



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Desempenho de Rede de Distribuição com Produtor Independente de Energia

F. A. M. Moura	W.R. Mendes	J. W. Resende	J. R. Camacho
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)	Universidade Federal de Uberlândia (UFU)	Universidade Federal de Uberlândia (UFU)	Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
faugustomoura@yahoo.com.br	williansmendesene@hotmail.com	jwresende@ufu.br	jrcamacho@ufu.br

Palavras-chave

Geração distribuída

Gerador síncrono

Perfil de tensão

Regulador de tensão

Regulador de velocidade

Resumo

Este artigo tem como objetivo principal apresentar uma análise de desempenho de uma rede de distribuição na presença de um gerador síncrono, este com seus respectivos reguladores de tensão e velocidade, para estudos de geração distribuída. Ressalta-se que este gerador é acionado por uma turbina a vapor e seus reguladores foram modelados no “ATP-Alternative Transients Program”, utilizando TACS subroutines. Os impactos desses geradores em redes de distribuição são determinados e comparados utilizando-se de um modelo de uma rede de distribuição, modelada também no ATP. As questões técnicas aqui estudadas se referem ao perfil de tensão em regime permanente, estabilidade da tensão, afundamento de tensão devido à falta trifásica equilibrada, rejeição de carga, saída de linha de distribuição e as respostas dos reguladores das máquinas perante as contingências aplicadas. Os resultados mostram que, em determinados casos, a geração independente pode ameaçar a integridade do sistema e em outros é benéfica para o sistema de distribuição ao qual está conectada.

Nomenclatura

V_i = tensão na barra da geração independente (pu).

V_{ref} = tensão de referência (pu).

K_a = ganho do regulador.

K_f = ganho de tempo do circuito estabilizante do regulador.

T_a = constante de tempo amplificada do regulador (s).

T_f = constante de tempo do circuito estabilizador do regulador (s).

V_{max} = limite máximo da tensão de saída do regulador (pu).

V_{min} = limite mínimo da tensão de saída do regulador (pu).

E_f = tensão de campo (pu).

S_n = potência aparente nominal.

U_n = Tensão nominal.

L = comprimento.

R_A = resistência de armadura (pu).

x_L = reatância de dispersão da armadura (pu).

x_d = reatância de eixo direto (pu).

x_q = reatância de eixo de quadratura (pu).

x'_d = reatância transitória de eixo direto (pu).

x'_q = reatância transitória de eixo de quadratura (pu).

x''_d = reatância subtransitória de eixo direto (pu).

x''_q = reatância subtransitória de eixo de quadratura (pu).

x_0 = reatância de seqüência zero (pu).

T'_{d0} = constante de tempo de curto-circuito, transitório de eixo direto (s).

T'_{q0} = constante de tempo de curto-circuito, transitória de eixo de quadratura (s).

T''_{d0} = constante de tempo de curto-circuito, subtransitória de eixo direto (s).

T''_{q0} = constante de tempo de curto-circuito, subtransitória de eixo de quadratura (s).

H = momento de inércia ($10^6 \cdot \text{Kg} \cdot \text{m}^2$).

P = número de pólos.

f = frequência (Hz).

ω_s = velocidade síncrona em (rad/s).

1. Introdução

O interesse por geração distribuída tem aumentado consideravelmente em razão de uma reestruturação do setor energético brasileiro. Isso, aliado à necessidade de aproveitamento de diferentes formas de energia primária, avanços tecnológicos e a uma maior conscientização sobre conservação ambiental, vêm fomentar e contribuir para a difusão da geração independente.

Surge, então, a necessidade de entender as influências dessa tendência na operação e projeto de redes de distribuição de energia elétrica. Dentre as análises a serem realizadas, o monitoramento dos níveis de tensão no *Ponto de Acoplamento Comum* (PAC), antes e após a entrada do *Produtor Independente* (PI), bem como análises de rejeição de carga, abertura de linha de distribuição e curtos-circuitos trifásicos equilibrados tornam-se necessárias. Além disso, as respostas dos controles da máquina síncrona, regulador de tensão e do regulador de velocidade também são objetos de estudos deste artigo.

2. Modelagem do sistema

2.1- Regulador de tensão

O gerador síncrono utilizado para representar a máquina do produtor independente de energia, foi o do tipo SM 59 de oito controles presente nos cartões do ATP, (1). O regulador de tensão se baseia em um dos modelos consagrados para reguladores de excitação (2), (3).

De acordo com os dados de entrada, este modelo pode ser reduzido em quatro formas básicas. A modelagem utilizada neste trabalho para o regulador de tensão está mostrada na figura 1.

