



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

FI/GPC/15
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA -
GPC**

**PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES DE ALTA TENSÃO PARA CONFIGURAÇÕES SIMPLES E
COMPLEXAS**

Renan Bernardes(*)

**Roy Moxleye
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc**

Jordan Allen

Jeff Pope

RESUMO

A operação econômica e atual configuração dos modernos sistemas de potência requerem um controle de tensão mais distribuído e um suporte de reativo mais amplo para o sistema. Os bancos de capacitores da subestação consistem na forma mais econômica para adicionar reativos ao sistema. Este artigo detalha os métodos de proteção aplicados às diversas configurações de bancos de capacitores, incluindo conexões que estão longe de ser tradicionais, discutindo ainda a sensibilidade e velocidade dos esquemas de proteção aplicados. Outras funcionalidades, como a localização de faltas do capacitor, também são discutidas para fornecer benefícios adicionais às equipes técnicas da subestação.

PALAVRAS-CHAVE

Controle de Reativos, Banco de Capacitores, Proteção de Banco de Capacitor.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os bancos de capacitores são projetados com várias configurações para atender às restrições do projeto do sistema; logo, o engenheiro de proteção tem que estar preparado para proteger qualquer uma dessas configurações. As entradas disponíveis para o relé são tensão e corrente, sendo a localização do transformador de instrumento determinada pela configuração do banco. Este artigo descreve três tipos de bancos significativamente diferentes e usa simulação em tempo real para avaliar a eficácia da proteção e a estabilidade de cada aplicação. Os bancos estudados incluem ambos os projetos de bancos sem fusíveis e bancos com fusíveis internos. Os mesmos princípios se aplicam tanto a um banco com fusíveis externos como a um banco com fusíveis internos. Tipicamente, porém, os bancos de capacitores com fusíveis externos têm tensões e correntes de falha mais elevadas do que os bancos sem fusíveis ou bancos com fusíveis internos porque a queima de um fusível externo provoca a perda de uma unidade inteira. Como ponto de referência, os bancos de capacitores sem fusíveis possuem uma construção unitária, conforme mostrado na Figura 1 [1].

Observe que numa construção sem fusíveis, quando um único elemento falha, ele “jumpeia” (curto-circuita) as unidades ligadas em paralelo com o mesmo, aumentando o estresse de tensão sobre as unidades em série remanescentes.

Um banco com fusíveis internos possui fusíveis em cada elemento individual, conforme mostrado na Figura 2. No caso de falha de um elemento em um banco com fusíveis internos, quando ocorre a queima do fusível do elemento defeituoso, o estresse de tensão aumenta nos elementos restantes em paralelo com o elemento defeituoso. O objetivo da proteção do banco consiste em, de forma ideal, detectar falhas no fusível ou elemento individual e

(*) Rodovia Campinas-Mogi Mirim (SP-340), km 118.5. Condomínio Pólis de Tecnologia (CPqD) – Prédio 11
CEP 13086-902 Campinas, SP – Brasil
Tel: (+55 19) 3515-2000 – Fax: (+55 19) 3515-2011 – Email: suporte@selinc.com

fornecer uma indicação suficientemente antecipada de problemas dentro do banco de capacitores para evitar um colapso em cascata quando houver falha de vários elementos individuais.

Para todos os bancos estudados, é assumido que a proteção de sobrecorrente é fornecida no lado da linha do banco para dar trip em caso de uma falta fase-fase ou fase-terra. O objetivo da proteção do banco de capacitores é dar alarme no caso de falha de um número mínimo determinado de elementos ou unidades e dar trip para um número maior determinado de falhas. Obviamente, é desejável detectar qualquer falha do elemento.

