



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

FI/GPC/23
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO NA DINÂMICA DO CURTO-CIRCUITO EM GERADORES SÍNCRONOS

Rafael Bertolini de Paiva (*)
REIVAX

Nelson Zeni Jr
REIVAX

Paulo Marcio da Silveira
UNIFEI

RESUMO

Estudos convencionais de curto-circuito em geradores síncronos utilizam o modelo de uma fonte ideal de tensão atrás de uma impedância. Essa metodologia é conveniente para estudos estáticos, onde são obtidos os níveis de curto-circuito trifásico e monofásico e da relação X/R, para as barras da rede básica e demais instalações de transmissão (1) e (2). Todavia, a contribuição da corrente de curto-circuito dos geradores síncronos varia ao longo do tempo em virtude da característica da máquina síncrona e do sistema de excitação (3). O foco desse Informe Técnico é analisar o impacto do sistema de excitação nas correntes de curto-circuito.

PALAVRAS-CHAVE

Curto-Circuito, Sistema de Excitação, Gerador Síncrono, Regulador de Tensão.

1.0 - MODELAGEM PARA ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO

Através dos estudos de curto-circuito no domínio do tempo é possível obter o valor aproximado da corrente de curto-circuito trifásico simétrico (CC3F) em um dado instante do tempo a partir do momento do início da falta. Todavia, esses estudos, assim como os estudos de transitórios eletromecânicos, são bastante complexos, porque necessitam da representação detalhada da máquina síncrona (MS) e de todo o sistema de excitação, que contempla o regulador automático de tensão (RAT) e o conversor de potência (CP).

As simulações foram realizadas usando a ferramenta computacional *Matlab/Simulink*, e foram considerados os modelos matemáticos detalhados a seguir.

1.1 – Conversor de Potência (CP)

A modelagem adequada do tipo do conversor de potência utilizado pelo sistema de excitação é fundamental para um resultado fiel dos estudos de transitórios eletromecânicos, incluindo o de curto-circuito.

Para os estudos de curto-circuito, analisados nesse informe técnico, foram considerados quatro tipos de conversores de potência. As variáveis utilizadas nos modelos dos conversores são apresentadas na Tabela 1. Os parâmetros são resumidos na Tabela 2, junto com os respectivos valores utilizados nas simulações.

(*) Rod. José Carlos Daux, 600 – Tecnópolis - CEP 88030-904 Florianópolis, SC – Brasil
Tel: (+55 48) 3027-3751 – Fax: (+55 48) 3027-3735 – Email: rbp@reivax.com.br

TABELA 1 - Variáveis dos Conversores de Potência

VARIÁVEIS	DESCRIÇÃO
Vr	Sinal de saída de regulação do RAT
Vt	Sinal da tensão terminal da MS
It	Sinal da corrente terminal da MS
Efd	Sinal da tensão de excitação da saída do conversor de potência que alimenta o campo da MS
Ei	Sinal de tensão proporcional a corrente de campo da MS
Ve	Tensão de excitação da excitatriz rotativa
Ie	Corrente de excitação da excitatriz rotativa

TABELA 2 - Parâmetros dos Conversores de Potência

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	VALOR DA SIMULAÇÃO
Vp	Tensão de teto positivo obtida pela máxima tensão retificada	5,0 pu
Vn	Tensão de teto negativa obtida pela mínima tensão retificada	-5,0 pu
lr	Relação de transformação do transformador de <i>compound</i>	1,0
Isat	Saturação do transformador de <i>compound</i>	2,5 pu
Vep	Máxima tensão de excitação da excitatriz rotativa	5,0 pu
Ven	Mínima tensão de excitação da excitatriz rotativa	0,0 pu
Te	Constante de tempo da excitatriz rotativa	0,2 s
Ke	Ganho de realimentação da excitatriz rotativa	1,0 pu

1.1.1 Excitação Constante

O sistema de excitação constante, apresentado na Figura 1, é um modelo simplificado ideal onde o campo do gerador síncrono é excitado por uma fonte de tensão constante. A Figura 2 ilustra o diagrama do modelo matemático.