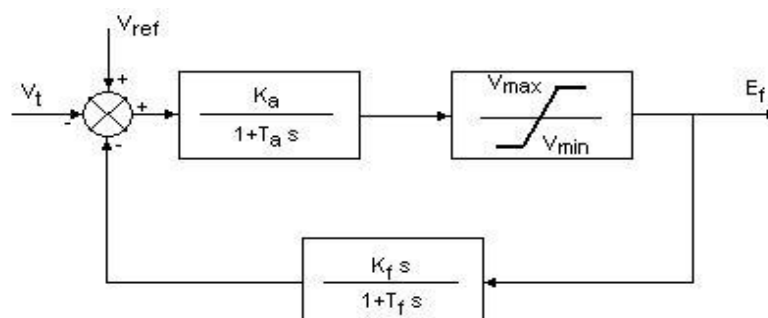


Fig. 1. Modelo simples do regulador de tensão.

2.2- Regulador de velocidade

O regulador de velocidade foi implementado baseado no modelo utilizado pelo Programa de Análise de Estabilidade Transitória da UFU- Universidade Federal de Uberlândia, o qual é denominado por *TransUFU*.

A figura 2 apresenta o diagrama de blocos empregado para representar o regulador de velocidade associado à turbina térmica a vapor (se $T_4 = 0$) ou a turbina hidráulica (se $T_4 \neq 0$).

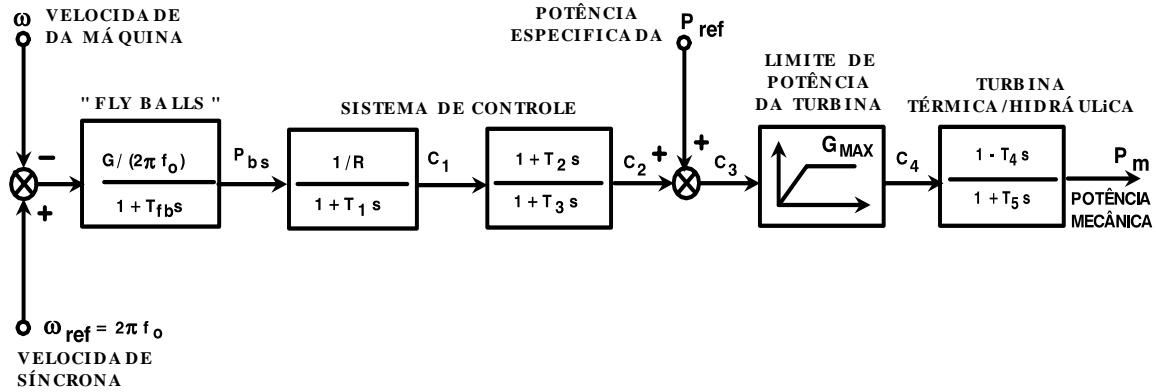


Fig. 2. Modelo de um regulador de velocidade de turbina térmica/hidráulica.

2.3- Sistema elétrico

O sistema elétrico no qual a máquina do produtor independente está inserida é uma rede de distribuição de uma empresa, conforme ilustrado na figura 3. Tal sistema é conectado ao produtor independente através de um disjuntor de interligação, seguindo as orientações estabelecidas em (4).

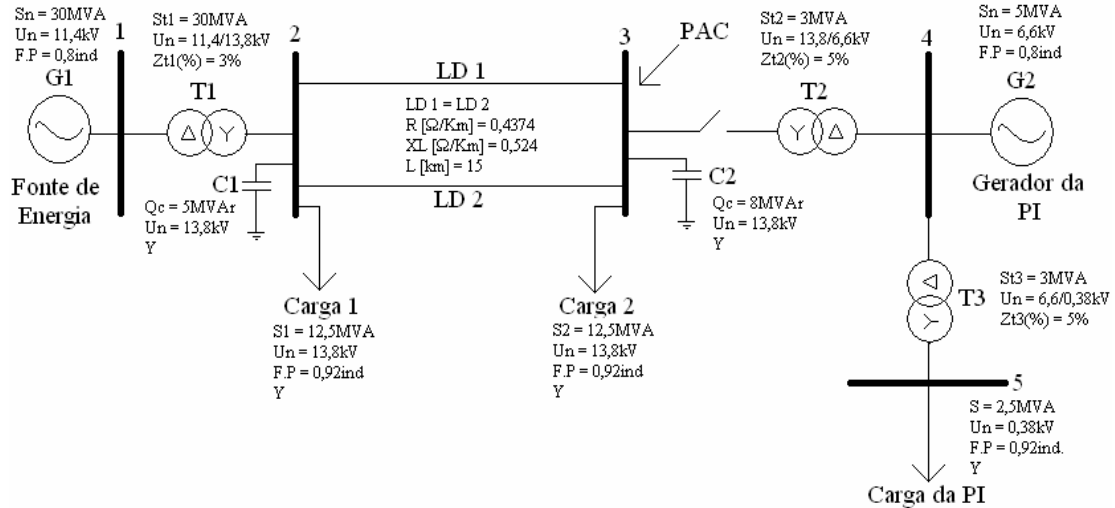


Fig. 3. Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.

