



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO 2 - GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

O FUTURO DOS ESQUEMAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

John Mulhausen e Joe Schaefer
Florida Power & Light Company

Mangapathirao Mynam, Armando Guzmán e Marcos Donolo
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc

RESUMO

A geração distribuída (GD) está ganhando popularidade nos Estados Unidos e em todo o mundo. A Comissão de Serviços Públicos da Flórida ("Florida Public Service Commission") aprovou recentemente regras incentivando o uso de recursos renováveis. A integração da GD com a rede da concessionária de energia elétrica apresenta desafios para os esquemas anti-ilhamento. Esses esquemas detectam condições de ilhamento e desligam a GD. A Fig. 1 mostra uma configuração típica do sistema para instalações de geração distribuída.

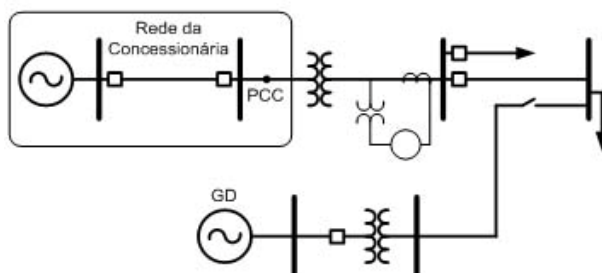


Fig. 1. Interconexão da GD com o sistema da concessionária

A falha no desligamento de geradores ilhados pode causar problemas como riscos à segurança das equipes de trabalho, religamento fora de fase e degradação da qualidade de energia.

Este artigo discute um esquema de detecção de ilhamento baseado na medição de uma área ampla ("wide-area measurement-based islanding detection scheme" – IDS_WA), o qual usa medições com sincronização de tempo para calcular a frequência de escorregamento e a aceleração entre dois sistemas visando detectar condições de ilhamento. O esquema proposto tem vantagens significativas se comparado aos esquemas tradicionais anti-ilhamento, especialmente quando o desbalanço ("mismatch") de potência é mínimo. Os esquemas baseados na medição de uma área local ("Local-area measurement-based schemes" – IDS_LA) complementam o IDS_WA. O artigo também discute o uso de um simulador digital em tempo real para modelar a GD junto com o resto do sistema de forma a validar o esquema anti-ilhamento proposto. O desempenho do esquema para diferentes configurações do sistema e condições de fluxo de carga também é apresentado, além de um esquema de ilhamento com sucesso que monitora a troca de potência do sistema, efetua ações corretivas quando ocorre o ilhamento e mantém a qualidade do serviço no sistema ilhado.

PALAVRAS-CHAVE

Sincrofasores, Geração Distribuída, Redes de Distribuição

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma fonte de energia confiável é extremamente importante na sociedade moderna. É necessário equilibrar os fatores econômicos, ambientais e sociais, integrando-os numa estratégia para o desenvolvimento energético.

Uma das estratégias consiste no uso do biogás (“landfill gas” – LFG) como fonte de energia. No passado, era comum queimar e liberar o LFG na atmosfera. Em 1994, a Agência de Proteção Ambiental (“Environmental Protection Agency” – EPA) dos Estados Unidos criou o programa LMOP (“Landfill Methane Outreach Program”) para incentivar o uso do LFG na produção de energia. Mais recentemente, a Comissão de Serviços Públicos da Flórida aprovou regras para incentivar as concessionárias privadas (“investor-owned utilities”) a usarem recursos renováveis. Na verdade, mais de 30 Estados incluem o LFG no seu portfólio padrão de recursos renováveis. A EPA estima que mais de 500 novos aterros sanitários tenham recursos energéticos disponíveis para gerar eletricidade para alimentar algumas centenas de milhares de residências.

Existem dois tipos de geradores para aplicações de geração distribuída (GD): máquinas rotativas e baseadas em inversores. As instalações de geração baseadas no LFG, classificadas como instalações de GD, são normalmente conectadas no nível da distribuição e operadas em paralelo com a concessionária de energia elétrica usando máquinas rotativas. A capacidade dessas instalações varia tipicamente de 1 a 10 MW. O número de geradores conectados em uma instalação também varia enormemente. Por exemplo, algumas instalações consistem de um único gerador de 2 MW, enquanto outras instalações propostas consistem de trinta geradores de 335 kW operando através de três bancos paralelos com dez geradores cada. A proximidade da instalação da GD a uma subestação também varia bastante. Algumas podem estar localizadas a alguns milhares de metros de distância da subestação de distribuição, enquanto outras estão a vários quilômetros da subestação.