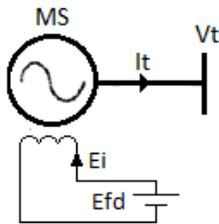


FIGURA 1 - Excitação Constante – Diagrama

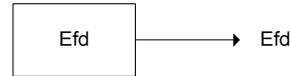
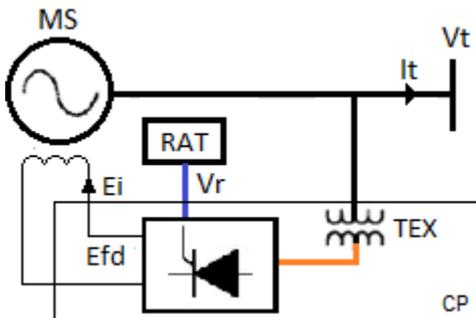
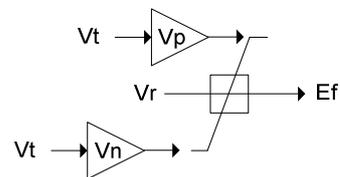


FIGURA 2 - Excitação Constante – Modelo Matemático

1.1.2 Sistema de Excitação Estática Bus-Fed

No sistema de excitação estática Bus-Fed, apresentado na Figura 3, a energia para a excitação do campo é drenada dos terminais do próprio gerador através de um transformador de excitação (TEX). A Figura 4 ilustra o diagrama do modelo matemático.

FIGURA 3 - Excitação Estática *Bus-Fed* – DiagramaFIGURA 4 - Excitação Estática *Bus-Fed* – Modelo Matemático

1.1.3 Sistema de Excitação Estática *Bus-Fed* com *Compound*

No sistema de excitação estática *Bus-Fed* com *compound*, apresentado na Figura 5, a energia para a excitação do campo é drenada dos terminais do gerador síncrono através de um transformador de excitação (TEX) e também da corrente terminal através de um transformador de *compound* (TCO). O modelo matemático é apresentado na Figura 6.

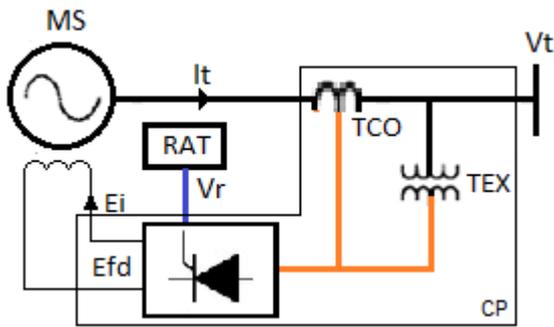


FIGURA 5 - Excitação Estática *Bus-Fed* com *Compound* – Diagrama

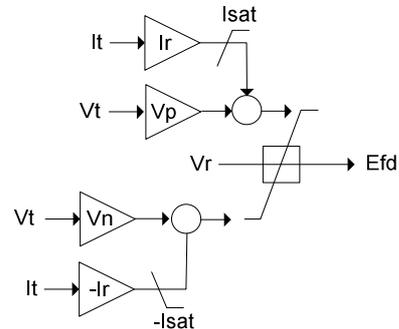


FIGURA 6 - Excitação Estática *Bus-Fed* com *Compound* – Modelo Matemático

Existem diversas topologias de conexão do TCO, a que foi utilizada no modelo matemático assume que a conexão do TCO é realizada de tal maneira que a tensão do secundário do TCO estará em fase com a tensão no secundário do TEX para correntes puramente indutivas.

1.1.4 Sistema de Excitação *Brushless*

O sistema de excitação *Brushless*, apresentado na Figura 7, normalmente um gerador de ímãs permanentes (PMG - permanent magnetic generator) alimenta o conversor de potência, o qual por sua vez alimenta uma excitatriz rotativa. A tensão alternada de saída da excitatriz é retificada por um conversor rotativo, que então excita o campo do gerador síncrono. O modelo matemático é apresentado na Figura 8.