A fonte de tensão que representa a concessionária foi definida como sendo uma fonte trifásica ideal, sendo considerada, portanto, como um barramento infinito. Para a utilização do modelo de gerador controlável do ATP, torna-se necessária entrar com os dados listados na tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA DO GERADOR INDEPENDENTE

Dados necessários a G2	
S_n	x_0
U_n	T_{d0}^{\wedge}
R_A	T_{q0}^{\wedge}
x_L	$T_{d0}^{\wedge\wedge}$
x_d	$T_{q0}^{\wedge\wedge}$
x_q	H
x_d^{\wedge}	P
x_q^{\wedge}	f
$x_d^{\wedge\wedge}$	ω_s
$x_q^{\wedge\wedge}$	

Os valores obtidos para os reguladores de tensão e velocidade da máquina, bem como os dados referentes ao gerador síncrono do produtor independente de energia, foram obtidos diretamente de fabricante.

2.4- Fluxo de Potência

A geração independente de energia fornece uma potência aparente de 1MVA para o sistema elétrico, através do transformador de acoplamento, T2. Além disso, o produtor independente atende à sua demanda interna, de potência de 2,5 MVA.

As potências ativa e reativa produzidas pela concessionária (G1) e pelo PI (G2) estão indicadas na tabela II.

TABELA II
POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA GERADA PELAS FONTES DO SISTEMA

Fonte	P_G [MW]	Q_G [MVar]
G1	24,384	5,4
G2	3,531	1,2

2.5- Estudo de casos

Antes de se prosseguir aos estudos aqui realizados, ressalta-se que em (5) já foram realizadas análises semelhantes as aqui apresentadas. Porém, as análises são feitas com outro software e não há um estudo da interferência dos controles da máquina síncrona na resposta a perturbações. Já na referência (6), há a utilização do ATP para modelar o regulador de tensão de uma máquina síncrona cuja turbina é hidráulica, indicando assim a eficácia do ATP na modelagem dos controles da máquina síncrona.

I- Rejeição de carga na geração independente

A figura 4 mostra como a tensão no *Ponto de Acoplamento Comum* (barra 3), se comporta após a aplicação da contingência, ou seja, a rejeição da carga de 2,5 MVA.

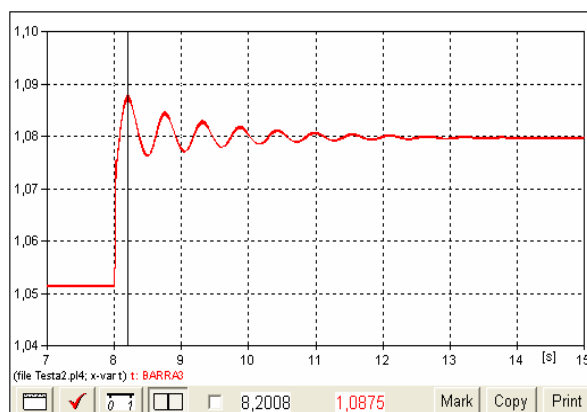


Fig. 4. Tensão na barra 3 mediante a rejeição de carga na geração independente.

A tensão na barra 3 (valor em rms), inicialmente em 1,05 pu, atinge um máximo de 1,09pu no instante imediatamente após a rejeição da carga. Porém, em seguida ela se estabiliza em 1,08pu, ou seja, 14900V fase-fase. Este valor está acima do permitido pela normalização (7).

Essa sobretensão se deve ao reativo, que antes era consumido pela carga interna do produtor independente, e que, nesta condição é repassado para o sistema elétrico. Conseqüentemente, um dos índices de qualidade da energia fica comprometido no que diz respeito à magnitude da tensão.

Uma medida eficaz para mitigar os efeitos de tal contingência, seria a instalação de um reator de núcleo saturado a ser posicionado na barra da geração independente de energia. Dessa forma, o mesmo absorveria o excesso de reativo, assegurando, assim, uma tensão dentro de limites aceitáveis (7).

A figura 5 ilustra o comportamento da tensão na barra 4, (barra da geração independente de energia).

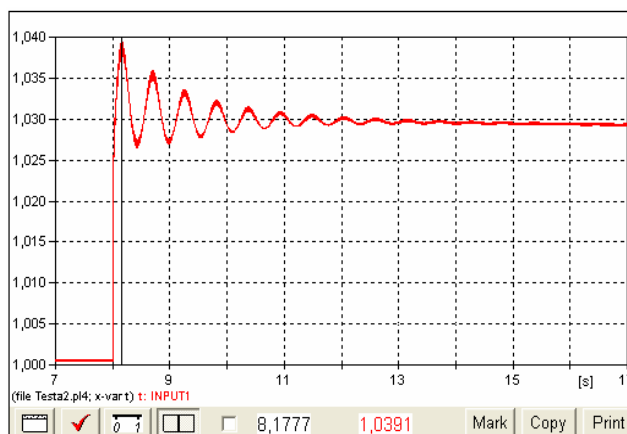


Fig. 5. Tensão na barra 4 mediante a rejeição de carga na geração independente.