2.0 - PRÁTICAS DA CONCESSIONÁRIA PARA CONEXÃO DA GD

Além do sistema de proteção instalado pelo proprietário da GD, as concessionárias de energia elétrica requerem um sistema de proteção da interconexão (“interconnection protection system” – IPS) para conectar a GD ao seu sistema de potência. As concessionárias aplicam um IPS no ponto de acoplamento comum (“point of common coupling” – PCC), definindo o sistema de proteção necessário de acordo com as regulamentações do Estado. Tipicamente, a concessionária instala e mantém os equipamentos da interconexão. Os principais objetivos do IPS são os seguintes:

- Proteger os equipamentos do consumidor contra uma GD que opera fora dos limites nominais de tensão e frequência.
- Proteger os equipamentos da concessionária contra efeitos adversos causados pela resposta da GD a faltas dentro do sistema da concessionária.

Além do IPS, as concessionárias geralmente requerem um sistema de proteção anti-ilhamento. O objetivo do esquema anti-ilhamento é detectar a perda da interconexão com a concessionária e desconectar a GD para que ela não opere de forma independente da rede. Se a saída da GD for compatível com o carregamento dos alimentadores quando o sistema local for desconectado da concessionária, pode ocorrer uma condição de ilhamento na qual a GD opera de forma independente.

Tipicamente, o ilhamento não é uma condição de operação desejável. Existem riscos para os trabalhadores da concessionária se as linhas de transmissão de potência permanecerem energizadas quando a interconexão com a concessionária for perdida. A Norma IEEE 1547 para Interconexão de Recursos Distribuídos com Sistemas Elétricos de Potência fornece requisitos e especificações técnicas para interconexões da GD [1]. Atualmente, a maioria das concessionárias não permite a operação ilhada da GD.

Para o propósito deste artigo, vamos focar nos métodos de detecção de ilhamento que as concessionárias usavam no passado, assim como em um método inovador que usa medições com sincronização de tempo.

3.0 - TÉCNICAS TRADICIONAIS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO

3.1 Esquemas de Detecção Local

Os esquemas de detecção local são divididos em duas categorias: esquemas de detecção passivos e esquemas de detecção ativos [2]. Os esquemas de detecção passivos usam tensão, frequência e taxa de variação da frequência (ROCOF¹ ou df/dt) para identificar condições de ilhamento. O desempenho dos elementos de frequência e df/dt depende do desbalanço (“mismatch”) de potência ativa entre a geração local e a carga local. O desempenho do elemento de tensão depende do desbalanço de potência reativa. Os esquemas passivos normalmente usam os elementos de tensão e frequência disponíveis nos relés de alimentadores e/ou geradores que protegem a GD. Os esquemas ativos tipicamente injetam sinais no sistema e detectam condições de ilhamento através da medição da resposta do sistema ao sinal injetado.

3.1.1 Esquemas de Detecção Passivos

Os esquemas de detecção passivos detectam condições de ilhamento baseando-se nos sinais de corrente e tensão medidos.

¹ ROCOF: “Rate Of Change Of Frequency”

3.1.2 Detecção baseada na tensão

Baseando-se no desbalanço de potência reativa existente antes de uma condição de ilhamento e na capacidade de reserva de potência reativa da GD, uma condição de subtensão ou sobretensão pode resultar em um sistema ilhado. O desvio em relação à tensão nominal pode ser uma indicação de condições de ilhamento. Um relé de tensão, que normalmente faz parte do esquema de proteção da GD, detecta esta condição. A detecção baseada na tensão complementa a detecção baseada na frequência. Adicionalmente, como as variações de tensão ocorrem de forma mais rápida do que as variações de frequência, a detecção baseada na tensão oferece uma resposta mais rápida do que a detecção baseada na frequência.

3.1.3 Detecção baseada na frequência

Os esquemas de detecção baseada na frequência são amplamente usados para detecção de ilhamento. A frequência aumenta se a geração ultrapassar a carga e diminui quando a carga ultrapassa a geração. Antes do ilhamento, os controles do sistema de potência regulam a frequência, que é tipicamente 60 Hz \pm 20 mHz ou 50 Hz \pm 20 mHz. Os desvios da frequência em relação à nominal e df/dt são bons indicadores de uma condição de ilhamento.

3.1.4 Relé de Frequência

Os relés de frequência medem as tensões nos terminais da GD e calculam a frequência do sistema. Esses relés emitem comandos de trip baseados em temporizadores e limites configuráveis pelo usuário. Valores limites típicos são 59.8 Hz para os elementos de subfrequência e 60.2 Hz para os elementos de sobrefrequência (sistema nominal de 60 Hz) com uma temporização típica de 10 a 12 ciclos.

