

Um Estudo da Aplicação do Relé de Taxa de Variação de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída*

Rafael Brenner Sousa Campos[†], Sérgio Garcia Oliveira[‡], Igor Kopcak[§], Wander Gonçalves da Silva^{**} e Cacilda de Jesus Ribeiro^{**}

UFG/EEEC, 74605-010, Brasil

rafaelbrennersc@gmail.com, ikopcak@eeec.ufg.br

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de Energia Elétrica, Detecção de Ilhamento, Relé ROCOF, Geração Distribuída.

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, a conexão de geradores de pequeno e médio portes diretamente em redes de distribuição de energia elétrica deixou de figurar como tendência para tornar-se uma realidade cada vez mais frequente. O interesse em gerar energia próximo à carga – denominada Geração Distribuída (GD) – surgiu devido às dificuldades em expandir a malha de transmissão e de construção de novas centrais de geração de grande porte, seja por restrições ambientais, econômicas, ou por ambas. Desde então, o interesse em GD tem crescido devido, particularmente, a possibilidade de minimizar impactos ambientais, ao permitir gerar energia a partir de rejeitos e/ou subprodutos agroindustriais e por processos de cogeração, por exemplo (JENKINS et al., 2000).

Contudo, o incremento de GD não apresenta apenas vantagens. Sua presença em redes de distribuição trás problemas relacionados a qualidade de energia e a proteção dos sistemas. Particularmente quanto aos sistemas de proteção, a presença de GD aumenta os níveis de curto-circuito e pode inverter fluxos de potência inicialmente radiais, dificultando manter os requisitos de seletividade e coordenação dos dispositivos instalados. Além disso, por questões de segurança e norma, esquemas especiais são projetados para evitar o ilhamento da GD com cargas cuja responsabilidade pelo fornecimento de energia recai sobre a

* Revisado pelo orientador

† Aluno PIBIC

‡ Aluno PIVIC

§ Professor orientador

** Professores colaboradores

concessionária (CIGRÉ, 1999; CIRED 1999; IEEE, 2003; CPFL, 2005; MANITOBA, 2003).

Pensando no aproveitamento de fontes de energia que proporcionam menor impacto ambiental, como biomassa, aproveitamento de rejeitos agroindustriais, projetos de cogeração e micro hidrelétricas, fazem-se necessários estudos para a conexão desses geradores à rede de distribuição, como forma de viabilizar tais empreendimentos, seja pela possibilidade de venda de excedentes de geração para a concessionária, seja pelo aumento da confiabilidade do fornecimento que a operação em paralelo com o sistema interligado proporciona.

Este contexto ampliou o espaço para a utilização de relés digitais IEDs – do inglês, *Intelligent Electronic Devices* –, como forma de solucionar o aumento na complexidade de sistemas de proteção de redes de distribuição, na presença de GD. Tais dispositivos de proteção permitem que diversas estratégias de supervisão e proteção possam ser traçadas, sem a instalação de novos equipamentos, apenas utilizando informações processadas pelos IEDs.

O desafio encontra-se em realizar simulações a partir da modelagem matemática do sistema e dos dispositivos de proteção, para subsidiar os estudos de definição da estratégia de proteção que será utilizada, de forma a garantir os requisitos de coordenação, seletividade e impedir a operação da GD ilhada com cargas que não sejam do próprio produtor.

Neste trabalho, foi estudada a aplicação do relé de taxa de variação de frequência, muito referido na literatura como relé ROCOF (*Rate of Change of Frequency*) para a detecção de ilhamento de um gerador distribuído conectado a uma rede de distribuição em 69kV.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho podem ser divididos em duas categorias:

a) Quanto a capacitação profissional

Colocar o aluno frente à nova problemática de sistemas de energia elétrica, no que diz respeito à proteção de redes de distribuição na presença de geradores distribuídos, de forma a complementar sua formação e propiciar um primeiro contato com o ambiente de pesquisa, bem como proporcionar o aprendizado de ferramentas de simulação e particularidades da modelagem matemática;

b) Quanto aos resultados da pesquisa em si

Avaliar a eficiência do relé de taxa de variação de frequência para a detecção de ilhamento de geradores distribuídos. Levantar a curva de tempo de atuação do relé e

identificar as situações particulares que levam a falha de atuação do mesmo, como forma de nortear estratégias de proteção por parte da concessionária.