No instante imediatamente após a rejeição de carga, a tensão chega a atingir 1,04pu, 7188 V fase-fase. Dessa forma, uma proteção adequada deve ser dimensionada para retirar o gerador do produtor independente, para que os demais equipamentos da geração independente não sejam danificados.

A referência (8) estabelece as diretrizes para a variação de tensão na barra da geração independente, de forma que, se a tensão nesta barra não se mantiver dentro de uma faixa de variação de 10% da tensão nominal, o produtor independente deverá desconectar seu gerador do sistema em 1s.

A figura 6 ilustra a resposta do regulador de tensão da máquina do produtor independente.

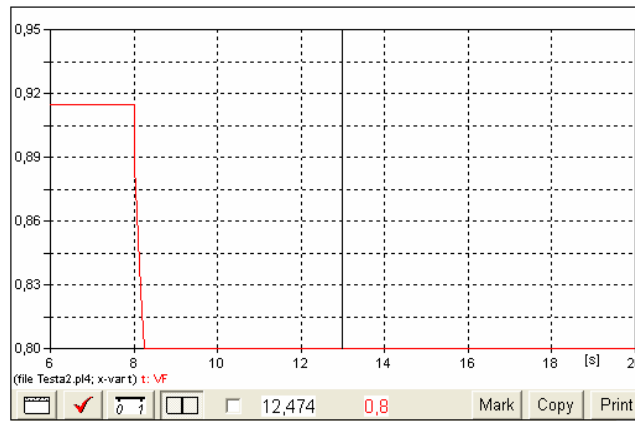


Fig. 6. Resposta do regulador de tensão.

Observa-se que o regulador de tensão reduziu ao máximo sua excitação para tentar mitigar a elevação da tensão na barra da geração independente, barra 4.

A figura 7 mostra a resposta em velocidade da máquina do produtor independente. A máquina tende a oscilar fortemente no instante imediatamente após a rejeição da carga, sendo a máxima velocidade alcançada de $\omega = 188,93$ rad/s ($f = 60,14$ Hz), e a mínima velocidade alcançada foi de $\omega = 188,14$ rad/s ($f = 59,88$ Hz).

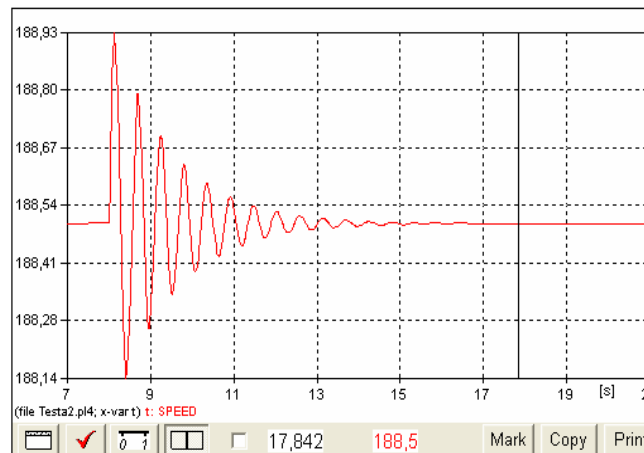


Fig. 7. Resposta em velocidade da máquina síncrona do produtor independente.

Como a frequência não permanece por 0,5s em 60,14Hz e nem chega a atingir 58,0Hz, a proteção contra variações de frequência não atuará (8). Devido à inércia do sistema de potência e à atuação do regulador de velocidade, esta se estabiliza em velocidade próxima da síncrona. As oscilações de velocidade da máquina ocorrem então em torno dos 188,49 rad/s (60 Hz). Conseqüentemente, o regulador de velocidade não atuará de forma significativa, pois, devido à faixa morta do controle deste regulador, o sinal em questão não é suficiente para sensibilizá-lo de forma expressiva.

A figura 8 ilustra a resposta do regulador de velocidade da máquina do produtor independente perante a contingência aplicada.