3.1.5 Relé Df/dt

O relé baseado na relação df/dt mede a taxa de variação da frequência e ativa o contato de trip se df/dt ultrapassar um valor limite configurável pelo usuário. Um limite comum para df/dt é 2.5 Hz/s.

3.1.6 Relé de Deslocamento de Fase

O relé de deslocamento de fase ou “salto de vetor” (“vector shift or vector surge relay”) é baseado no deslocamento angular do sinal de tensão que o relé mede no terminal da GD em relação a um sinal de referência. Uma vez que o relé calcula a frequência com base na diferença dos ângulos de fase, o desempenho do relé de deslocamento de fase é comparável ao relé de frequência. Algumas implementações de relés usam o deslocamento de fase para habilitar o relé baseado na df/dt ou ROCOF.

3.1.7 Esquemas de Detecção Ativos

Um dos esquemas de detecção ativos usados injeta corrente inter-harmônica de baixa frequência nos terminais do gerador. Os esquemas de detecção ativos calculam a impedância das tensões e correntes medidas nos terminais do gerador [3]. Durante condições normais do sistema, a impedância nos terminais do gerador é pequena. A impedância calculada aumenta logo após uma condição de ilhamento. A lógica detecta a variação na impedância para identificar condições de ilhamento. O desempenho dos esquemas de detecção ativos não depende do nível de desbalanço de potência na ilha. Contudo, o custo adicional para um sistema de injeção, efeitos na carga e interferência resultante de múltiplas instalações de GD diminuem o interesse neste esquema.

3.2 Esquemas de Detecção Baseados nas Comunicações

Os esquemas tradicionais de detecção baseados nas comunicações usam os estados dos disjuntores e chaves seccionadoras para identificar uma condição de ilhamento. Um processador central ou controlador de lógicas monitora os estados dos disjuntores e seccionadoras e determina uma condição de ilhamento baseando-se numa condição lógica predefinida. Esses esquemas são básicos e fáceis de serem implementados; contudo, os esquemas dependem da topologia do sistema de potência. A lógica deve se adaptar às mudanças na topologia.

Para instalações de GD com um alimentador dedicado, a detecção de ilhamento utiliza um relé multifunção em cada extremidade da linha de interconexão com transferência de trip entre os dois disjuntores da linha. Desde que não haja outros consumidores conectados, é possível usar um alimentador dedicado sem que o ilhamento seja motivo de preocupação. Esta solução é efetiva, porém os alimentadores dedicados são tão caros que exigir sua utilização pode impedir que geradores distribuídos de baixa capacidade acessem a rede.

4.0 - DETECÇÃO DE ILHAMENTO USANDO SOLUÇÕES BASEADAS NA MEDIÇÃO DE UMA ÁREA LOCAL E DE UMA ÁREA AMPLA

A solução proposta usa uma combinação de IDS_LA e IDS_WA. O IDS_LA usa elementos de tensão e frequência convencionais e também um elemento baseado nas medições de frequência e df/dt para detectar condições de ilhamento. O IDS_WA usa medições com sincronização de tempo da instalação da GD e de uma fonte remota para detectar condições de ilhamento.

4.1 Esquema de Detecção Baseada na Medição de Uma Área Local

O esquema de detecção IDS_LA usa elementos de proteção convencionais. A Tabela I mostra os valores limites e os valores dos temporizadores de pickup para esses elementos convencionais.

TABELA I
AJUSTES DOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO CONVENCIONAIS PARA IDS_LA

Elemento de Proteção	Limite	Tempos de Atuação
Sobrefrequência	61 Hz	10 ciclos
Subfrequência	59 Hz	10 ciclos
Sobretensão	1.15 pu	10 ciclos
Subtensão	0.85 pu	10 ciclos

O IDS_LA também usa um elemento especial para detectar condições de ilhamento. Este elemento fornece uma resposta mais rápida quando comparado aos elementos de frequência convencionais. O esquema bloqueia a saída da característica por 30 ciclos durante condições de falta. A lógica de detecção de falta inclui elementos de sobrecorrente e subtensão. A Fig. 2 mostra a característica juntamente com a lógica de bloqueio e detecção de falta.

