Algoritmo digital para proteger a interligação entre a concessionária e a indústria

Francisco Antonio Reis Filho, Eduardo C. Senger, Euvaldo Cabral F. Júnior e Eduardo A. Kinto, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Colaboração da SEG Este trabalho apresenta um algoritmo digital, o Cogera, para implementar a proteção concessionária-indústria operando em sistemas de co-geração. Sua principal contribuição é propor uma proteção multifunção, com uma visão sistêmica das principais condições operativas, tendo em vista que abrir o paralelo entre esses dois sistemas é sempre uma decisão difícil, que implica riscos técnicos e econômicos para ambos.

crescente demanda de energia nos diversos parques industriais, em conjunto com a recente política de privatização das empresas públicas, tem suscitado cada vez mais a possibilidade de as indústrias gerarem uma pequena ou até mesmo uma grande parte de suas necessidades de energia elétrica, visando reduzir seus custos.

Apesar dessa solução estar popularizando-se rapidamente, a operação da conexão elétrica entre a concessionária e a indústria ainda apresenta problemas não solucionados devidamente até o momento.

Principalmente sob o ponto de vista de proteção, é um grande desafio apresentar uma solução integrada que cubra as possibilidades operativas mais importantes decorrentes dessa interligação, já que algumas dessas indústrias não podem suportar um déficit em seu consumo sem riscos de perdas econômicas. Aqui, são discutidos os fenômenos inerentes a um sistema de co-geração e seus aspectos operativos, e os sistemas de proteção atualmente mais utilizados, em que normalmente se utilizam funções convencionais de proteção de retaguarda dos geradores, com um tempo maior de coordenação.

A principal contribuição do trabalho é a proposição de um algoritmo digital para implementar a proteção da interligação concessionária-indústria. Esse algoritmo, denominado *Cogera*, primeiramente classifica os diversos eventos que ocorrem na interligação, como:

- curto-circuito na linha (incluindo tipo da falta, transitória ou permanente);
- · curto-circuito na indústria; e
- perda de sincronismo e ilhamento.

Após essa classificação, o algoritmo identifica as situações que im-



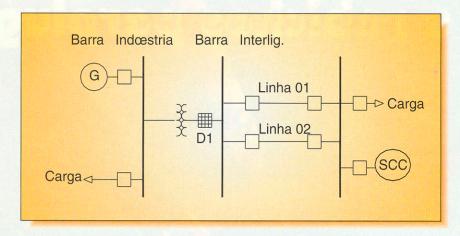


Fig. 1 – Configuração típica de uma instalação industrial com geração própria, conectada à concessionária em alta tensão

plicam risco de danos para a instalação de co-geração ou para os consumidores da concessionária e promove o desligamento da interligação, com a consequente separação entre os dois sistemas. Para implementar a função de classificação, pesquisaram-se novos métodos de observação dos sinais de corrente e tensão, como a análise dos agrupamentos (clusters), a utilização da transformada rápida de Fourier, da transformada Wavelets e dos conceitos de energia contida nesses sinais, cujos resultados são discutidos adiante.

Também é apresentado o desen-

volvimento do algoritmo *Cogera*, com resultados e conclusões do trabalho, e sugestões e abordagens que possam servir de base para pesquisas futuras sobre o tema em pauta.

Sistemas de co-geração

Conceitos básicos

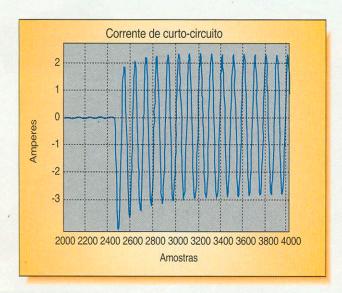
Na figura 1 é apresentada uma configuração típica de uma instalação industrial que possui geração própria, conectada à concessionária em alta tensão, e opera em paralelo ou isoladamente para suprir uma parte de seu consumo de energia elétrica. Essa geração, no Brasil, é

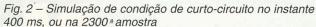
feita basicamente por meio do uso do gás (usinas petroquímicas), de vapor (fábricas de papel e celulose) e de bagaço de cana (indústrias de açúcar e álcool), onde a potência desses geradores varia, em média, de 10% a 40% da potência nominal da instalação. É importante observar que as linhas 1 e 2 da concessionária operam em condições do tipo normal/reserva e que essa configuração se apresenta como a mais usual no sistema elétrico; portanto, é admitida ao longo do trabalho.