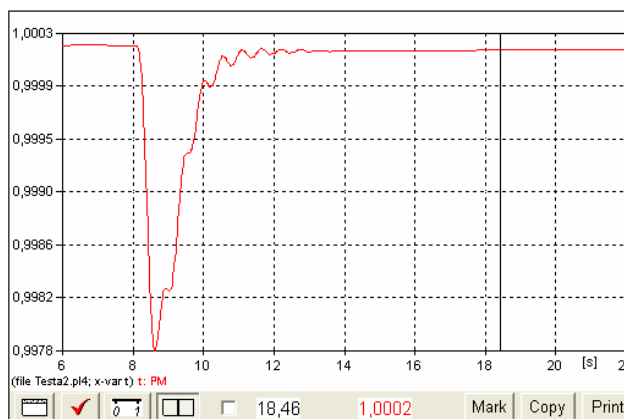


Fig. 8. Resposta do regulador de velocidade da máquina do produtor independente.

II- Curto-circuito trifásico equilibrado no PAC

Os estudos serão realizados de acordo com (8), no que tange ao tempo de retirada da falta. Esta referência recomenda que para a ocorrência de uma falta na rede, o gerador do produtor independente de energia deve ser retirado do sistema em um tempo máximo de 6 ciclos e o relé de retaguarda deve dar seu “trip” em 18 ciclos (300 ms).

Portanto, pretende-se aqui observar o comportamento da conexão durante os 6 ciclos em que a falta permanece no sistema.

A figura 9 ilustra o comportamento da tensão no PAC mediante a aplicação da contingência. Observa-se a ocorrência de uma interrupção de tensão no PAC. Porém, esta interrupção dura apenas 6 ciclos (corresponde ao período simulado de permanência da falta no sistema, de acordo com (6)).

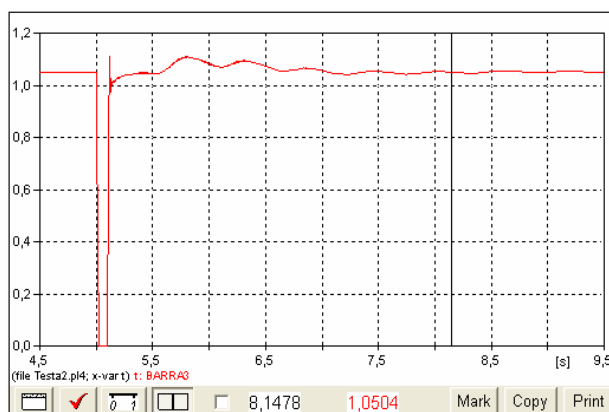


Fig. 9. Tensão na barra 3 após a aplicação do curto.

Após a retirada da falta, a tensão volta a se estabelecer em torno de 1,05pu.

Como a barra da geração independente de energia (barra 4) se encontra próxima ao PAC, a mesma experimentará um afundamento de tensão conforme pode ser visto na figura 10. Neste caso, o regulador de tensão da máquina atuará aumentando a excitação de campo, objetivando assim, aumentar o nível da tensão na barra de geração, barra 4.

A figura 11 ilustra a resposta do regulador de tensão da máquina do produtor independente de energia, observa-se um aumento da excitação num primeiro instante.

Comprova-se pelo exposto na figura 10, que a barra da geração independente experimenta um afundamento de tensão de, aproximadamente, 70%, conseqüentemente, se seus equipamentos eletrônicos de automação, inclusive computadores não estiverem aptos a suportar tal *variação de tensão de curta duração* (VTCD), todos esses equipamentos serão reiniciados.

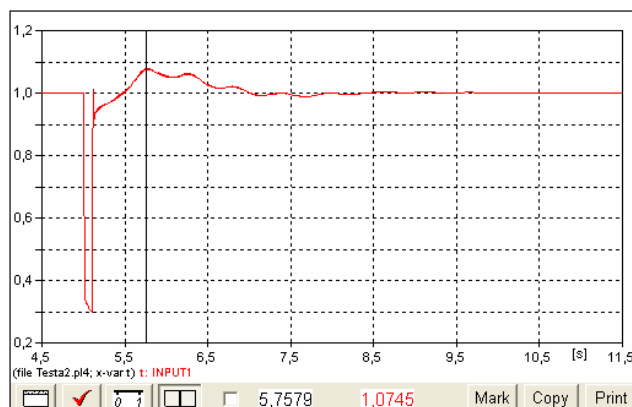


Fig. 10. Tensão na barra 4 após a aplicação do curto.

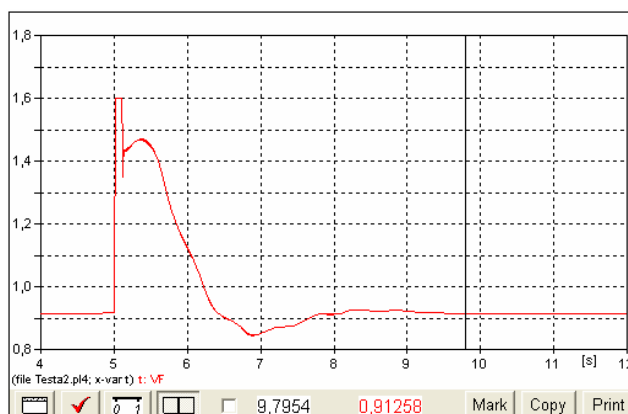


Fig. 11. Resposta do regulador de tensão mediante uma falta trifásica no PAC.