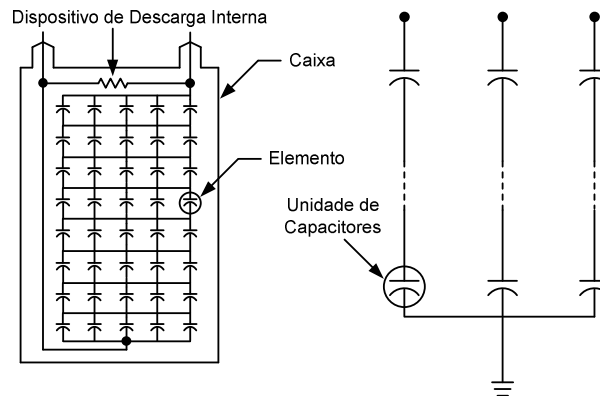


FIGURA 1 - Unidade sem fusível em um banco conectado em estrela

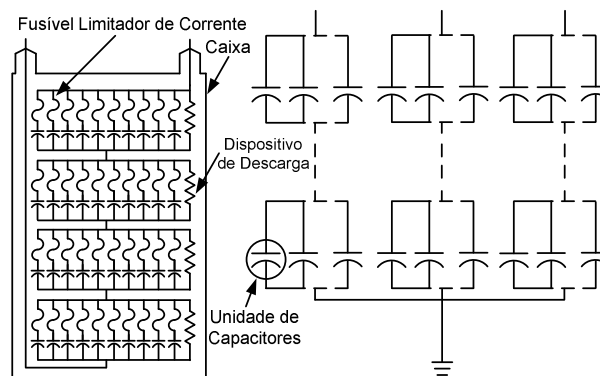


FIGURA 2 - Unidade com fusíveis internos em um banco conectado em estrela

2.0 - ANÁLISE DE FALHAS DO ELEMENTO UNIDADE

2.1 Banco em Dupla-Estrela

O primeiro banco a ser analisado é um banco conectado em dupla-estrela padrão com uma unidade de aterramento, conforme mostrado na Figura 3. Os números fornecidos são a capacitância de cada porção do banco em microfaradays. Este banco é especificado com 2 MVAR, 69 kV.

Nesta configuração, é comum usar apenas o balanço de corrente para fornecer a proteção do banco. Estamos interessados em ver a comparação da sensibilidade entre o elemento diferencial de tensão e a proteção de balanço de corrente. A tensão diferencial é derivada do transformador de potencial (TP) TP2 e do TP do lado de alta (não mostrado). O balanço de corrente é medido no transformador de corrente (TC) TC2. O TC1 (não mostrado) é usado para proteção de sobrecorrente do banco.

Convertendo para valores de reatância, a reatância total acima do ponto da estrela é $-j4.799$ ohms. A reatância abaixo do ponto da estrela é $-j4.076$ ohms. O TP2 usa a tensão desenvolvida através da reatância abaixo do ponto da estrela como uma entrada. Isso se torna um problema de sensibilidade significativo quando consideramos que cada banco de capacitores tem várias seções em série e que queremos detectar a falha de apenas uma seção em série.

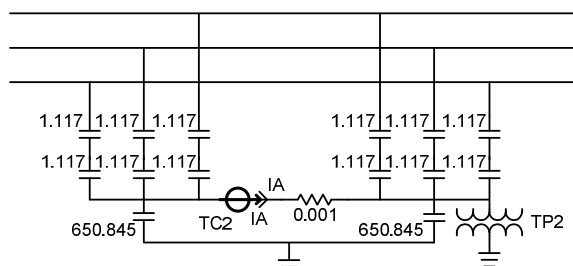


FIGURA 3 - Banco de capacitores aterrado conectado em dupla-estrela

A Figura 4 mostra as correntes e tensões para as falhas de um, dois e três elementos em série em um banco dupla-estrela. Nessas figuras, a corrente diferencial circulando no TC2 é mostrada no traço superior. A tensão diferencial, a diferença entre o TP2 e o TP do lado de alta, é mostrada no traço inferior. As atuações (*pickups*) dos elementos do relé são mostradas na parte inferior. Os elementos 87 são baseados em tensão e os elementos 60 são baseados em corrente. Os elementos do relé foram ajustados conforme recomendado pelo fabricante, com temporizações do alarme para falhas de nível baixo e operação com velocidade mais alta para falhas graves.

