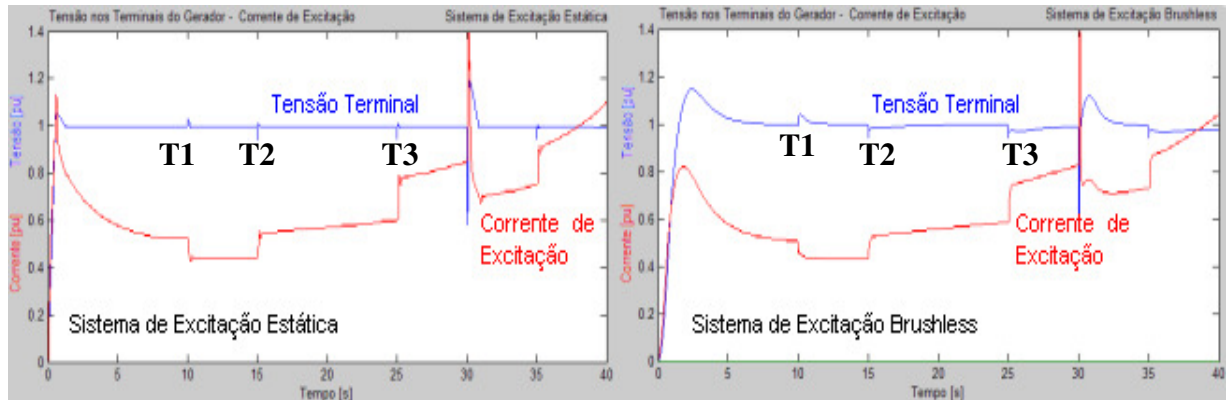


Figura 7 – Comportamento dinâmico das tensões de excitação e terminal do gerador.

A Figura 7 apresenta as respostas dos sistemas de excitação estática e brushless diante do curto-circuito e a conseqüente abertura da linha. Como no caso de entrada abrupta de carga, a tensão do sistema com excitação estática retornou à faixa nominal de operação mais rapidamente que o sistema com excitatriz brushless, conforme pode ser observado na figura 8.

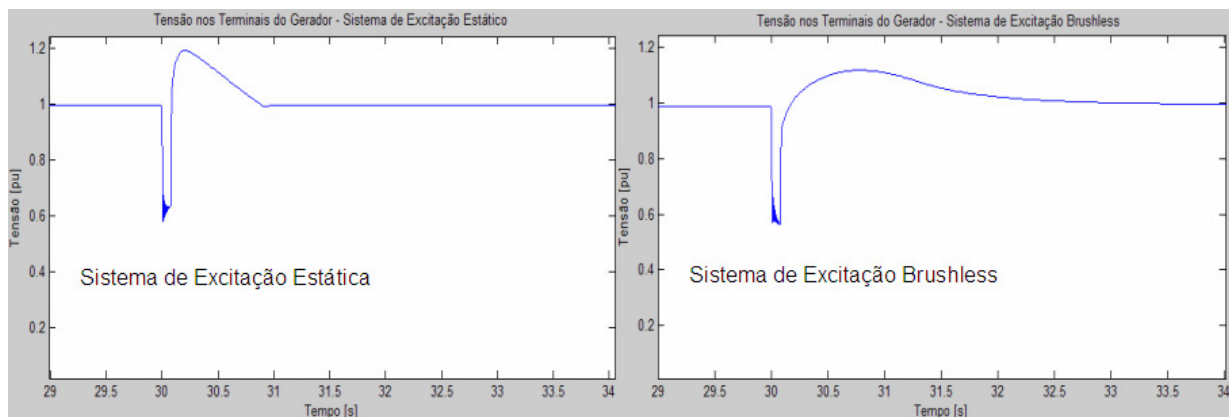


Figura 8 – Detalhe do comportamento da tensão no ponto T2.

Ao se analisar a figura 8, é possível verificar que no caso da excitação estática o tempo para retornar a faixa nominal foi de aproximadamente 1 segundo, já o sistema com excitatriz brushless levou aproximadamente 2 segundos para retornar a tensão para sua faixa nominal de operação. Uma situação de curto-circuito fase-terra é extremamente severa para a manutenção da estabilidade do sistema, exigindo do sistema de excitação uma ação ágil e eficaz. Neste caso, como no transitório apresentado nas figuras 7 e 8, ambos os sistemas de excitação tiveram um comportamento eficaz durante a situação analisada.

Havendo um curto-circuito, a tensão de excitação deve aumentar rapidamente para compensar a queda de tensão na rede. No caso de PCHs, a tensão máxima de excitação (ceiling) recomendada é 1,6 pu da tensão nominal. De acordo com a figura 7, em ambos os sistemas, no instante da ocorrência do curto-circuito a corrente de excitação aumentou até aproximadamente 1,4 pu. No entanto, devido às constantes de tempo inerentes a cada um dos sistemas, a respostas da tensão do terminal do gerador possuem comportamentos distintos, conforme apresentado na figura 8.

A elevação das tensões dos barramentos do sistema após a abertura da linha é resultado de uma redução significativa do fluxo de potência transferida para as cargas. Estas elevações de tensão também devem ser mitigadas pelas ações da malha de controle do sistema de regulação.

6.0 - CONCLUSÃO

O trabalho mostrou as diferenças entre os sistemas de excitação estática e brushless, ressaltando aspectos econômicos e comportamentos transitórios. Os resultados do estudo indicam a faixa de rotações em que cada sistema de excitação se torna economicamente mais viável. Os parâmetros que influenciam na viabilidade de cada aplicação estão expostos na Tabela 1, donde verifica-se a influência de cada um.

O trabalho também abordou as respostas dos sistemas de excitação brushless e estática diante de situações transitórias. Pode ser observado que apesar do maior tempo de resposta, o comportamento do sistema de excitação brushless atende aos requisitos do sistema. Sendo assim, dentro da faixa de rotação onde este sistema apresenta um custo menor que o sistema estático, a brushless se torna uma solução atrativa para o cliente, tendo em vista o menor valor de investimento inicial para a implementação da usina.

Finalmente, foi possível mostrar que, a opção por um sistema de excitação estática ou por um brushless, segue mais um critério econômico, do que uma avaliação das restrições que um sistema possa apresentar quando comparado ao outro. Naturalmente, nesse contexto, o empreendedor deverá levar em consideração elementos complementares à implantação do gerador dentro da casa de máquinas, bem como aspectos relacionados com a manutenção da usina, e não pautar a sua decisão somente pelos argumentos expostos neste IT.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. Electric Power Research Institute, Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., 1994.
- (2) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. Recommended Practice for Excitation System Models For Power System Stability Studies - IEEE Std 421.5 – 2005..
- (3) GALVAO, Francisco. Regulador de Tensão para Sistema de Excitação Brushless – Desenvolvimento e Aplicação – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2007, Brasil.
- (4) TURBAY, Julio César. Empleo Del EMTP Para Los Estudios de Estabilidad Transitoria Con Especial Atención al Modelado De Los Sistemas de Control de la Excitación. Facultad Regional Santa Fé, Argentina.