3 METODOLOGIA

O trabalho consistiu de simulação computacional através do *SimPowerSystems/Simulink*[®] do MATLAB[®] (MATHWORKS, 2011). O *SimPowerSystems* é uma ferramenta que permite simulação de sistemas de energia elétrica, com representação trifásica e capacidade de investigação de fenômenos da ordem de transitórios eletromagnéticos, ou seja, na escala de tempo de microssegundos (μ s).

O trabalho teve como suporte a biblioteca de relés digitais proposta por (DE SALLES, 2007), revista e ampliada em (KOPCAK, 2009) para utilização no *SimPowerSystems*. As simulações foram realizadas no Laboratório de Sistemas de Energia “Alcir José Monticelli” da EEEC/UFG, que conta com toda a estrutura computacional necessária para os trabalhos.

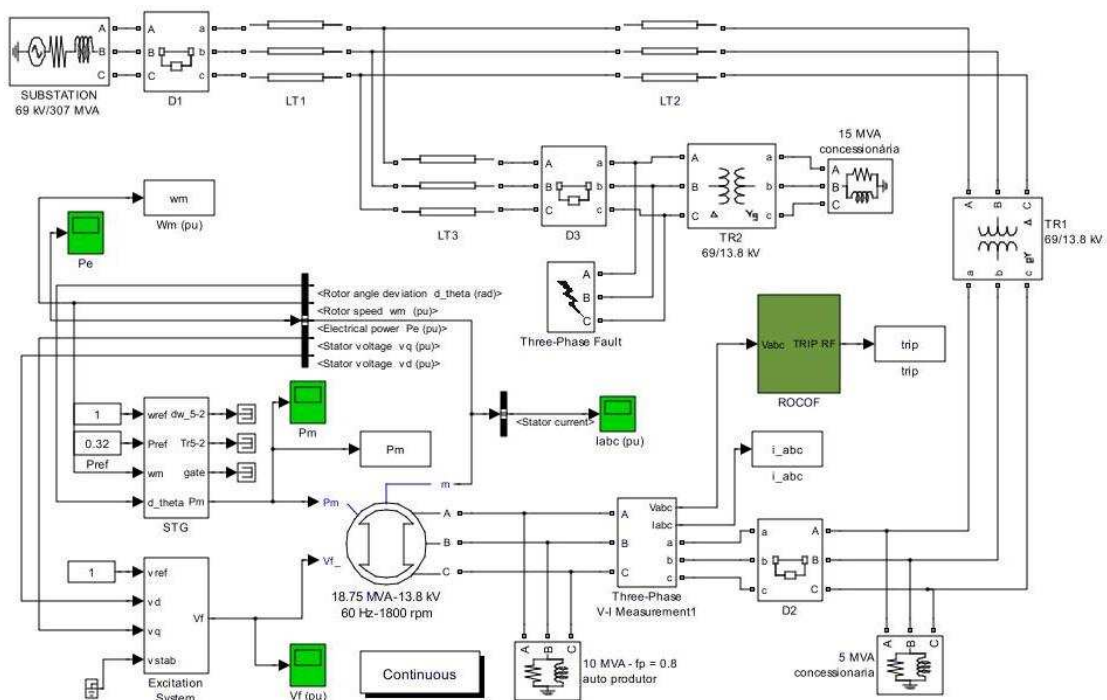


Figura 1. Representação do sistema teste no *SimPowerSystems*.

A Figura 1 mostra o sistema teste utilizado nos estudos, cujos dados são baseados em um caso real. A rede consiste de um alimentador conectado a uma subestação de 69 kV, modelada como uma fonte de tensão ideal (barramento infinito) com potência de curto-circuito igual a 307 MVA. A carga total ligada ao alimentador é de 30 MVA, sendo 15 MVA

em um ramal. No final do alimentador há um gerador síncrono de 13,8 kV/18,75 MVA, equipado com regulador de velocidade e controle de excitação, ligado ao alimentador através de um transformador Delta/Estrela-aterrado.

As simulações consistiram da aplicação de um curto-circuito trifásico no ramal que atende a carga de 15 MVA, com início no instante $t_f = 100$ ms e auto-extinção no instante $t_c = 300$ ms. Simultaneamente com a extinção do curto-circuito ocorre a abertura do disjuntor D2, fazendo com que o gerador fique ilhado com uma carga de 10 MVA e fator de potência 0,8 indutivo. Para diversos cenários de geração, variando-se as potências ativa e reativa geradas, foi verificado se o relé de taxa de variação de frequência (Bloco ROCOF na Figura 1) conseguiu detectar o ilhamento do gerador.