Sob o ponto de vista operativo em instalações desse tipo, algumas questões precisam ser criteriosamente analisadas e, entre elas, destacam-se os seguintes aspectos:

- o ponto de conexão entre os dois sistemas;
- o sistema de aterramento; e
- os esquemas de proteção.

Com relação ao ponto de conexão, sistemas interligados na alta tensão representam uma condição mais favorável sob o ponto de vista da proteção da interligação, pois a impedância do transformador diminui a contribuição de curto da concessionária para um defeito no gerador. Para o sistema de aterramento do gerador, a resistência serve para limitar o valor de faltas à terra e atenuar significativamente a





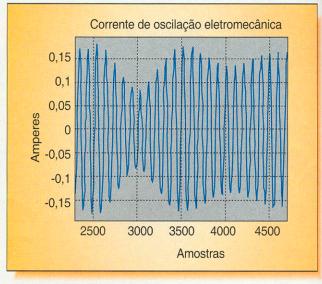


Fig. 3 - Condição de oscilação eletromecânica

corrente de terceira harmônica, gerada pela máquina. No transformador, a conexão em delta na alta tensão serve para limitar a contribuição do gerador a um curto fase-terra na concessionária e não dessensibilizar as proteções de terra da mesma. Sob o ponto de vista de proteção desse sistema, as funções mais utilizadas no gerador da indústria são:

- 50/51 sobrecorrente:
- 67 sobrecorrente direcional:
- 27/47 subtensão e falta/seqüência de fases;
- 81 freqüência absoluta:
- 25 sincronismo:
- 32 reversão de potência; e
- 40 perda de excitação.

Algumas dessas funções podem ser estendidas para proteger a interligação. Nesse tipo de solução, adiciona-se a função $\delta F/\delta t$ à função 81 e a função 59 às funções 27/47, que, complementadas pela função de salto de vetor e taxa de variação de potência de saída da máquina $(\delta P/\delta t)$, constituem as proteções disponíveis atualmente no mercado para proteger a interligação. Convém ressaltar que essas proteções

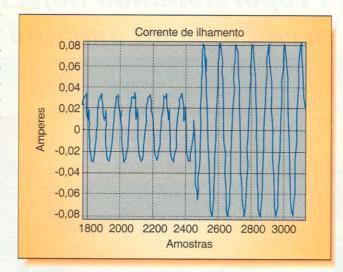


Fig. 4 – Forma de onda no ilhamento, após a abertura do disjuntor da geração da concessionária

dependem do fluxo de potência ativa intercambiada entre os sistemas, para tornar efetivas suas medições na quase totalidade. É importante observar que cada equipamento que faz parte desse sistema, tanto na concessionária (linhas e transformadores) quanto na indústria (gerador, transformadores e cargas), possui dispositivos próprios de proteção, responsáveis pela detecção e isolação do mesmo em caso de defeito.

De fato, propor que algumas funções citadas possam servir como proteção da interligação implica um tempo de coordenação relativamente alto, com proteções específicas de outros equipamentos. Isso faz com que o tempo de tomada de decisão para a separação entre os dois sistemas seja muito alto, podendo danificar principalmente o gerador da indústria.

Por outro lado, a aplicação correta das funções complementares, como o salto de vetor e a taxa de variação da potência da máquina $(\delta/P/\delta/t)$, origina critérios de ajuste muito sensíveis e difíceis de se calcular, implicando um

critério bastante rigoroso para uma correta aplicação. Portanto, a principal linha de pesquisa do trabalho procura enfocar uma visão sistêmica dos eventos citados, que possam propiciar uma rápida e correta decisão de abrir a interligação entre os dois sistemas, visando principalmente à integridade do gerador da indústria.

Requisitos para uma proteção multifunção da interligação

É norma que a concessionária não assuma qualquer responsabilidade pela proteção dos geradores e

Inteligência e economia integradas a um CLIC.

Ideal para aplicações Industriais, Comerciais e Residenciais.







Veja algumas características:

 Máxima 12 entradas e oito saídas, podendo ser duas entradas analógicas (de 0 à 10 VCC).

AUTOMAÇÃO PROGRAMADA de Sistemas de Transporte, Iluminação, Portas e Cancelas, Refrigeração e Ar Condicionado,

Memória Back-up, tensão de alimentação 24 VCC, 110 VCA e 220 VCA.

Serviço de consulta 1209

• Relógio em tempo real, 15 tipos de temporizadores diferentes, 8 contadores diversos e 16 comparadores.