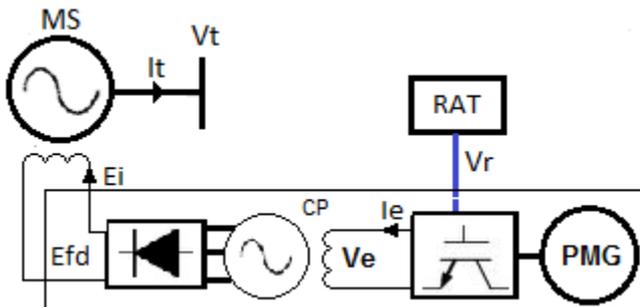


FIGURA 7 - Excitação *Brushless* – Diagrama

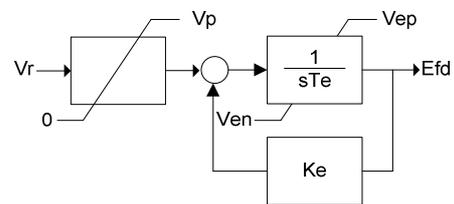


FIGURA 8 - Excitação *Brushless* – Modelo Matemático

1.2 Regulador Automático de Tensão (RAT)

O controle do RAT é do tipo automático, e não há comutação do modo de controle. Nessa condição, o sinal de regulação (V_r) do RAT que atua no conversor de potência satura no seu valor máximo durante o CC3F. Pode-se assumir isso em virtude do erro de tensão, para todas as simulações analisadas, foram sempre maiores que 5%. Em função disso, o modelo do RAT pode ser resumido pela função degrau representado na Figura 9.

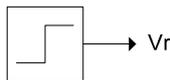


FIGURA 9 - Modelo Matemático do RAT

O instante de comutação do degrau se dá no instante da falta. Ressalta-se que a ação dos limitadores instantâneos do tipo sobreexcitação ou de corrente estatórica do RAT durante o CC3F foram desconsiderados

1.3 Máquina Síncrona de Pólos Salientes

O modelo de máquina síncrona utilizado nas simulações é o de pólos salientes com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores (4). Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3

TABELA 3 - Parâmetros da Máquina Síncrona (MS)

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	VALOR DA SIMULAÇÃO
T'_{do}	Constante de tempo transitória de eixo direto	5,00 s
T''_{do}	Constante de tempo subtransitória de eixo direto	0,05 s
T''_{qo}	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura	0,10 s
x_d	Reatância de eixo direto	1,00 pu
x'_d	Reatância transitória de eixo direto	0,30 pu
x''_d	Reatância subtransitória de eixo direto	0,20 pu
x_l	Reatância de dispersão	0,15 pu
x_q	Reatância de eixo em quadratura	0,80 pu
A_g	Parâmetro de saturação	0,03
B_g	Parâmetro de saturação	6,50
FP	Fator de potência nominal	0,90

2.0 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONVERSORES DE POTÊNCIA NO CC3F FRANCO

O nível de geração da unidade no instante da pré-falta é considerada nula, e a tensão terminal igual a 1pu. No instante $t=0,5s$ é aplicado um CC3F franco. A distância da falta é dada pela impedância X_{cc} . A Figura 10 ilustra o diagrama unifilar da simulação.

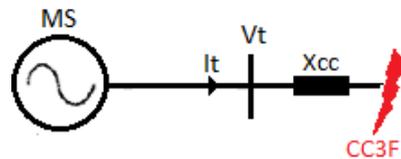


FIGURA 10 - Circuito Equivalente do CC3F

O resultado da simulação com $X_{cc} = 0\%$ é apresentado na Figura 11. A Figura 12 é para o CC3F com $X_{cc} = 10\%$, enquanto que Figura 13 é com $X_{cc} = 50\%$. A Tabela 4 apresenta o comparativo dos resultados do CC3F para cada sistema de excitação.

