



Algoritmo digital para a proteção da interligação concessionária/indústria operando em sistemas de co-geração*

Francisco Antonio Reis Filho - SEGdB/POLI/PEA/USP; Eduardo C. Serger - POLI/PEA/USP;
Euvaldo Cabral Júnior - POLI/PEE/USP; Eduardo Kirto - POLI/PEE/USP

Resumo

O presente trabalho têm por objetivo desenvolver um algoritmo digital para a implementação da proteção concessionária - indústria operando em sistemas de cogeração, pois abrir o paralelo entre esses dois sistemas é sempre uma decisão difícil, já que essa condição implica em riscos técnicos e econômicos para ambos. A principal contribuição é a proposta de uma proteção multi-função com uma visão sistêmica das principais condições operativas, entre os quais se destacam o religamento automático decorrente do curto-circuito na concessionária, a oscilação de potência seguida ao déficit de energia entre os dois sistemas, e o ilhamento que é a condição de uma parte das cargas da concessionária serem alimentadas pelo gerador da indústria quando da perda parcial ou total de sua própria alimentação.

Sob o ponto de vista matemático, a impossibilidade do uso de uma só janela de observação para os três fenômenos devido principalmente as suas características freqüenciais (altas e baixas freqüências), motivou a verificação do conceito de energia, da utilização da transformada Wavelets, e o desvio-padrão dos coeficientes dos seus níveis para a classificação dos eventos, obtendo-se bons resultados. Em seguida, através de algoritmos específicos para a localização, tipo e permanência do defeito, medição do ponto-E na curva de estabilidade para a oscilação, e a medição da 5 harmônica para o ilhamento, obtêm-se o algoritmo Cogera para a proteção da interligação.

Palavras-chaves

Cogeração. Transformada Wavelets. Religamento. Ilhamento. Oscilação.

1- Introdução

A 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 que, as indústrias gerem uma ou grande parte das suas necessidades de energia elétrica, visando um menor custo. Apesar dessa solução estar se popularizando rapidamente, a operação da conexão elétrica entre a concessionária e

a indústria ainda apresenta problemas não devidamente solucionados até o presente 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. No item 2 são discutidos os fenômenos inerentes a um sistema de cogeração e seus aspectos operativos, bem como os sistemas de proteção atualmente mais utilizados, onde normalmente se utilizam funções convencionais de proteção de retaguarda dos geradores com um tempo maior de coordenação.

A principal contribuição do trabalho, apresentada nos itens 3 e 4, é a proposição de um algoritmo digital para a implementação da proteção da interligação concessionária indústria. Esse algoritmo, denominado Cogera, primeiramente classifica os diversos eventos que ocorrem na interligação tais como: curto-circuito na linha (tipo da falta, se transitória ou permanente, etc...); curto-circuito na indústria; perda de sincronismo e ilhamento. Após essa classificação o algoritmo identifica as situações que impliquem risco de danos para a planta de cogeração 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 se pesquisou 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 nestes sinais, onde os resultados obtidos são discutidos no item 3.

No item 4 é apresentado o desenvolvimento do algoritmo Cogera com resultados e conclusões do trabalho, e com sugestões e abordagens que possam servir de base para pesquisas futuras sobre o tema em pauta.

2 - Sistemas de co-geração

2.1 - Conceitos básicos

Na Figura 1, é apresentada uma configuração típica



Artigo

ca de uma planta industrial que possui geração própria conectada à concessionária em alta-tensão e que opera em paralelo ou isoladamente para suprir uma parte de seu consumo de energia elétrica. Essa geração, no Brasil, é feita basicamente através do gás (usinas petroquímicas), de vapor (fábricas de papel e celulose) e de bagaço de cana nas indústrias de açúcar e álcool, onde a potência desses geradores varia em média de 10 a 40 % da potência nominal da planta. 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, sendo portanto a admitida ao longo do trabalho.