Tel 55 11 3337 8333

equipamentos anexos do consumidor (indústria) [2]. Este deve ser o responsável pela proteção eficiente de toda a sua instalação e de todos os seus equipamentos, de forma que faltas ou distúrbios no sistema da concessionária não lhes causem danos. Outra condição relevante para o problema é o fato da indústria não poder, em nenhuma hipótese, energizar os circuitos desenergizados da concessionária.

Como consequência dessas normas, as três condições operativas mais im-

portantes que devem ser evitadas são:
• o religamento dos disjuntores da concessionária sem que as tensões dos dois sistemas estejam perfeitamente sincronizadas. Essa situação pode ocorrer, por exemplo, após a abertura e religamento dos disjun-

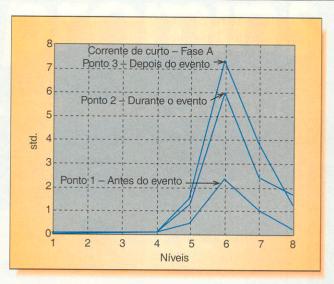


Fig. 5 – Exemplo de gráfico de curto-circuito, obtido com a utilização de janela de dois ciclos

tores 1 e 2 devido a uma falta na linha 1 (figura 1). Caso os dois sistemas não estejam devidamente sincronizados, esse religamento pode produzir solicitações mecânicas no eixo do gerador da indústria;

• ilhamento da geração da indústria

alimentando alguns consumidores da concessionária, condição que pode ocorrer após a perda da geração da concessionária por meio da abertura do seu equivalente (figura 1); e

• oscilação eletromecânica provocada por um desbalanço entre geração e carga no sistema da concessionária, produzindo solicitações mecânicas no eixo do gerador da indústria. Dependendo da magnitude dessa oscilação, a proteção da interligação deverá abrir a co-

nexão entre os dois sistemas.

Para a condição de curto, o algoritmo proposto verificará o tipo de defeito (fase-terra, fase-fase e trifásico) e somente permitirá o religamento após o *check* de sincronismo do disjuntor *D1* se o curto for





CO-GERAÇÃO

fase-terra e transitório. Essa medida visa proteger efetivamente gerador da indústria contra religamentos oriundos de defeitos mais severos no sistema da concessionária, como os defeitos fase-fase e trifásicos, não só nas linhas de interligação como em outros equipamentos que necessitem de uma vistoria mais detalhada após a ocorrência dos mesmos.

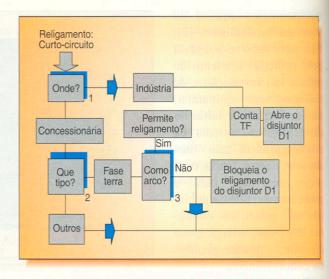


Fig. 6 – Diagrama de blocos do processo de análise do defeito

Classificação dos sinais

Uma das partes mais importantes do algoritmo *Cogera* é a possibilidade de classificar corretamente os três principais eventos sob o ponto de vista sistêmico para a interligação: o curto-circuito, a oscilação eletromecânica e o ilhamento. Para tal, procura-se pesquisar no trabalho uma ferramenta que possibilite essa classificação, não só de forma correta e eficiente, mas no menor tempo possível.

Na figura 2, simula-se uma

condição de curto-circuito no instante 400 ms, ou na 2300 a amostra, em que nota-se a presença da componente de 60 Hz, da componente exponencial amortecida e da variação em módulo no sinal de corrente. Observam-se, também, aspectos de altas freqüências em alguns casos de curtos monofásicos, com arco elétrico nos sinais de tensão da fase faltosa.

Para a condição de oscilação eletromecânica, mostrada na figura 3, modela-se no mesmo instante da simulação anterior a inserção de grandes blocos de cargas na linha

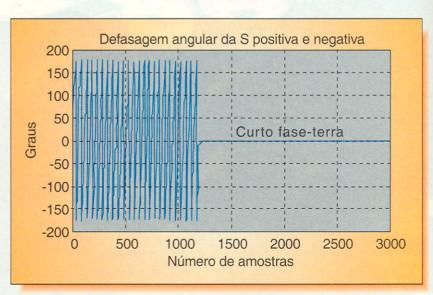


Fig. 7 – Simulação da medição entre os ângulos de seqüência

de interligação entre a concessionária e a indústria, obtendo-se a modulação por baixas frequências (0,5 a 4 Hz) nos sinais de corrente e tensão.