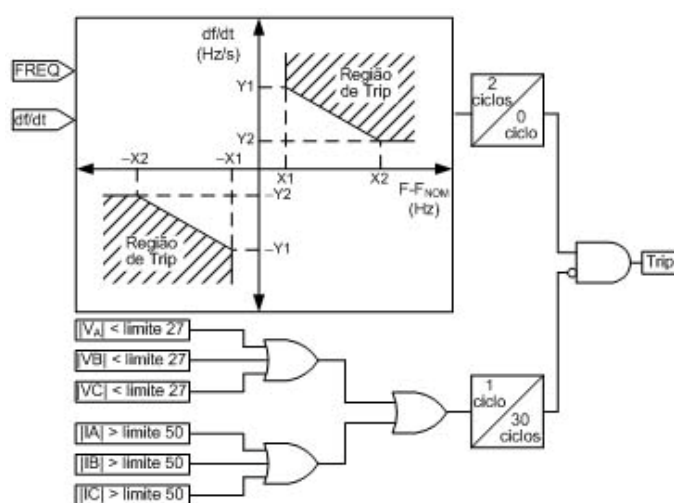


Fig. 2. Esquema de detecção de ilhamento usando medições locais

4.2 Esquema de Detecção Baseada na Medição de Uma Área Ampla

O IDS_WA usa medições com sincronização de tempo de uma fonte remota e da GD para detectar condições de ilhamento. O esquema utiliza dois métodos de detecção que serão descritos a seguir.

4.2.1 Diferença Angular

O elemento baseado na diferença angular opera se a diferença dos ângulos de fase entre os fasores da tensão de sequência-positiva das duas barras (GD e fonte remota) ultrapassar um valor limite programável por um tempo determinado.

4.2.2 Característica da Aceleração e Frequência de Escorregamento

Esta característica é baseada na frequência de escorregamento e aceleração [4]. O esquema mede a frequência de escorregamento baseando-se na taxa de variação da diferença angular em relação ao tempo; a aceleração é a taxa de variação da frequência de escorregamento em relação ao tempo. A característica detecta de que forma os dois sistemas estão escorregando um em relação ao outro, bem como qual a rapidez com que eles estão escorregando. Baseando-se em valores limites pré-ajustados, a característica declara condições de ilhamento. A Fig. 3 mostra as regiões de ilhamento e operação normal da característica.

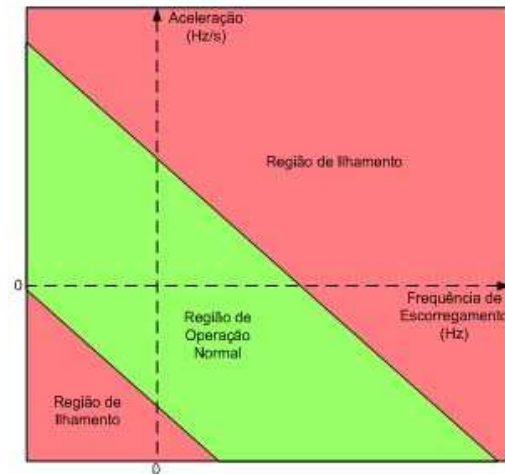


Fig. 3. Característica de detecção de ilhamento usando medições de uma área ampla

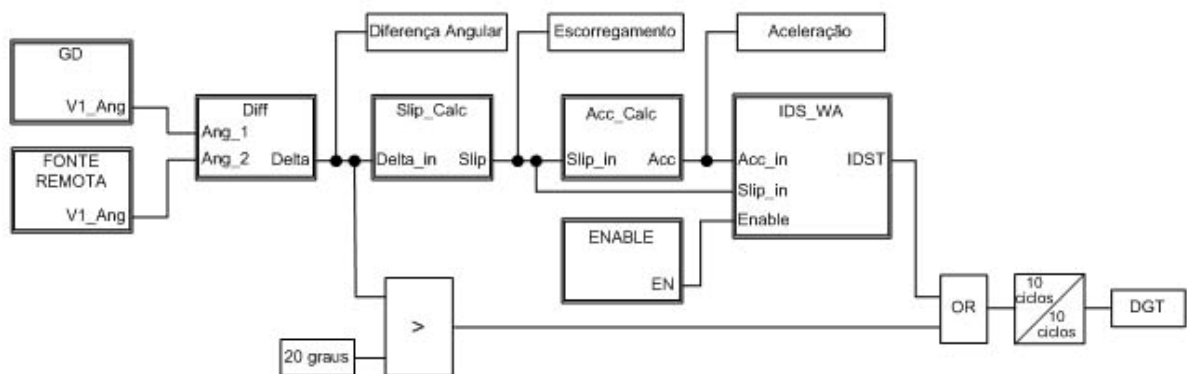


Fig. 4. Lógica de detecção de ilhamento baseada nas medições local e remota com sincronização de tempo

A Fig. 4 mostra a lógica para implementação de IDS_WA. Um processador de lógicas em tempo real recebe as medições dos ângulos da tensão de sequência-positiva com sincronização de tempo da instalação da GD e da fonte remota. Este processador calcula a diferença angular, frequência de escorregamento e aceleração. Ele emite o comando de trip da GD se a diferença angular ultrapassar o limite (ex., 20 graus) ou se o ponto de operação estiver na região de ilhamento da característica da Fig. 3.