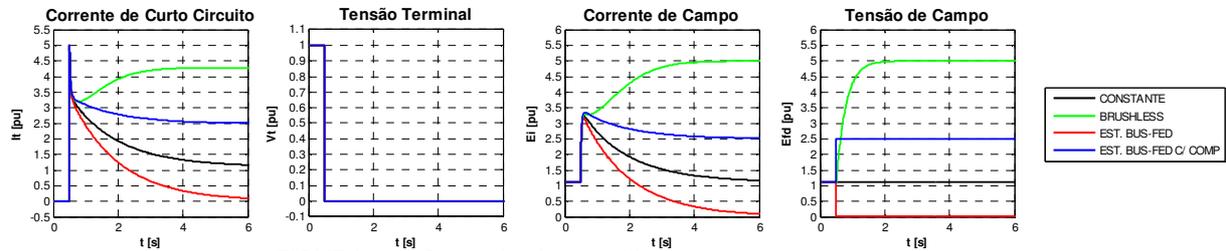
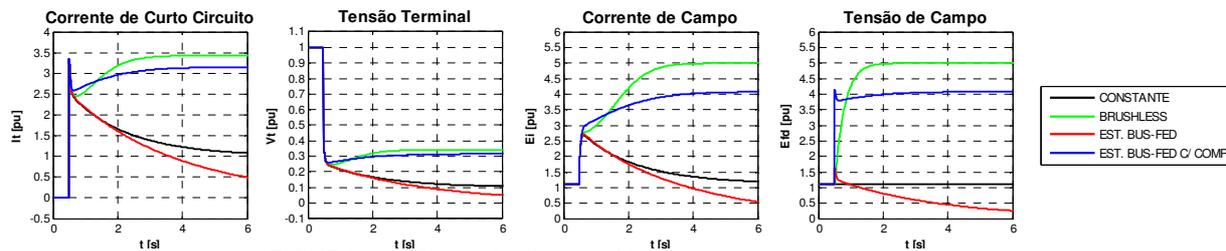
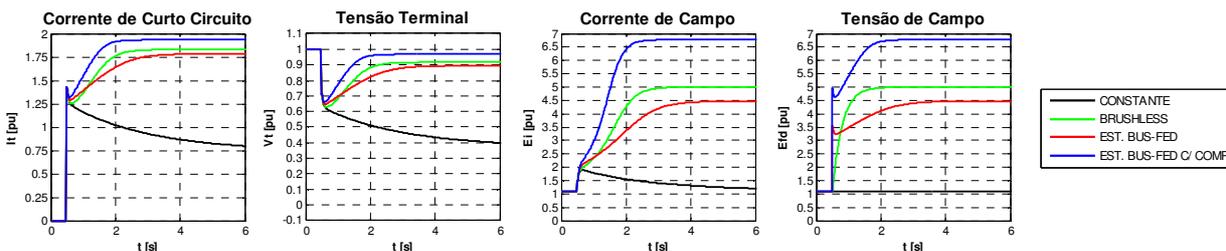
FIGURA 11 - Curto-circuito com $X_{cc} = 0\%$ FIGURA 12 - Curto-circuito com $X_{cc} = 10\%$ 

FIGURA 13 - Curto-circuito com $X_{cc} = 50\%$

TABELA 4 - Resultados do CC3F

Xcc	Constante			Brushless			Estática Bus-Fed			Estática Bus-Fed c/ compound		
	0%	10%	50%	0%	10%	50%	0%	10%	50%	0%	10%	50%
$I_t(t=0,0)^*$	5,00	3,33	1,43	5,00	3,33	1,43	5,00	3,33	1,43	5,00	3,33	1,43
$I_t(t=0,10)^*$	3,28	2,50	1,25	3,31	2,51	1,26	3,21	2,50	1,29	3,36	2,60	1,32
$I_t(t=0,25)^*$	3,01	2,33	1,21	3,19	2,46	1,27	2,85	2,34	1,32	3,21	2,62	1,40
$I_t(t=0,50)^*$	2,72	2,15	1,16	3,27	2,57	1,37	2,42	2,17	1,39	3,09	2,71	1,55
$I_t(t>)^*$	1,11	1,01	0,74	4,29	3,43	1,83	0,00	0,04	1,78	2,41	3,16	1,93