Para o ilhamento, tem-se a condição operativa de que, antes de se abrir o disjuntor da geração da concessionária, não existe fluxo de potência ativa/reativa trocada entre os dois sistemas. Ou seja, a corrente que circula pela linha de interligação tem por objetivo principal energizar o transformador de alta tensão na subestação da indústria, apresentando, portanto, harmônicas sobrepostas à componente fundamental de 60 Hz antes da abertura do disjuntor da concessionária, fato que também ocorre no instante 96,6 ms, ou na 600 a amostra.

Após a abertura desse disjuntor, a carga de baixo valor da concessionária passará a ser alimentada pelo gerador da indústria, que energizará o transformador de alta tensão pelo lado da baixa tensão (13,8 kV), e na alta tensão tem-se uma componente típica de 60 Hz alimentando as cargas da concessionária. A respectiva forma de onda é mostrada na figura 4.

Transformada Wavelets e o desvio padrão de seus coeficientes

Seguindo os conceitos mostrados na bibliografia, a transformada Wavelets apresenta a possibilidade de detectar, ao mesmo tempo, as altas e as baixas frequências contidas nos sinais, devido às características dos parâmetros a e b. Salama et al [1] utilizam esse conceito para, por meio do desvio padrão dos coeficientes de cada nível, visualizar melhor os eventos e, em seguida, definir mais claramente quais desses níveis deverão ser melhor analisados. De fato, essa análise nada mais é do que outra representação da energia do sinal e, apesar da sobreposição obtida na análise dos clusters no desenvolvimento do trabalho, pode-se notar uma migração de posição no plano, quando a janela se sobrepõe aos fe-

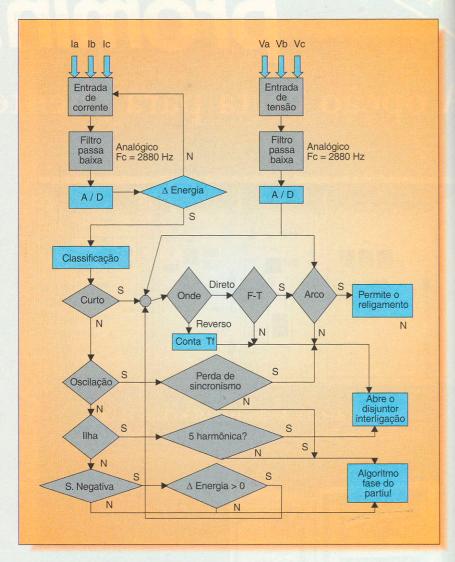


Fig. 8 - Principais passos do algoritmo Cogera

nômenos em questão. Portanto, existe uma variação de energia dos sinais que pode ser útil mais adiante. A proposta consta dos seguintes passos:

• cálculo da energia de cada nível, dada pelo teorema de Parseval:

$$\int \left[\gg(t) \right]^2 \times dt =$$

$$\sum_{k=-\epsilon} \left[c(k) \right]^2 + \sum_{j=0}^{\epsilon} \sum_{k=-\epsilon}^{\epsilon} \left[d_j(k) \right]^2$$
 (1)

onde, conforme o algoritmo de Mallat:

c(k) = uma versão suavizada do sinal original; e

d(k) = sua versão detalhada; ambos

correspondem aos coeficientes Wavelets;

• cálculo do desvio padrão da versão detalhada — coeficiente d(k) de cada nível, por meio da seguinte fórmula:

$$\sigma_{\rm x} = \sqrt{{\rm Variancia}({\rm X})} = \sqrt{{\rm E}[({\rm X} - \mu)^2]}$$
 (2)

onde:

 μ = a média dos coeficientes de cada nível contidos em cada janela.

As frequências centrais de cada nível são descritas na tabela I, seguindo o teorema de Mallat para a frequência de amostragem de 5760 Hz (96 amostras/ciclo), em que

a primeira frequência do nível 1 é a frequência de Nyquist requerida. Em seguida, monta-se o gráfico dos desvios padrões de todos níveis para os sinais de corrente a serem analisados. Pela tabela I e pelos comentários feitos anteriormente, pode-se esperar que o nível 10, com range de 2,81 a 5,62 Hz, seja o mais apropriado para a análise dos fenômenos de oscilação; o nível 6, com range de 45 a 90 Hz, para o curto, pois esse fenômeno é tipico de frequência fundamental; e, por último, o nível 4 para o ilhamento, pois seu range de 180 a 360 Hz abrange principalmente a quinta harmônica, ou seja, 300 Hz.