Destaca-se ainda na figura 10, o período pós-curto. Neste, a tensão chega a atingir 1,07pu, o que equivale a uma sobretensão de 7420 V fase-fase. Este valor está acima do estipulado pela referência (8).

Porém, a proteção de sobretensão não atuará, devido ao fato da perturbação não durar 1s. Mas, ressalta-se que os componentes elétricos do produtor independente de energia devem estar dimensionados a suportar um stress dielétrico de 12% no instante imediatamente após a retirada do curto-circuito.

Devido à aplicação do curto, a máquina síncrona do produtor independente tende a disparar, pois ela passa agora a atender única e exclusivamente à solicitação de corrente demandada pela falta.

A figura 12 ilustra como a velocidade da máquina se comporta mediante o distúrbio aplicado. Observa-se que a máquina não oscilou tanto, pois o curto-circuito aplicado durou apenas 6 ciclos. Consequentemente, as proteções de sub, ou sobre-freqüência também não atuarão.

A figura 13 ilustra a resposta do regulador de velocidade da máquina perante o distúrbio aplicado. Comprova-se que o regulador não atua de forma expressiva, pois o curto aplicado durou apenas 6 ciclos e isso, aliado à inércia do sistema, não permitiu que a velocidade da máquina varie tanto neste curto intervalo de tempo.

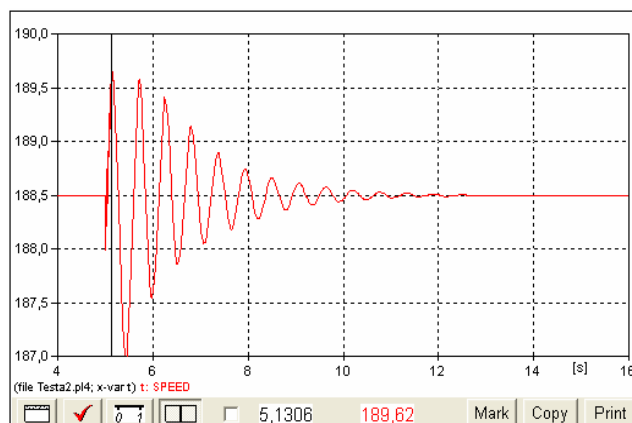


Fig. 12. Resposta em velocidade da máquina síncrona do produtor independente.

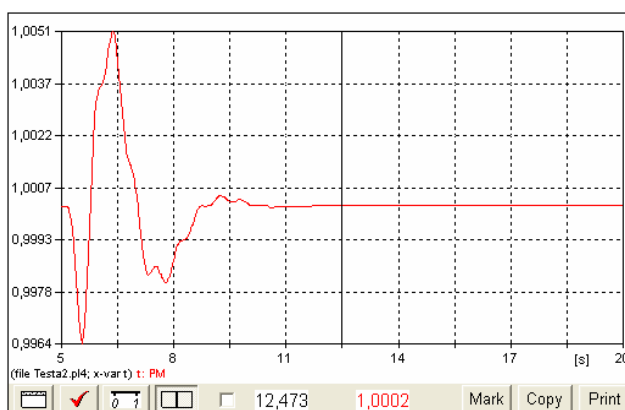


Fig. 13. Resposta do regulador de velocidade mediante uma falta trifásica no PAC.

III- Abertura da linha de distribuição LD 2.

As figuras 14 e 15 ilustram o comportamento da tensão eficaz na barra 3 (PAC), respectivamente, sem e com a presença do PI.

Nas duas figuras, com a abertura da LD 2, há uma queda de tensão, que se deve ao fato de se ter um aumento nas perdas elétricas provocada pela elevação da impedância da linha de distribuição, ao se retirar a LD 2.

Na figura 15 após um pequeno período de tempo, a tensão volta a subir de forma oscilatória, e se estabiliza em torno de 1,03pu. Isto se deve ao fato desta barra estar eletricamente amarrada a barra da produção independente de energia.

A figura 16 ilustra o comportamento da tensão na barra da geração independente e a figura 17 revela o comportamento do regulador de tensão da máquina da produção independente de energia.

Uma análise cuidadosa das figuras 16 e 17 mostra que quando a tensão da barra 4 sofre o afundamento, o regulador de tensão aumenta a excitação para que a tensão estabelecida na barra de geração volte a atingir 1,0pu. Uma vez alcançada a tensão de 1,0pu, o sistema passa a ter uma nova excitação de regime permanente (de aproximadamente 1,09 pu, ou seja, a máquina está com 9% de sobre-excitação).