Cada bateria de simulação foi ajustada para o intervalo de $t_{inicial} = 0$ à $t_{final} = 1$ s. As simulações foram interrompidas sempre que o menor dos tempos entre t_{final} e o instante de atuação do relé (instante em que o relé envia o sinal de *trip*) fosse atingido.

Considerou-se 500 ms como tempo limite para a atuação do relé, visto ser este o tempo típico utilizado para detecção de ilhamento (IEEE, 2003). Considerando que o início da situação de ilhamento foi ajustado para 300 ms, foram consideradas falha na operação do relé todas as atuações em tempos superiores a 800 ms.

Os limites de sub e sobre frequência foram ajustados em 58,5 Hz e 60,5 Hz, respectivamente. O relé utilizado calcula a frequência pelo método de detecção de cruzamento por zero e, a partir desses valores, calcula a taxa de variação de frequência. Para evitar distorções durante transitórios eletromagnéticos causados por faltas e chaveamentos, o limite de variação de frequência máximo admitido foi ajustado em 10 Hz/s e o valor de atuação do relé foi ajustado para taxa de variação maior que 1 Hz/s, com retardo de 100 ms.

A Figura 2 mostra a comparação do cálculo da frequência pelo algoritmo do relé com a velocidade angular do eixo do gerador, para a situação particular em que a potência ativa gerada é igual a 8 MW. Nessa figura também podem ser distinguidos os três períodos simulados: 0-100 ms, operação normal; 100-300 ms, ocorrência do curto-circuito e; 300-1500 ms, ilhamento do gerador.

É interessante ressaltar que a tendência de queda de frequência na situação de ilhamento é gradativamente atenuada pela ação do regulador de velocidade do gerador, que corrige a potência mecânica da turbina no sentido de devolver o gerador a velocidade síncrona e, conseqüentemente, a frequência nominal. Destaca-se também que neste caso o relé não atuaria, haja vista que as maiores taxa de variação da frequência não permaneceram acima do

limite de 1 Hz/s por tempo maior ou igual ao retardo de 100 ms estipulados.

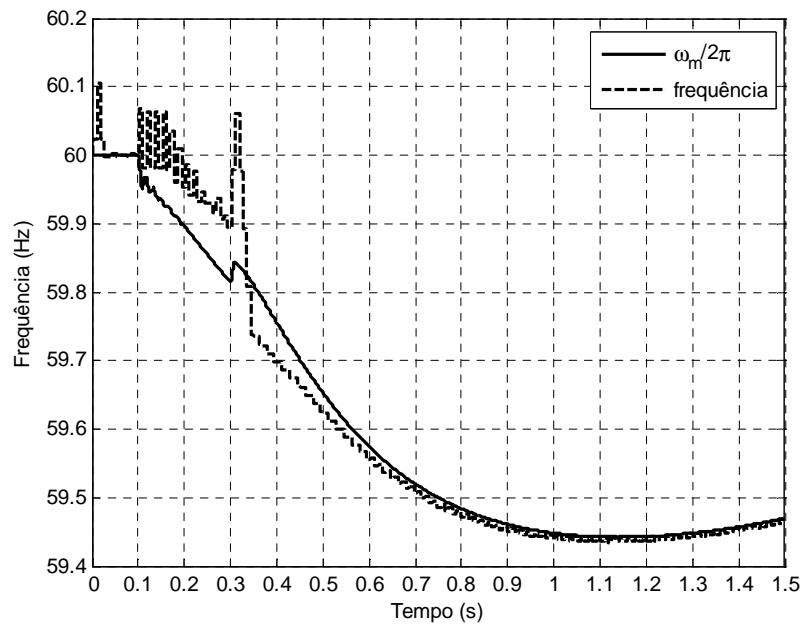


Figura 2. Cálculo da frequência pela velocidade angular do rotor (ω_m) e pelo algoritmo de detecção de cruzamento por zero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bateria de simulações para avaliar a eficiência do relé de taxa de variação de frequência na detecção de ilhamento foi realizada variando-se a potência ativa gerada (P_g) de 100 kW até 18,6 MW, em passos de 100 kW, mantendo-se a tensão terminal do gerador em 13,8 kV. Para cada valor de P_g foram anotados diversos parâmetros resultantes da simulação.

A Figura 3 mostra o tempo de atuação do relé em função da potência ativa gerada. Nota-se que para uma faixa considerável de valores de P_g há a falha na detecção do ilhamento por parte do relé de frequência, para o limite de 500 ms estipulado. O relé aponta em tempo satisfatório a situação de ilhamento apenas para os dois extremos de potências ativa gerada, nas faixas: $0,1 \leq P_g \leq 6$ MW e $13,2 < P_g \leq 18,6$ MW; e falha para os valores intermediários, $6 < P_g \leq 13,2$ MW.