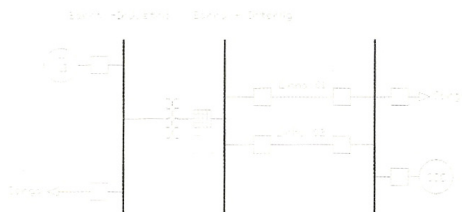


Figura 01

Sob o ponto de vista operativo em instalações desse tipo, algumas questões precisam ser criteriosamente analisadas e, dentre essas 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 para à terra e para atenuar significativamente a corrente de terceira harmônica, gerada pela máquina. No transformador a conexão em delta na alta tensão serve para limitar a contribuição do gerador para um curto fase-terra na concessionária, e para não desensibilizar as proteções de terra da mesma. Sob o ponto de vista de proteção deste 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 - frequência absoluta;
- 25 - sincronismo;

- 32 - reversão de potência; e
- 40 - perda de excitação.

E dentre as funções acima, podem-se estender algumas dessas 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 a proteção da interligação. Convém ressaltar que essas proteções são dependentes do fluxo de potência ativa intercambiada entre os sistemas para tornar efetivas suas medições na sua 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), possuem dispositivos próprios de proteção responsável pela detecção e isolamento dos mesmos em caso de defeito.

De fato, ao propor-se que algumas funções citadas acima possam servir como proteção da interligação, implica em um tempo de coordenação relativamente alto com proteções específicas de outros equipamentos, fazendo 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 ($\delta P / \delta t$) originam critérios de ajustes muito sensíveis e difíceis de se calcular, implicando em 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 a integridade do gerador da indústria.

2.2 - Requisitos para uma proteção multi-função da interligação

É norma que a concessionária não assuma qualquer responsabilidade pela proteção dos geradores e equipamentos anexos do consumidor (indústria) (Norma CPFL/ref.2). Esse deve ser o responsável pela proteção eficiente de toda a sua instalação, bem como de todos seus equipamentos, de tal forma que faltas ou distúrbios no sistema da concessionária não causem danos aos seus equipamentos. Outra condição relevante para o problema é o fato de que a indústria não pode em nenhuma hipótese energizar os circuitos desenergizados da concessionária. Como consequência dessas normas têm-se que as três condi-



ções operativas mais importantes e que devem ser evitadas são:

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

b) Ilhamento da geração da indústria alimentando alguns consumidores da concessionária, onde essa condição pode ocorrer após a perda da geração da concessionária através da abertura do seu equivalente (vide Figura 01).

c) 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 conexão entre os dois sistemas.

Para a condição de curto o algoritmo proposto verificará qual 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 fase-terra e transitório. Essa medida visa proteger efetivamente o 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.

3 - Classificação dos sinais

3.1 - Introdução

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

Na Figura 2, simula-se uma condição de curto-circuito no instante 96,6 ms ou na 600 amostra, onde nota-se a presença da componente de 60 HZ, da componente exponencial amortecida, e da variação em módulo no sinal de corrente. Observa-se também aspectos de altas frequências 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 car-

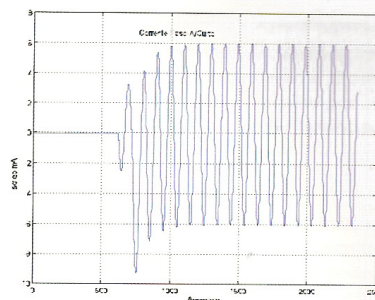


Figura 02

gas na linha 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 têm-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 da 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 amostra.

Após a abertura desse disjuntor a carga de baixo

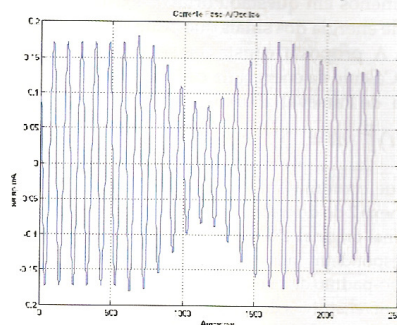


Figura 03

valor da concessionária passará então a ser alimentada pelo gerador da indústria que energizará o transformador de alta-tensão pelo lado da baixa tensão (13,8 KV), tendo-se na alta-tensão uma componente típica de 60 HZ alimentando as cargas da concessionária. A respectiva forma de onda está mostrada na Figura 4 a seguir.