Este esquema, baseado nas medições de uma área ampla, opera para condições de ilhamento durante todas as condições de transmissão de potência. Contudo, o desbalanço de potência determina com qual rapidez ou lentidão os dois sistemas estão escorregando um em relação ao outro. Logo, o tempo de resposta depende do desbalanço de potência. O esquema leva um tempo maior para detectar a ilha quando o desbalanço de potência é mínimo, uma vez que os sistemas estão escorregando lentamente um em relação ao outro. Como o esquema proposto IDS_WA não depende da topologia do sistema, podemos usar o esquema para diferentes configurações do sistema.

5.0 - VALIDAÇÃO DO ESQUEMA USANDO SIMULAÇÕES DINÂMICAS

Para validar os esquemas propostos, usamos o Simulador Digital em Tempo Real ("Real Time Digital Simulator" – RTDS®) para desenvolver um modelo do sistema de potência baseado num sistema de distribuição típico. Conectamos as unidades de controle e medição fasorial ("phasor measurement and control units" – PMcus) ao simulador para receber os sinais de corrente e tensão do terminal da GD e da fonte remota. A PMCU da instalação da GD inclui o esquema de detecção IDS_LA discutido na Seção IV. Implementamos o esquema de detecção IDS_WA em um processador de vetores do sincrofasor ("synchrophasor vector processor" – SVP) [5] que recebe medições fasoriais a 60 mensagens por segundo, executa a lógica discutida na Seção IV e envia um comando de controle de volta para a PMCU baseado na saída da lógica. O contato da PMCU foi conectado de volta ao simulador para dar trip na GD. A

Fig. 5 e a Fig.6 mostram a configuração do teste e o modelo do sistema que usamos para validar o esquema proposto.

Modelamos o sistema de transmissão como uma fonte infinita. O modelo da GD incluiu dinâmicas de máquinas síncronas e um sistema de controle de excitação. Bloqueamos o controle do regulador do gerador para aplicar torque fixo à máquina síncrona.

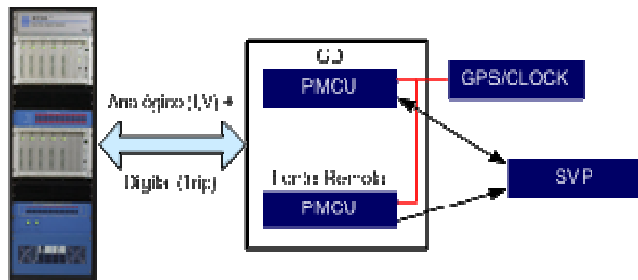


Fig. 5. Sistema de testes para verificar a operação dos esquemas de detecção de ilhamento

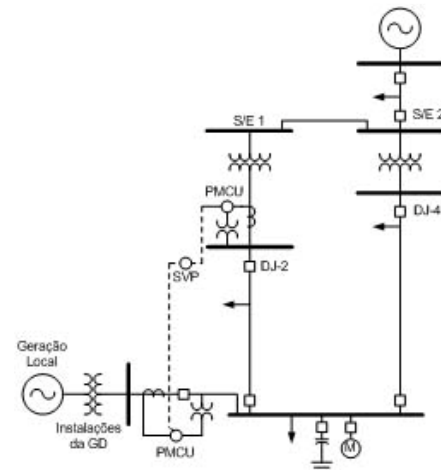


Fig. 6. Modelo do sistema de potência

Configuramos as seguintes condições de fluxo de carga da potência ativa (a potência reativa é equilibrada) antes das simulações de faltas/dinâmicas:

- GD maior do que a carga do alimentador conectado
- GD menor do que a carga do alimentador conectado
- GD compatível com a carga do alimentador conectado

Os casos das simulações dinâmicas incluíram o seguinte:

- Faltas fase-terra e trifásicas
- Abertura manual do disjuntor de interligação levando a uma condição de ilhamento
- Chaveamento da geração e carga
- Chaveamento do banco de capacitores
- Chaveamento do motor de indução

Não desligamos o disjuntor da GD para comparar os tempos de resposta dos diferentes esquemas. Os casos dos testes deste artigo são associados à abertura manual do disjuntor de interligação DJ-2, com o DJ-4 normalmente aberto. Armazenamos as mensagens com sincronização de tempo para cada caso de teste.