Isso se deve ao fato da frequência estar associada a velocidade do eixo do gerador, cuja aceleração/desaceleração depende do desbalanço entre a potência mecânica fornecida pela turbina e a potência elétrica no entre-ferro do gerador, esta última função da carga ilhada com o gerador. Sabendo-se que a carga ilhada com o gerador é de 8 MW, e desprezando-se as

perdas na máquina, tem-se que apenas desbalanços $\Delta P < -2$ MW e $\Delta P > 5,2$ MW proporcionaram taxas de variação de frequência passíveis de serem detectadas no intervalo de 500 ms (note que o tempo de detecção é contabilizado a partir de 300 ms, instante em que ocorre o ilhamento).

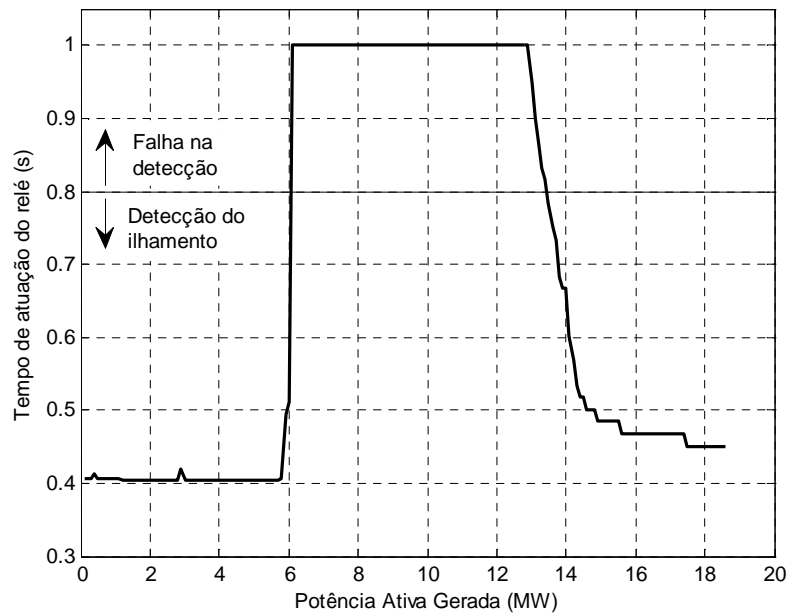


Figura 3. Curva do tempo de atuação do relé em função da variação da potência ativa gerada.

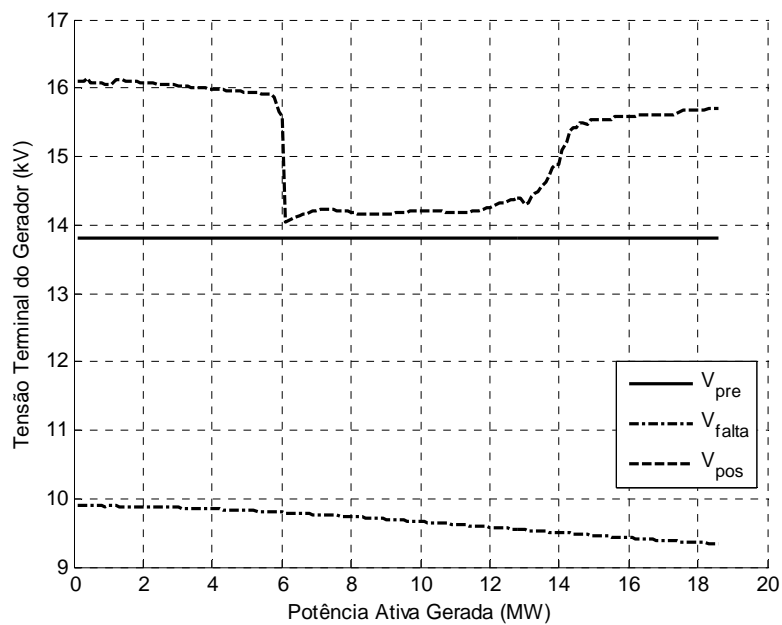


Figura 4. Tensão terminal do gerador antes (V_{pre}) e durante (V_{falta}) a ocorrência do curto-circuito e no final da simulação (V_{pos}).