3.2 - Transformada Wavelets e o desvio-padrão de seus coeficientes

Seguindo os conceitos mostrados na bibliogra-

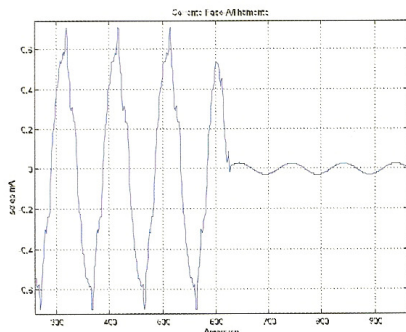


Figura 04

fia, a transformada Wavelets apresenta a possibilidade de detectar ao mesmo tempo as altas e as baixas frequências contidas nos sinais devido as características dos parâmetros "a" e "b", e Salama et al. (ref.1) utiliza este conceito para através do desvio-padrão dos coeficientes de cada nível, visualizar melhor os eventos e em seguida definir mais claramente quais destes níveis deverão ser melhor analisados. De fato esta 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 fenômenos 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 abaixo:

$$\int |\mathcal{F}(t)|^2 \cdot dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [c(k)]^2 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [d_j(k)]^2 \quad (01)$$

em que, conforme o algoritmo de Mallat (vide referência no anexo 2 do do trabalho), $c(k)$ é uma versão suavizada do sinal original e $d(k)$, sua versão detalhada e ambos correspondem aos coeficientes wavelets. Cálculo do desvio-padrão da versão detalhada (coeficiente $d(k)$) de cada nível, através da fórmula mostrada abaixo:

$$\sigma_x = \sqrt{\text{Variância}(X)} = \sqrt{E[(X - \mu)^2]} \quad (02)$$

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

As frequências centrais de cada nível são descritas na tabela 1 seguindo o teorema de Mallat para a frequência de amostragem de 5760hz (96 amostras/ciclo), onde 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 ana-

lisados. Pela tabela 1 abaixo e pelos comentários efetuados acima, 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 este fenômeno é típico 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 o 300 HZ.

Tabela 01

	2880 Hz		90 Hz
Nível 01 !		Nível 06 !	
	1440 Hz		45 Hz
Nível 02 !		Nível 07 !	
	720 Hz		22,5 Hz
Nível 03 !		Nível 08 !	
	360 Hz		11,25 Hz
Nível 04 !		Nível 09 !	
	180 Hz		5,625 Hz
Nível 05 !		Nível 10 !	
	90 Hz		2,81 Hz

Para a obtenção destes gráficos é conveniente fazer as seguintes anotações:

Oscilação: Foi utilizada uma janela de 04 ciclos no nível 10 andando sobre o sinal com uma sobreposição de 50 % entre estas, objetivando obter a maior variação possível de energia para detectar as baixas frequências de uma forma mais efetiva.

Curto: Usou-se uma janela de 2 ciclos para o nível 6 também com uma sobreposição de 50 %.

Ilhamento: O mesmo procedimento anterior para o nível 4.

A aplicação dessas janelas sobre os sinais em observação proporciona a obtenção de variação dos respectivos coeficientes do desvio-padrão dos níveis conforme mostrado como exemplo na Figura 05 para um caso de curto-circuito.