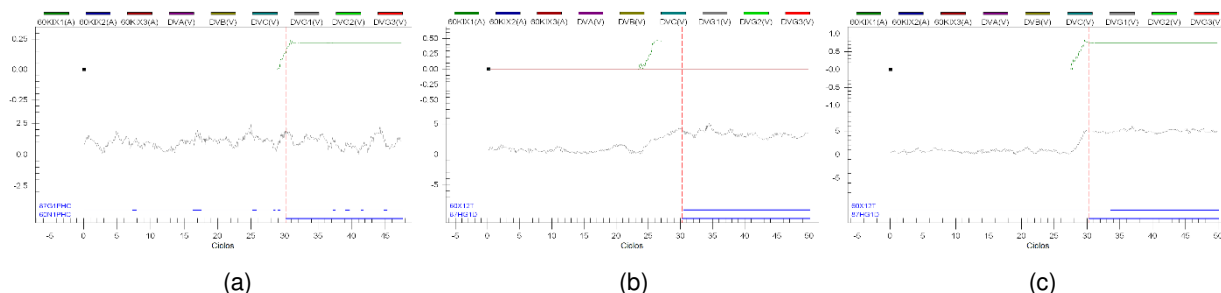


FIGURA 4 – (a) Falha de um elemento (b) Falha de dois elementos (c) Falha de três elementos

Observe que na Figura 4a, a corrente diferencial aumenta no instante da falha, enquanto a tensão diferencial permanece no nível de 0.5 a 2.5 V com muito ruído. Nenhum dos elementos de tensão tem uma operação estável. Para falha de dois elementos (Figura 4b), o sinal de tensão ainda tem uma relação sinal-ruído muito baixa com um sinal de ruído de aproximadamente 2 V antes e após a falta, e com uma tensão diferencial pouco abaixo de 5 V após a falha do elemento. No entanto, pode ser razoavelmente observado que a tensão sobe junto com a corrente. Neste caso, o elemento 87HG1D (tensão temporizada) opera essencialmente ao mesmo tempo ou até mesmo um pouco antes do elemento de corrente 60X12T. Quando ocorre a falha do terceiro elemento (Figura 4c), podemos ver que o sinal de tensão é forte e estável, tendo quase a mesma qualidade de sinal que o sinal da corrente.

Estávamos preocupados com o ruído observado no circuito da tensão diferencial. Olhando para a tensão do lado de alta e para a tensão diferencial (Figura 5), podemos ver o problema. A magnitude do elemento diferencial é praticamente a mesma antes e após a falha de um único elemento (no Ciclo 30), variando até 2 V em função da baixa relação sinal-ruído do circuito. A tensão primária, ao mesmo tempo, é de 40 kV pico a pico. Mesmo considerando a escala dos circuitos do TP, a tensão diferencial gerada pela falha de um simples elemento do banco em estrela é tão pequena se comparada com a tensão primária que não é possível que seja efetuada uma detecção significativa de uma falha num único elemento por um elemento de tensão. Somos de opinião que o mesmo problema tem alta probabilidade de ocorrer numa subestação real.

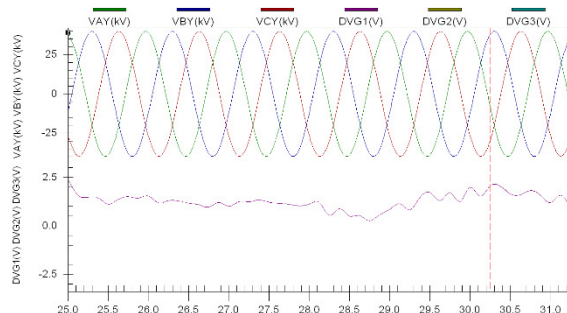


FIGURA 5 - Banco em dupla-estrela, tensão primária e tensão diferencial antes e após a falha de um único elemento

2.2 Banco Duplo-H

O segundo banco estudado foi instalado para correção do fator de potência em uma área onde havia preocupações com a elevada tensão de quinto harmônico causada pela sobreexcitação dos transformadores da subestação. Neste caso, foram adicionados um resistor e um reator de sintonia para proteger o banco durante esta condição, conforme mostrado na Figura 6.