5.1 Caso de Teste 1: A Geração Distribuída é Maior do que a Carga do Alimentador Conectado

A Fig. 7 mostra as tensões da Fase-A no local da GD e na fonte remota. Logo após uma condição de ilhamento, a geração local é maior do que a carga local; em consequência, a frequência começou a subir. Consequentemente, o elemento de sobrefrequência detectou a condição de ilhamento. O IDS_WA é relativamente lento em função dos atrasos na comunicação e filtragem.

5.2 Caso de Teste 2: A Geração Distribuída é Menor do que a Carga do Alimentador Conectado

Neste caso de teste, a geração local é menor do que a carga local conectada. A frequência cai após a abertura do disjuntor (Fig. 8), disparando a operação do elemento de subfrequência. Nos Casos 1 e 2, o esquema IDS_LA respondeu mais rápido do que os elementos de frequência convencionais.

A Fig. 9 mostra a característica de IDS_WA. O ponto de operação está dentro da característica durante condições normais. Logo após uma condição de ilhamento, os dois sistemas começam a escorregar um em relação ao outro, e o ponto de operação entra na região de detecção de ilhamento.

5.3 Caso de Teste 3: A Geração Distribuída é Compatível com a Carga do Alimentador Conectado

Um sistema ilhado não se move para um novo ponto de operação se a geração local e a carga local forem equilibradas. Portanto, o IDS_LA e os elementos convencionais podem não detectar esta condição de ilhamento com tempo adequado. A Fig. 10 mostra que o esquema de detecção IDS_WA opera para esta condição. Conforme explicado na seção anterior, o tempo de operação do esquema IDS_WA depende da rapidez com que os dois sistemas escorregam um em relação ao outro. Os tempos de resposta do elemento podem ser lentos; logo, para evitar um religamento automático fora de sincronismo, um elemento de check de sincronismo deve supervisionar o fechamento do disjuntor.

5.4 Caso de Teste 4: Segurança do Sistema de Detecção de Ilhamento

Testamos a segurança do esquema proposto. Os testes incluíram variações de geração e carga, chaveamento do motor de indução e chaveamento do banco de capacitores. O esquema não operou para nenhum desses testes. Como exemplo, a Fig. 11 mostra que os elementos restringiram e não operaram durante a condição de partida do motor.

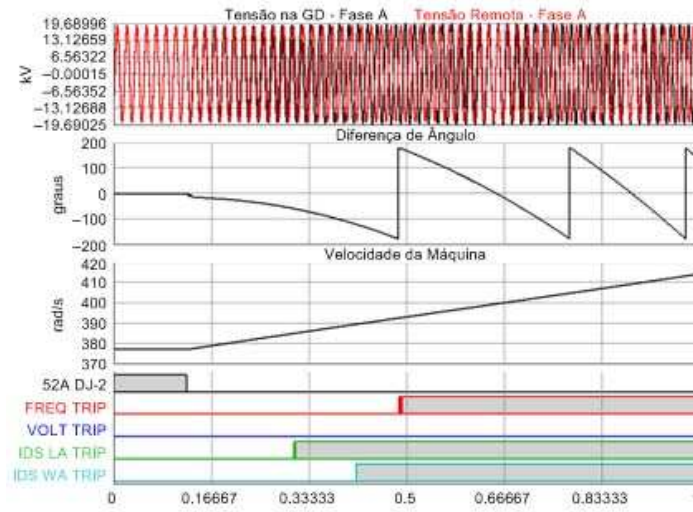


Fig. 7. Elementos baseados na detecção da área local detectaram a condição de ilhamento para exportação de potência

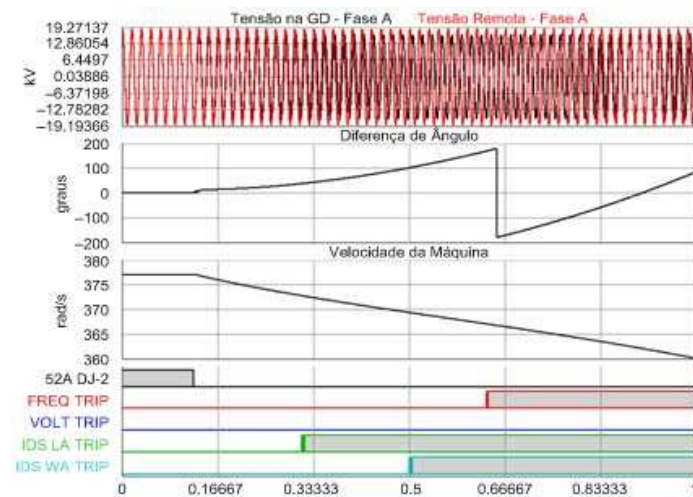


Fig. 8. Elementos baseados na detecção da área local detectaram a condição de ilhamento para importação de potência