No instante da abertura da linha LD 2, a impedância, vista pela concessionária de energia, aumenta. Como o gerador do produtor independente de energia se encontra mais próximo da mesma, ele assume uma parcela maior de potência a ser entregue para a carga 2.

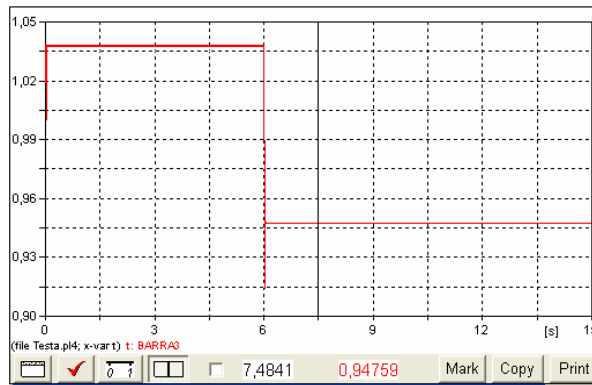


Fig. 14. Tensão no PAC mediante a abertura da linha LD 2 sem a presença do produtor independente.

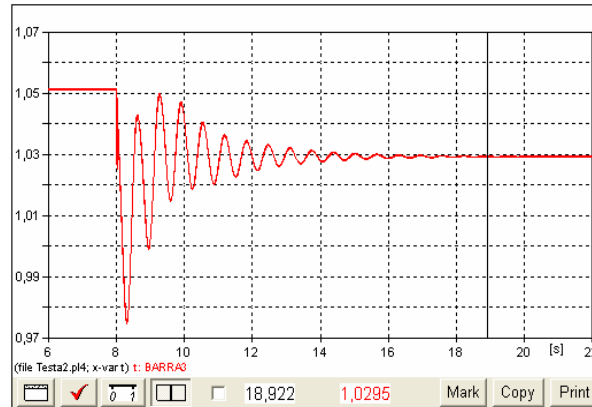


Fig. 15. Tensão no PAC mediante a abertura da linha LD 2 com a presença do produtor independente.

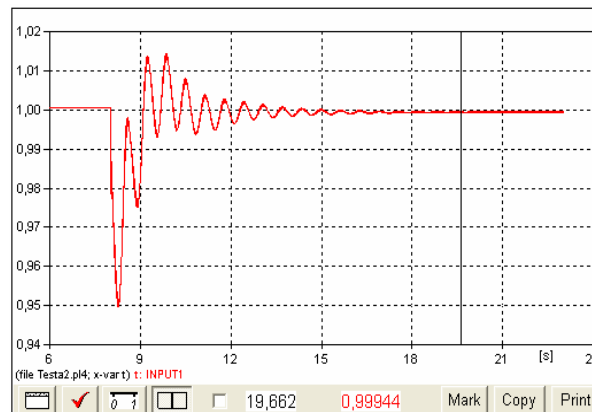


Fig. 16. Tensão na barra 4 mediante a abertura da linha LD 2.

A figura 18 retrata a resposta da velocidade da máquina do produtor independente mediante a abertura da linha LD 2. Observa-se, no instante imediatamente após a abertura de LD 2, que o gerador está com uma velocidade $\omega = 187,42 \text{ rad/s}$, isto equivale a uma frequência de 59,65 Hz. Portanto, há a desaceleração da máquina. Contudo, esta frequência, se comparada com o limite de sub-frequência estabelecido em norma (8), não disparará a proteção para sub-frequência.

A figura 19 mostra a ação do regulador de velocidade da máquina, mediante o distúrbio aplicado. No instante imediatamente após a abertura da linha, o regulador aumenta, de forma não tão significativa, a potência mecânica aplicada no eixo da máquina.

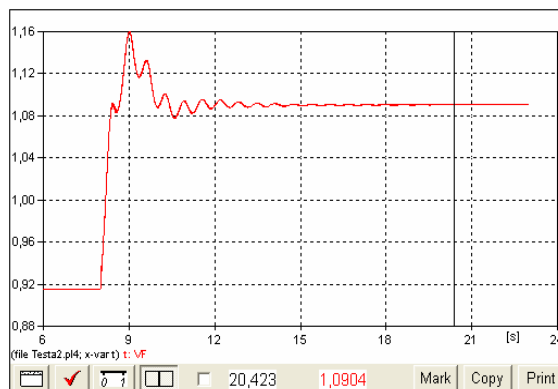


Fig. 17. Resposta do regulador de tensão mediante a abertura da linha LD 2.