A Figura 4 mostra a tensão terminal do gerador (tensão de linha) para os instantes antes da falta, durante a falta e ao final da simulação. Nota-se que em todos os valores de potência ativa gerada houve a correta inicialização das variáveis, de forma que o valor pré-falta é igual ao especificado de 13,8 kV. Durante a falta há um afundamento da tensão devido ao curto-circuito aplicado e ao final da simulação houve sobretensão variando entre 2 e 18%, para os casos de maior desbalanço de potência entre o gerador e carga ilhada.

Finalmente a Figura 5 apresenta o valor da frequência registrada ao final da simulação, que pode ser o instante em que o relé atuou ou o tempo final de 1s, nos casos de não atuação. Comparando-se com a Figura 3, nota-se que o relé atua em faixas de valores de frequência que podem ser consideradas aceitáveis, visto que a atuação baseia-se na taxa de variação, e não no valor absoluto da frequência. Tal característica faz do relé ROCOF um dos mais utilizados para detecção de ilhamento por atuar rapidamente quando a tendência de variação de frequência acentuada. Entretanto, para variações de frequência lentas o relé permitiu desvios de frequência proibitivos, não detectando o ilhamento do gerador.

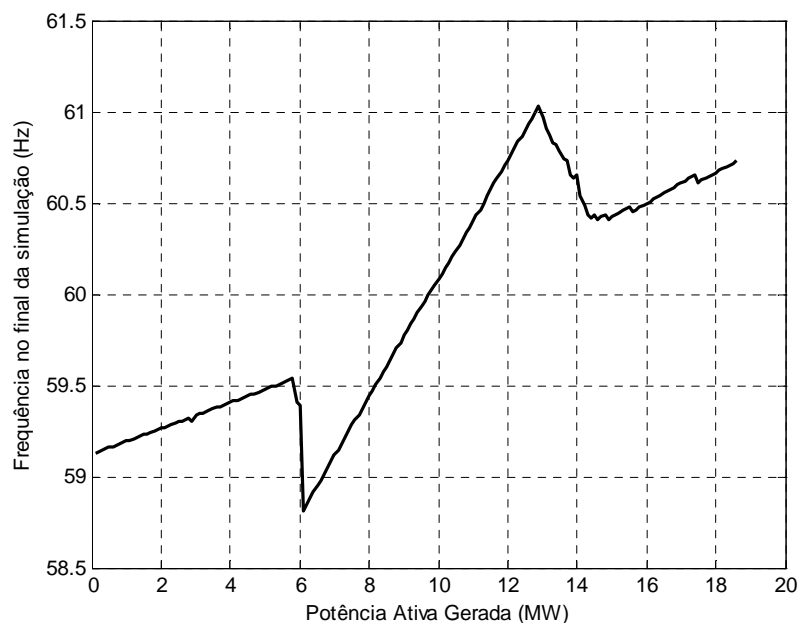


Figura 5. Frequência observada no instante final das simulações para diversos valores de potência ativa gerada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho confirma a necessidade de maiores estudos para determinar estratégias de detecção de ilhamento de GD ligados à rede de distribuição de energia.

Os resultados mostraram que o relé de taxa de variação frequência, um dos mais utilizados para detecção de ilhamento de geradores de grande porte teria falhado em uma faixa considerável de condições de operação de um GD.

Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar outros sinais e/ou a combinação de sinais além da frequência como forma de propor e melhorar o desempenho de estratégias de detecção de ilhamento de geradores distribuídos.

REFERÊNCIAS

CIGRÉ Working Group 37.23. **Relatório:** Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system. Cigré, 1999.

CPFL Paulista. **Norma Técnica:** Ligação de autoprodutores em paralelo com o sistema de distribuição da CPFL. CPFL Paulista, versão 1.2, 2005.

CIREN Working Group 4. **Relatório:** Dispersed generation. CIREN, 1999.

IEEE Standard. **Norma Técnica:** IEEE Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. IEEE, 2003.

JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P.; KISCHEN, D.; STRBAC, G. **Embedded Generation.** London: The Institution of Electrical Engineers, 2000.

KOPCAK, I. **Relatório:** Modelagem e Análise de Sistemas de Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Distribuídos. Relatório Final de Pós-Doutorado, FAPESP. Campinas, 2009, 43 p.

MANITOBA Hydro. **Relatório:** Interconnection guideline for connecting distributed resources to the Manitoba Hydro distribution system. MANITOBA Hydro, 2003. Disponível on-line em Setembro, 2006: <http://oasis.midwestiso.org>.

MATHWORKS. Acessado em junho de 2011: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

DE SALLES, N. J. **Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos.** 2007. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, Campinas, 2007.