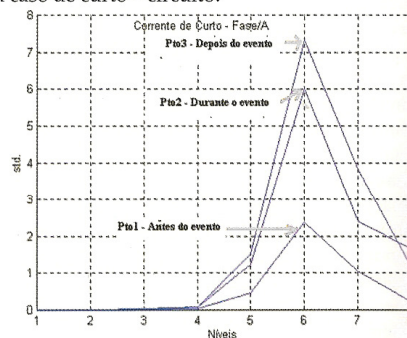


Figura 05

Em seguida pode-se portanto obter faixas de valores máximos e mínimos que possibilitem através de software classificar corretamente os três condições operativas em questão. Esse procedimento obteve 95 % de



acerto nos trezentos casos simulados, onde pode-se melhorar o desempenho para faltas fase-terra com a introdução de uma lógica de sequência negativa.

4 – 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 I e V para se determinar a localização do defeito. Esse processo se mostrou bastante rápido e eficiente não dependendo do esquema de conexão do transformador principalmente para curtos fase-terra. Em seguida, definida a localização, se na concessionária, procura-se saber qual o tipo de defeito e para tal usa-se o ângulo entre a sequência positiva e negativa, que para o defeitos fase-terra será zero ou próximo desse valor.

Para a determinação 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. A seguir na Figuras 06 e 07 se tem o diagrama de blocos do processo de análise do defeito e a simulação da medição entre os ângulos de sequência.

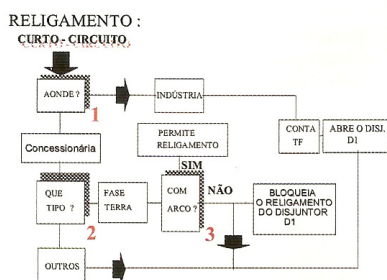


Figura 06

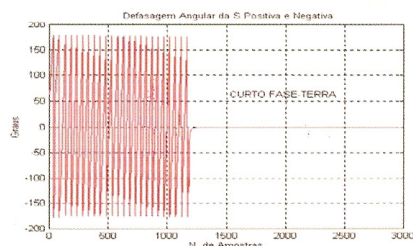


Figura 07

No diagrama de blocos geral da Figura 08 a seguir, se pode 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.

7 – CONCLUSÕES.

A utilização de uma nova ferramenta matemática para classificar os eventos envolvidos se mostrou com uma boa eficiência e rapidez. O fato de não se poder utilizar uma janela de tamanho único devido aos aspectos de baixas frequências (Oscilação) e altas frequências nos casos de curto e ilhamento possibilitou que as escalas logarítmicas da Transformada Wavelets pudesse ser uma boa alternativa ao problema. Outro aspecto relevante em questão é que necessita-se de uma simulação bastante criteriosa através de softwares específicos do tipo MATLAB para se obter os valores que definem as faixas de desvio padrão para a posterior classificação. Por último é importante salientar que esse trabalho é um resumo de tese de doutoramento na POLI/USP, com término previsto para maio/junho de 2001, e que o respectivo algoritmo se encontra implementado em definitivo tanto em MATLAB como na linguagem em C e em C++.

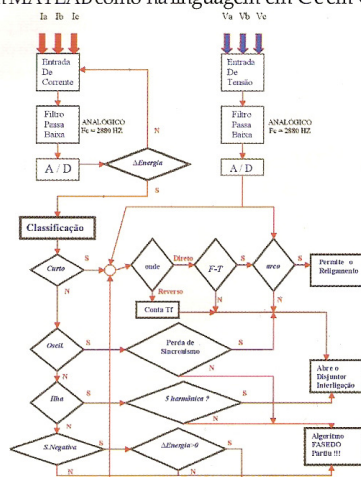


Figura 08

8 – Bibliografia.

- [01] SALAMA M.M.A.; SULTAN M.R.; CHIKHANI A. Y; Power Quality Detection and Classification Using Wavelet Multi-resolution Signal Decomposition - IEEE/TPD - Vol.14/No.4/October 1999, pp.1469-1476.
- [02] 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 - 01/12/99 - Total 10 páginas.

* Trabalho apresentado no 9º Encontro Latino-Americano da Cigré