5.5 Caso de Teste 5: Múltiplas Condições de Troca de Potência

Em seguida, efetuamos diversos testes para estudar a resposta dos esquemas IDS_LA e IDS_WA para diferentes relações de carga-geração / potência ativa. No modelo, a geração local total (P_G) usada foi de 11.3 MW e a carga da subestação local (P_L) foi aumentada gradualmente a partir da carga local até 22.6 MW. A Fig. 12 mostra os tempos de resposta da proteção do gerador, IDS_LA e IDS_WA para a relação carga-geração / potência ativa. Os resultados mostram que IDS_LA responde mais rápido do que os elementos de proteção convencionais.

A partir dos resultados da simulação, concluímos o seguinte:

- O esquema IDS_LA detecta o ilhamento mais rápido do que o esquema IDS_WA para condições em que a relação carga-geração é menor do que 0.8 ou maior do que 1.3.
- O esquema IDS_LA não opera com tempo adequado para condições em que o desbalanço de potência é desprezível. O esquema IDS_WA detecta o ilhamento sob essas condições.
- Os casos de testes com ilhamento intencional ou manual consistem num desafio para efetuar a detecção quando comparados aos casos de teste com faltas transitórias. Quando uma falta transitória inicia a condição de ilhamento, o sistema já está perturbado, logo os elementos convencionais podem detectar a condição de forma mais rápida.

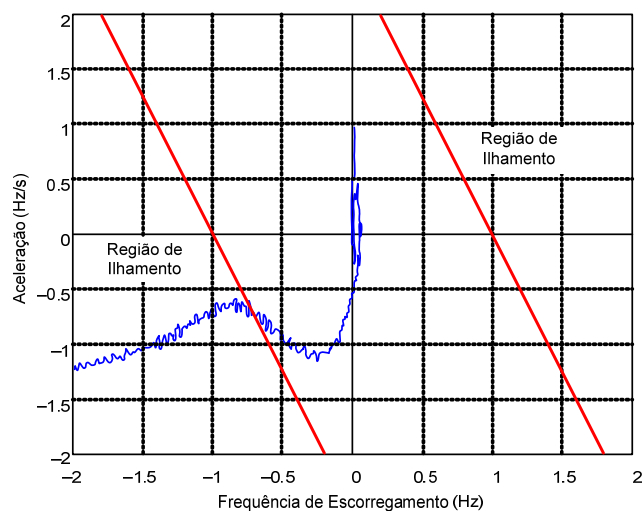


Fig. 9. O ponto de operação entra na região de ilhamento para troca de importação de potência

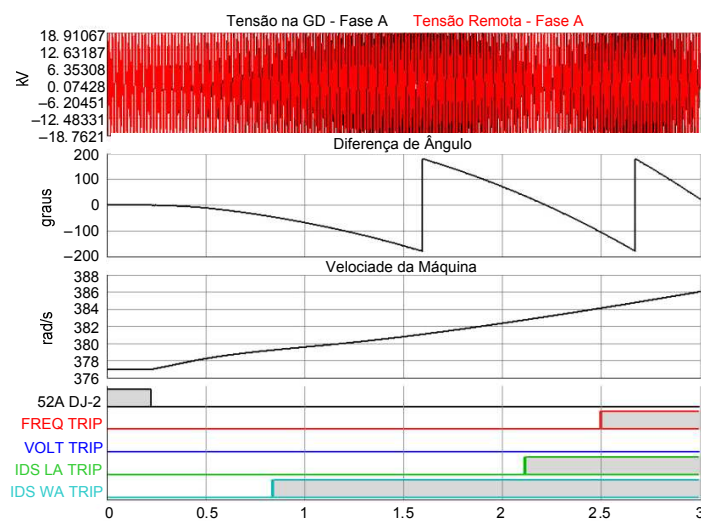


Fig. 10. O esquema IDS_WA detectou a condição de ilhamento para mínima troca de potência