*Tempo em relação ao instante da falta

Os curtos-circuitos foram aplicados na condição da máquina síncrona sem carregamento. Nessa condição não há a influência da variação da velocidade nos fluxos de eixo direto e quadratura, o que alteraria o valor das impedâncias da máquina síncrona, e por consequência, o comportamento e análise do curto-circuito.

Observa-se também que não foi considerada a saturação da excitatriz da brushless, tampouco a influência de limitadores instantâneos de sobreexcitação ou de corrente estatórica do RAT.

Todavia, foi possível analisar o impacto dos diferentes tipos de sistema de excitação no curto-circuito:

- A influência do sistema de excitação na corrente de curto-circuito acontece a partir de tempos maiores que 250ms. Esse tempo varia, podendo ser maior ou menor em virtude dos parâmetros da máquina síncrona.
- O tipo do conversor de potência traz resultados bem diferentes na corrente de curto-circuito. E deve ser considerado nos cálculos das correntes de curto-circuito de interrupção e de regime permanente.

3.0 - ANÁLISE DA TENSÃO DE TETO (CEILING) EM SISTEMAS DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA E BRUSHLESS

No instante $t=0,5s$ é aplicado um CC3F franco. A distância da falta é dada pela impedância X_{cc} que vale 10%. A Figura 10 ilustra o sistema equivalente. A tensão terminal da máquina síncrona é de 1pu no instante pré-falta.

O resultado da simulação do CC3F com o sistema brushless é apresentado na Figura 14, e com excitação estática na Figura 15. A Tabela 5 apresenta o resumo dos dois tipos de sistemas de excitação com a tensão de teto máxima (V_p) sendo variada.

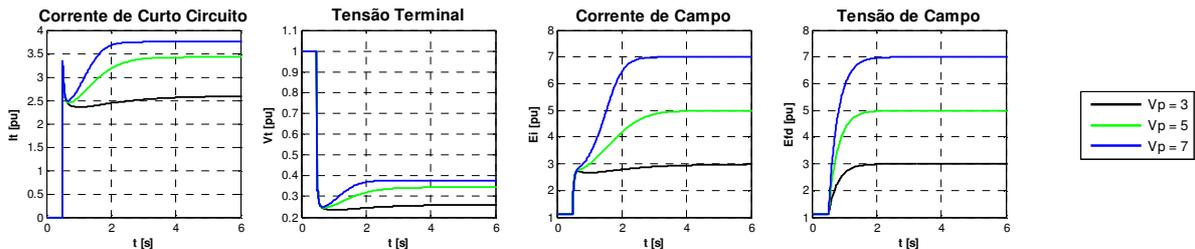


FIGURA 14 – Tensão de Teto Variada em Sistemas de Excitação Brushless

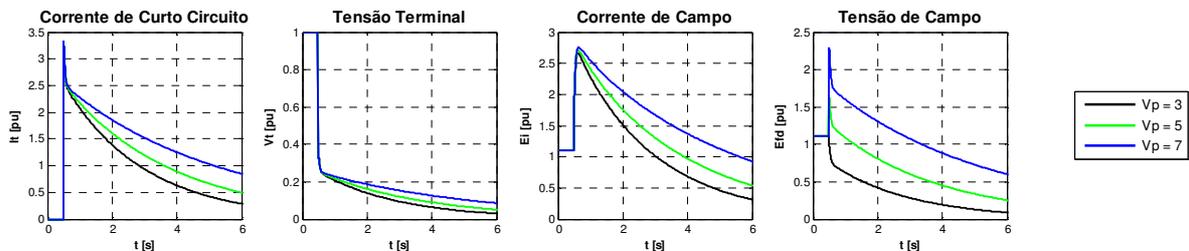


FIGURA 15 – Tensão de Teto Variada em Sistemas de Excitação Estática Bus-Fed

TABELA 5 - Resultados do CC3F em Sistema de Excitação *Brushless* e Estática *Bus-Fed*