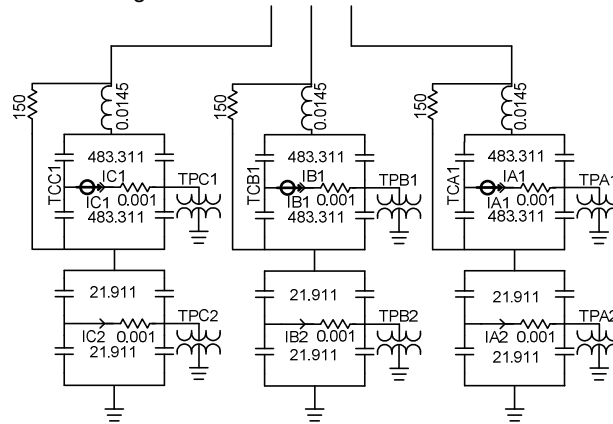


FIGURA 6 - Banco duplo-H com resistor e reator de sintonia

Este banco utiliza capacitores com fusíveis internos, significando que a falha de um elemento remove apenas o elemento com defeito e não todos os elementos em paralelo, como no caso de um banco sem fusíveis (o elemento defeituoso “jumps” todos os elementos em paralelo). Isso significa que falhas de elementos individuais são muito mais difíceis de serem detectadas. O objetivo da proteção era operar para uma falha de 1% dos elementos e dar trip no elemento defeituoso, o que resultaria em um aumento de tensão nos elementos saudáveis, excedendo 110% da tensão nominal do elemento. O usuário declarou que a proteção preferida era uma baseada na medição diferencial de tensão comparando a tensão intermediária em cada seção H com a tensão da barra primária. A medição do balanço de corrente usando TCs conectados entre os ramais foi disponibilizada como proteção de retaguarda caso a proteção de tensão não tivesse sensibilidade suficiente. A proteção de falha do banco primária incluía sobrecorrente direcional de sequência-negativa e sobretensão do banco, bem como a proteção baseada em corrente e tensão para detectar falhas de elementos e unidades, como mostrado na Figura 7.

O primeiro teste consistiu em simular a falha de um elemento na parte principal do banco e verificar se ela poderia ser detectada. A parte principal do banco é identificada como a parte apenas com capacitância, sem nenhum componente resistivo ou indutivo. A Figura 7a mostra os elementos de tensão e corrente resultantes do defeito. O traço superior representa a medição da corrente e o traço do meio representa a medição da tensão. Os traços inferiores mostram os *pickups* dos elementos do relé digital. Embora tenha havido um aumento da tensão diferencial, a variação de 25 mV na magnitude é apenas um pouco maior do que o ruído. O elemento de corrente, variando de 0 a 0.2 A, fornece um sinal muito melhor.

A falha de dois elementos, como esperado, mostra uma duplicação dos sinais operacionais, sem um aumento do ruído na medição da tensão (Figura 7b). Pode-se observar que o sinal de corrente (traço superior) é muito mais estável do que o sinal de tensão (traço inferior). O aumento da tensão é um pouco mais rápido do que o aumento da corrente, mas com a temporização do alarme normal de 5 a 10 segundos, isso não é significativo.

Finalmente, investigamos a falha de uma unidade completa. A Figura 7c mostra os resultados, exibindo a corrente de desbalanço gerada no traço superior e a tensão diferencial no traço inferior. Neste caso, o elemento de tensão tem um sinal de operação forte e sólido, com um aumento de tempo quase exatamente igual ao do elemento de corrente.