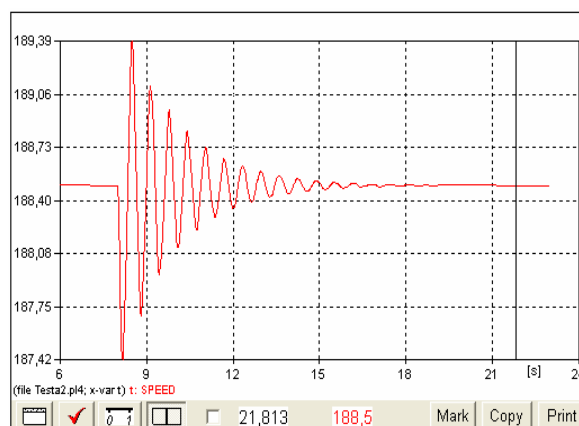


Fig. 18. Resposta em velocidade da máquina do produtor independente.

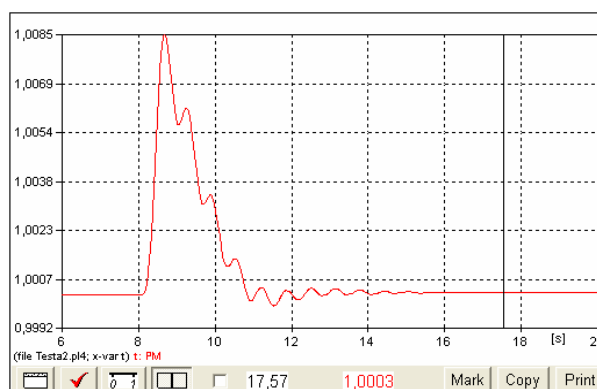


Fig. 19. Resposta do regulador de velocidade mediante a abertura da linha LD 2.

3. Conclusões

Este trabalho apresenta as principais alterações ocasionadas no sistema elétrico de potência, mais especificamente em redes de distribuição, devido à presença de um produtor independente de energia. Ressalta-se que as análises focaram os níveis de tensão.

Uma possível rejeição de carga dentro das instalações elétricas do produtor independente leva a uma alteração na magnitude da tensão no PAC, prejudicando assim todos os consumidores instalados no mesmo, ou ao redor deste ponto. Tal fato pode ocasionar danos aos equipamentos instalados próximo ao PAC, sejam eles equipamentos da própria concessionária de energia, ou mesmo, os aparelhos elétrico-eletrônicos dos consumidores ali instalados. A velocidade da máquina varia alterando o valor da frequência industrial para o produtor independente.

Para situações de curto-circuito no PAC, o produtor independente fica sujeito a um afundamento de tensão considerável. Tal afundamento conduz a perdas no processo industrial, com conseqüente desperdício de matéria-prima dependendo do tipo de processo envolvido.

Portanto, ressalta-se a necessidade de melhor especificação dos equipamentos quanto à suportabilidade às variações de tensão. A proteção deve ser ajustada para abrir o disjuntor de interligação a fim de evitar tal distúrbio no produtor independente. Ressalta-se que, em condição de curto-circuito, se deve ficar atento à sobretensão ocasionada pela retirada da falta no restabelecimento em regime permanente.

Em caso de sub-tensão no PAC (a exemplo do que ocorre no caso III) a presença do produtor independente auxilia o sistema, pois a atuação do regulador de excitação da máquina atua no sentido de melhorar a tensão na barra de geração, e, por conseguinte no PAC. Portanto, pode-se inferir que a qualidade dos controles da máquina interfere no funcionamento do sistema.

4. Referências bibliográficas e/ou bibliografia

- [1] ATP-EMTP – Alternative Transients Program, acessado na Internet em 22/11/2007, página <http://www.emtp.org>.
- [2] G. C. Guimarães, Computer Methods for Transient Stability Analysis of Isolated Power Generation Systems with Special Reference to Prime Mover and Induction Motor Modelling, PhD Thesis, University of Aberdeen, 1990.
- [3] P. M. Anderson and A. A. Fouad, “*Power System Control and Stability*” The Iowa state university press, Ames, Iowa, USA, 1997.
- [4] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547, Nova Iorque, EUA, 2003.
- [5] W. Freitas, J. C. M. Vieira Jr., A. Morelato, L. C. P. da Silva, V. F. da Costa, F. A. B. Lemos, "Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications". *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21,NO.1, FEBRUARY 2006.
- [6] C. Saldaña, G. Calzolari, G. Cerecetto, "ATP modeling and field tests of the ac voltage regulator in the Palmar hydroelectric power plant" *Electric Power Systems Research*, Elsevier, 76 (2006), pp.681-687.
- [7] ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico, Submódulo 2.2, Padrões de Desempenho da Rede Básica, Brasília, DF, 2002, acessado na Internet em 22/11/2007, página <http://tinyurl.com/ypdyhc>
- [8] LIPA-Long Island Power Authority, Control and Protection Requirements for Independent Power Producers, Transmission Interconnections, encontrado na Internet em 22/11/2007, na página: <http://tinyurl.com/33clq4>