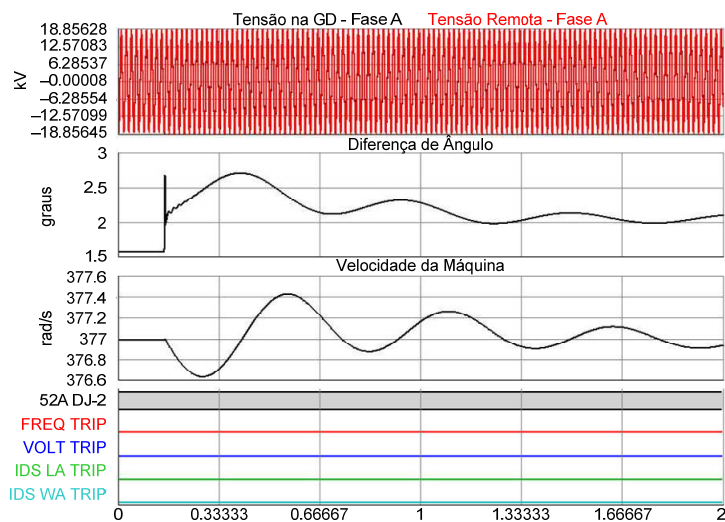


Fig. 11. Os elementos de detecção de ilhamento permanecem estáveis durante o chaveamento do motor de indução

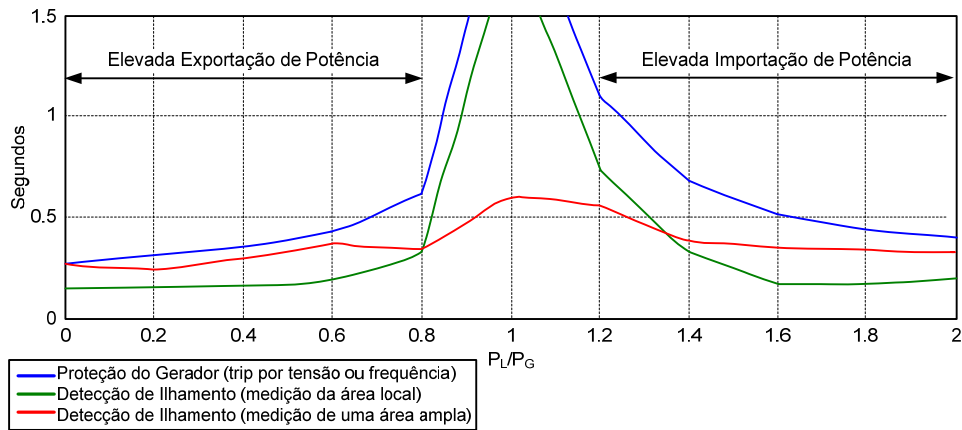


Fig. 12. Tempos de operação da proteção do gerador e esquemas de detecção de ilhamento da área local e de uma área ampla para diferentes condições de troca de potência

6.0 - CONCLUSÕES

1. As concessionárias de energia elétrica requerem a detecção do ilhamento e a desconexão da GD para evitar riscos à segurança das equipes de trabalho, religamento fora de fase e degradação da qualidade de energia.
2. Os esquemas de detecção de ilhamento que usam as medições locais detectam condições de ilhamento de forma confiável quando existe uma troca de potência significativa entre a GD e a concessionária. Contudo, eles podem não detectar condições de ilhamento com tempo adequado quando a troca de potência for mínima.
3. O elemento que usa as informações da frequência local e df/dt é o mais rápido para detectar o ilhamento durante condições de operação com elevada troca de potência.
4. Os esquemas baseados na medição de uma área ampla detectam condições de ilhamento independentemente da quantidade de troca de potência.
5. Os esquemas adaptativos de rejeição de cargas evitam desligamentos de cargas desnecessários ao mesmo tempo em que mantêm a estabilidade do sistema e a qualidade de energia na área ilhada.

7.0 - REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547-2003, June 2003.
- [2] W. Xu, K. Mauch, and S. Martel, "An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and Issues for Canada," July 2004. Disponível: http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-mncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2004-074/2004-074_e.pdf.
- [3] P. O'Kane and B. Fox, "Loss of Mains Detection for Embedded Generation by System Impedance Monitoring," in *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection*, Conf. Publication No. 434.
- [4] A. Guzmán, V. Mynam, and G. Zweigle, "Backup Transmission Line Protection for Ground Faults and Power Swing Detection Using Synchrophasors," proceedings of the 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2007.
- [5] E. O. Schweitzer, III, D. Whitehead, A. Guzmán, Y. Gong, and M. Donolo, "Advanced Real-Time Synchrophasor Applications," proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2008.
- [6] V. Mynam and A. Guzmán, "Islanding Detection and Adaptive Load Shedding," SEL Application Note (AN2009-59), September 2009. Disponível: <http://www.selinc.com>.