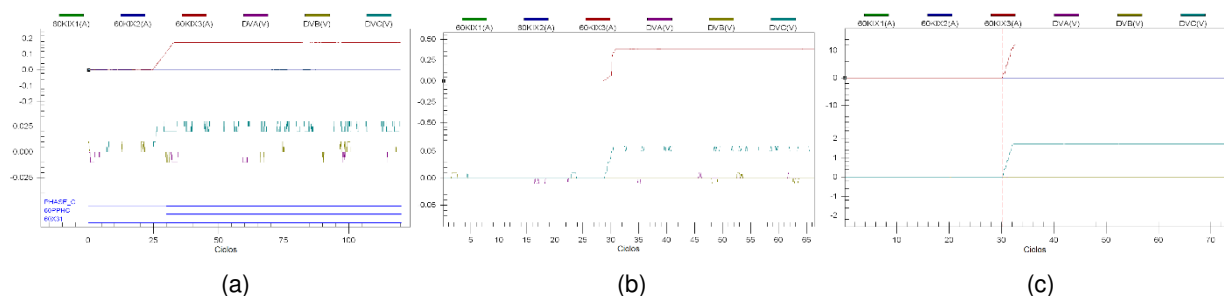


FIGURA 7 - (a) Falha de um único elemento (b) Falha em dois elementos (c) Falha da unidade

2.3 Banco com Filtro Tipo-C

A última proteção de banco testada foi um banco com filtro tipo-C. Neste caso, a construção é muito semelhante ao banco duplo-H da Figura 6, com diferentes resistores selecionados para a resposta de frequência desejada. O circuito é sintonizado de forma que a corrente fundamental possa fluir através dos capacitores enquanto as correntes harmônicas fluem através dos resistores. Parte da proteção era efetuada através de elementos de corrente nos resistores para proteger contra sobreaquecimento. Esta proteção era parte da proteção geral do banco, mas não foi incluída em nossos testes porque ela depende totalmente das tensões harmônicas presentes no local do banco (Figura 8). Este banco é um banco sem fusíveis, logo a falha de um único elemento tem como resultado o “jumper” de todos os elementos em paralelo com o elemento defeituoso. A proteção do banco real não usava proteção diferencial de tensão nas fileiras do meio (*mid strings*), mas apenas a proteção de balanço de corrente. Simulamos TPs das *mid strings* para analisar seu desempenho em comparação com a proteção baseada em corrente.