Para obter esses gráficos, é conveniente fazer as seguintes anotações:

o oscilação – foi utilizada uma janela de 20 ciclos no nível 10, andando sobre o sinal com uma sobreposição de 50% entre elas, objetivando obter a maior variação possível de energia para detectar as baixas freqüências de forma mais efetiva;

Nível 1	2880 Hz	
	1440 Hz	Nível 2
Nível 3	720 Hz	
	360 Hz	Nível 4
Nível 5	180 Hz	
	90 Hz	Nível 6
Nível 7	45 Hz	
	22,5Hz	Nível 8
Nível 9	11,25 Hz	
	5,625 Hz	Nível 10
	2,81Hz	

- curto usou-se uma janela de dois ciclos para o nível 6, também com uma sobreposição de 50%; e
- ilhamento o mesmo procedimento anterior para o nível 4.

Com a aplicação dessas janelas sobre os sinais em observação, é possível obter a variação dos respectivos coeficientes do desvio padrão dos níveis, conforme mostrado como exemplo na figura 5, para um caso de curto-circuito. Portanto, em seguida pode-se obter faixas de valores máximos e mínimos que possibilitem, por meio de software, classificar corretamente as três condições operativas em questão. Esse procedimento obteve 95% de acerto nos 300 casos simulados, em que pode-se melhorar o desempenho para faltas fase-terra com a introdução de uma lógica de seqüência negativa.

O algoritmo Cogera

Uma vez classificados os fenômenos, procura-se captar uma visão sistêmica da conexão entre a concessionária e a indústria. Para os casos de curto-circuito, utiliza-se o algoritmo de Prakash baseado nos sinais ΔI e ΔV para se determinar a localização do defeito. Esse processo mostrou-se bastante rápido e eficiente, não dependendo do esquema de conexão do transformador, prin-





cipalmente para curtos fase-terra. Em seguida, se a localização é na concessionária, procura-se saber qual o tipo de defeito, utilizando-se o ângulo entre a seqüência positiva e negativa, que para os defeitos fase-terra será zero ou próximo desse valor.

Para determinar se o defeito é permanente ou não, usa-se o conceito de medição do arco elétrico, simulado por uma forma de onda quadrada em fase com a corrente de curto, gerando harmônicas nos terminais das formas de onda de tensão. O principal objetivo, nesse caso, é somente permitir o religamento da concessionária se o defeito for monofásico e transitório. Nas figuras 6 e 7, tem-se o diagrama de blocos do processo de análise do defeito e a simulação da medição entre os ângulos de seqüência.

No diagrama de blocos geral da figura 8, pode-se observar todos os principais passos do algoritmo Cogera, com destaque para a partida por variação de energia, os aspectos de classificação citados e os algoritmos de curto, oscilação e ilhamento, não comentados em detalhe no trabalho por serem extensos. Cabe, mais uma vez, comentar o principal aspecto sistêmico do algoritmo proposto.

Conclusões

A utilização de uma nova ferramenta matemática para classificar os eventos envolvidos mostrou boa eficiência e rapidez. O fato de não se poder utilizar uma janela de tamanho único, devido aos aspectos de baixas freqüências (oscilação) e altas freqüências nos casos de curto e ilhamento, possibilitou que escalas logarítmicas da transformada Wavelets pudessem ser uma boa alternativa ao problema.

Outro aspecto relevante em questão é a necessidade de uma

simulação bastante criteriosa, por meio de softwares específicos do tipo *Matlab*, para obterem-se os valores que definem as faixas de desvio padrão para a posterior, classificação. Por último, é importante salientar que este trabalho é um resumo de tese de doutoramento na Poli/USP, e que o respectivo algoritmo encontra-se implementado em definitivo tanto em *Matlab* como na linguagem em *C* e em *C*++.

Referências

- [1] Salama, M. M. A.; Sultan, M. R.; Chikhani, A. Y.: Power quality detection and classification using Wavelet multiresolution signal decomposition. IEEE/TPD, vol. 14, n º 4, pp. 1469-1476. Outubro/1999.
- [2] Requisitos gerais para o paralelismo de consumidores autoprodutores de energia elétrica com os sistemas de subtransmissão de 138 kV e 69 kV da CPFL. NT-1202. Dezembro/1999.

Trabalho apresentado no IX Erlac - Encontro Regional Latino-Americano da Cigré, promovido pela Cigré-Brasil e coordenado pela Itaipu Binacional, realizado de 27 a 31 de maio de 2001, em Foz do Iguaçu, PR.