Vp	Brushless			Estática Bus-Fed		
	3,0	5,0	7,0	3,0	5,0	7,0
$I_t(t=0,0)^*$	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
$I_t(t=0,10)^*$	2,50	2,51	2,52	2,48	2,50	2,53
$I_t(t=0,25)^*$	2,39	2,46	2,52	2,29	2,34	2,40
$I_t(t=0,50)^*$	2,35	2,57	2,78	2,07	2,17	2,28
$I_t(t>>)^*$	2,60	3,43	3,75	0,01	0,04	0,16

*Tempo em relação ao instante da falta

Para curtos próximos do gerador, a excitação estática bus-fed sofre com a queda da tensão terminal para alimentar o conversor de potência. Uma alternativa para manter o curto-circuito próximo do gerador com valores elevados é aumentar a tensão de teto (ceiling). Observa-se na Figura 15 que com o aumento da tensão de teto, o gerador síncrono aumenta a capacidade de fornecer correntes de curto-circuito cada vez maiores. Uma alternativa para os sistemas de excitação estática é a utilização de transformadores de compound.

Todavia, o argumento de manter correntes de curto-circuito elevadas por tempos superiores a 250ms só tem fundamento em sistemas onde a seletividade do sistema de proteção é realizada por relés de sobrecorrente e onde a barra equivalente do sistema é fraca, ou em operações ilhadas do sistema de geração. Relés com funções de distância (21) são imunes ao tipo de sistema de excitação. A alternativa é a utilização de relés de sobrecorrente com restrição de tensão (51V) para detectar curtos próximos ao gerador em sistemas estáticos com bus-fed sem compound.

Em sistemas brushless com PMG ou com uma fonte de alimentação externa ao conversor de potência, o aumento da tensão de teto implica em elevadas correntes transitórias de curto-circuito. Esses sistemas conseguem fornecer correntes de curto-circuito mesmo para valores baixos de tensão de teto. Um problema, que pode surgir em se trabalhar com uma tensão de teto elevada, é no pós-falta, uma vez que esses sistemas podem não possuem capacidade de fornecer tensão de campo negativa, como é o caso de conversores de potência com disparo IGBT, e a máquina síncrona pode sofrer sobretensões.

4.0 - ANÁLISE DO CARREGAMENTO NO PERÍODO SUBTRANSITÓRIO DO CURTO-CIRCUITO

O curto-circuito na máquina síncrona com carga foi avaliado somente no período subtransitório até os primeiro 250ms após a falta. A influência da velocidade da máquina síncrona foi desprezada. O sistema de excitação utilizado nas simulações é do tipo estática bus-fed.

Em $t=0,3s$ aplica-se um CC3F franco com uma impedância X_{cc} de 10%. A tensão terminal da máquina síncrona é de 1pu no instante da pré-falta. A Figura 16 apresenta o resultado de quatro casos de simulações de carregamento, e a Tabela 6 mostra um resumo dos resultados obtidos.

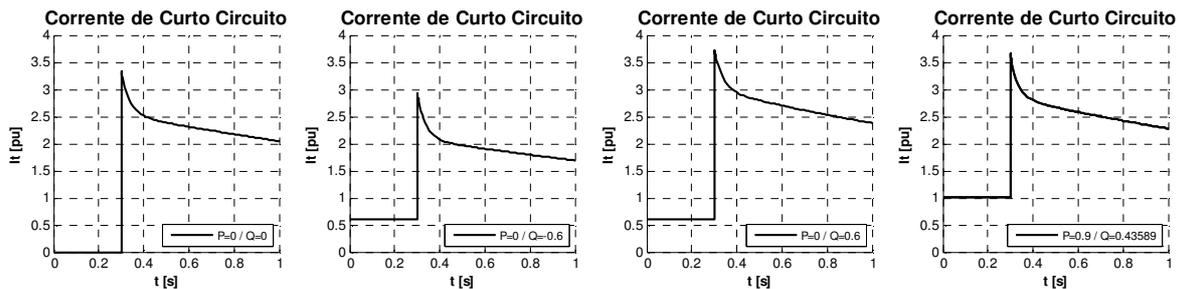


FIGURA 16 – Simulações do CC3F – Análise do Carregamento na corrente de curto-circuito

TABELA 6 - Resultados do CC3F – Análise do Carregamento na corrente de curto-circuito

Po	0,00	0,00	0,00	0,9
Qo	0,00	-0,60	0,60	0,436
Efd0	1,11	0,434	1,96	1,96
$I_t(t=0,0)^*$	3,33	2,93	3,73	3,67
$I_t(t=0,10)^*$	2,50	2,07	2,92	2,79
$I_t(t=0,25)^*$	2,34	1,93	2,74	2,62

*Tempo em relação ao instante da falta

Observa-se que a corrente de curto-circuito subtransitória é máxima quando a corrente de excitação no instante da pré-falta é máxima, ou seja, não necessariamente a máquina precisa estar com carga nominal e sobreexcitada para que a corrente de curto seja máxima, basta que a corrente de excitação seja a nominal, como é o caso da corrente de curto com potência reativa = 0,6 pu e potência ativa = 0 pu.

A tensão de operação da máquina síncrona também deve ser considerada. Tipicamente, a excursão é +/-5%, sendo assim, para o cálculo da máxima corrente de curto-circuito, deve-se considerar o carregamento nominal da máquina síncrona, e com tensão de pré falta de 1,05pu. No caso da corrente mínima do curto-circuito, deve-se considerar a máxima potência reativa absorvida e uma tensão terminal de 0,95 pu.

5.0 - CONCLUSÃO

Através das simulações dinâmicas foi possível avaliar os efeitos de diferentes tipos sistemas de excitação no comportamento do curto-circuito em máquinas síncronas:

- A influência do sistema de excitação já é utilizada nas principais referências para o cálculo do curto-circuito, como por exemplo, IEC (5) e IEEE (6). A simulação também vem sendo utilizada por alguns autores, que apresentam formulas matemáticas e simulações para obter os valores das correntes de curto trifásicas, até bifásicas e monofásicas (7), (8), (9) e (10);
- Tradicionalmente, a literatura apresenta a dinâmica do curto-circuito em máquinas síncronas com o sistema de excitação representado através de uma fonte ideal e constante. Na prática, o tipo do conversor de potência traz outros resultados, e sua representação e diferenças topológicas devem ser ilustradas com mais vigor nos materiais didáticos que abordam o curto-circuito de máquinas síncronas;
- Durante o período subtransitório do curto-circuito o sistema de excitação deve ser desconsiderado;
- A influência do sistema de excitação começa a partir do período transitório do curto-circuito para tempos da ordem de 250ms. Esse tempo varia, podendo ser maior ou menor em virtude dos parâmetros da máquina síncrona, principalmente das constantes de tempo (11);
- O conversor de potência deve ser considerado nos cálculos das correntes de curto-circuito de interrupção e regime permanente. Na carência de simulação, não se deve utilizar a impedância de eixo direto (x_d) do gerador síncrono para obter a corrente de curto-circuito de regime permanente, nem a impedância transitória de eixo direto (x'_d) do gerador síncrono para obter a corrente de curto-circuito de interrupção. Nesse caso, recomenda-se o uso das tabelas e fatores utilizados pela IEC (5) que levam em consideração o sistema de excitação e tensão de teto nos cálculos estáticos das correntes de curto-circuito;
- A carga da máquina síncrona deve ser considerada no cálculo da máxima corrente de curto-circuito. A carga que dará a maior corrente subtransitória acontece quando a máquina síncrona opera no limite nominal da corrente de excitação. Essa corrente de excitação pode estar na nominal mesmo para cargas abaixo da potência nominal;
- Para o cálculo da mínima corrente de curto-circuito deve-se considerar a máxima potência reativa absorvida pelo gerador síncrono operando com a menor tensão de operação;
- O compound em sistemas bus-fed só tem aplicação em casos onde a seletividade do sistema de proteção empregado é realizada por relés de sobrecorrente onde a barra equivalente do sistema é fraca ou a geração venha a operar ilhada. Relés com funções de distância são imunes ao tipo de sistema de excitação. A alternativa é a utilização de relés de sobrecorrente com restrição de tensão para detectar curtos próximos ao gerador;
- Em sistemas brushless com PMG, ou com uma fonte de alimentação externa ao conversor de potência, não há a necessidade de se trabalhar com uma elevada tensão de teto. Esses sistemas conseguem fornecer correntes transitórias de curto-circuito mesmo para uma baixa tensão de teto.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 11.3 – Estudos de curto-circuito – Procedimentos de rede. Brasil, 2005.
- (2) Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 23.3 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos – Procedimentos de rede. Brasil, 2005.
- (3) PAIVA R.B., Estudo da Dinâmica do Curto-Circuito em Máquinas Síncronas e a Influência do Sistema de Excitação e do Carregamento, Monografia de Pós-Graduação, UNIFEI, Junho de 2014.
- (4) ZENI Jr., Controle da Excitação de Geradores de Usinas Hidrelétricas: Modelagem, Identificação, Ajustes e Ensaios de Campo, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Outubro de 1987.
- (5) IEC 60909, Short-Circuit Currents in Three-phase A.C. Systems. IEC 2001. USA.
- (6) IEEE Std-399™, Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis. IEEE Press, 1997.
- (7) BOLDEA I., Synchronous Generator. CRC Press, 2006.
- (8) ANDERSON P. M., Analysis Of Faulted Power Systems. IEEE Press, 1995.
- (9) REINERT D., Protective Relaying for Power Generation Systems. CRC Press, 2006.

- (10) MACHOWSKI J., BIALEK J., BUMBY J., Power System Dynamics: Stability and Control, 2ed, John Wiley & Sons, Ltd, 2008 .
- (11) COOK V., Some aspects of generator backup protection in relation to synchronous-machine performance during h.v.-system faults *PROC. IEE, Vol. 119, No. 7, JULY 1972*

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nome: **Rafael Bertolini de Paiva**

Local/Ano nascimento: Florianópolis/1982

Formação: Graduação em Engenharia Elétrica (UFSC, 2009), Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UNIFEI, 2014)

Experiência profissional: Atua desde 2009 na Reivax S/A como engenheiro, tendo atuado em diferentes funções: engenheiro de campo (testes e comissionamento de sistemas de proteção e regulação), estudos especiais (modelagem de unidades geradoras e controladores), estudos de transitórios eletromecânicos, seletividade e curto-circuito.

Nome: **Nelson Zeni Junior**

Formação: Graduação em engenharia elétrica (UFRGS, 1977), Mestrado em Engenharia Elétrica (UFSC, 1987)

Experiência profissional: Atuou como Engenheiro na empresa CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica do Estado do Rio Grande do Sul (com ingresso em 1978), foi professor da área de Sistemas de Controle da Faculdade de Engenharia Elétrica na UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul no período de 1978 a 1992 e da PUC-RS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do SUL de 1993 a 1994. Iniciou seus trabalhos na Reivax em 1998, onde atualmente é o diretor geral.

Nome: **Paulo Márcio da Silveira**

Formação: Graduação em engenharia elétrica (EFEI, 1984), Mestrado em Engenharia Elétrica (EFEI, 1991) e Doutorado em Engenharia Elétrica (UFSC, 2001).

Experiência profissional: Diretor do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE) da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência atuando principalmente nas seguintes subáreas: Proteção de Sistemas Elétricos, Qualidade da Energia Elétrica, Medição e Processamento de Sinais aplicados a IEDs e Redes Elétricas Inteligentes.