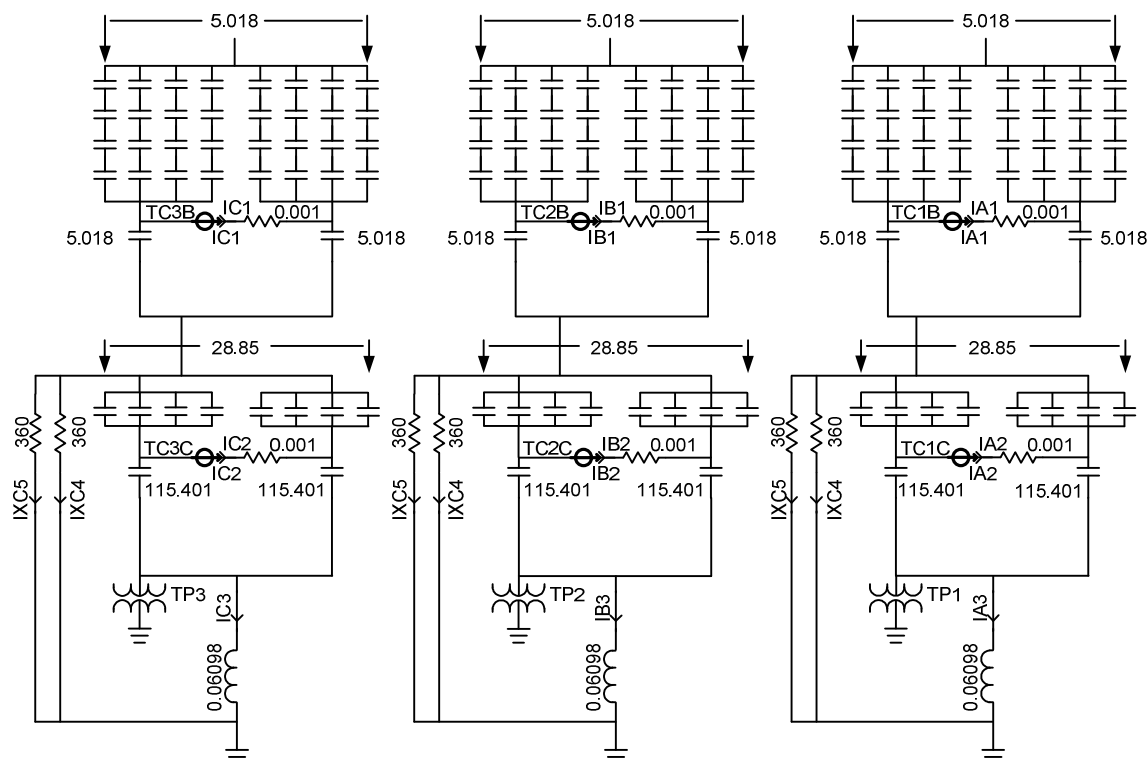


FIGURA 8 - Modelo do banco com filtro tipo-C (os números se referem aos valores de capacitores individuais aplicados nos testes de falha)

A proteção tem que detectar falhas na parte principal (Figura 9a) ou na parte de sintonia do banco (Figura 9b).

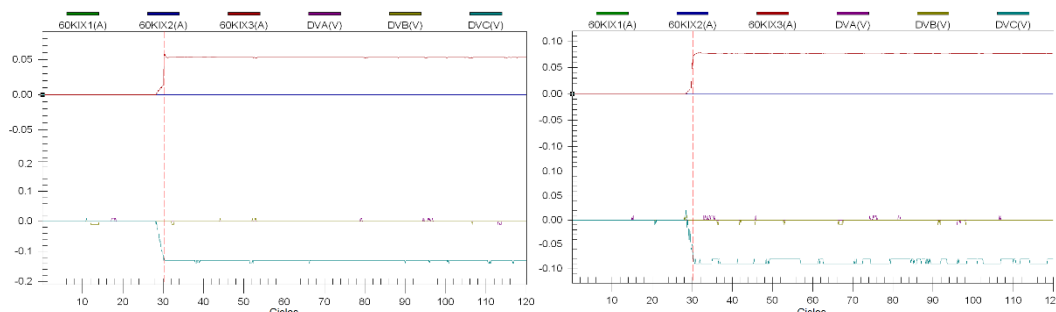


FIGURA 9 – (a) Falha de um único elemento na parte principal (b) Falha na parte de sintonia do banco

Como nos outros exemplos de bancos, há significativamente mais ruído na medição do diferencial de tensão do que no desbalanço de corrente. No caso de uma falha do elemento na parte de sintonia do banco, o elemento de tensão tem um pouco mais de ruído do que para uma falha na parte principal, mas ainda fornece boa

sensibilidade e retaguarda razoável para a proteção baseada na corrente. Como esperado, a falha de dois elementos fornece valores de medição duas vezes maior do que a falha de um elemento, sem aumento do ruído, resultando numa relação sinal-ruído muito melhor e numa característica de operação mais estável.

2.4 Localização do Elemento Defeituoso

Em um banco com fusíveis externos, é simples encontrar a unidade do capacitor com defeito. O fusível com mola atua indicando quando ocorre uma falha, requerendo apenas uma inspeção visual para encontrar o fusível defeituoso. Um banco com fusíveis internos ou sem fusíveis não fornece esta indicação. Os capacitores modernos, totalmente com filme, não estufam (devido à formação de gases internamente) quando ocorre uma falha. A pergunta então é: "Como encontrar a unidade com defeito quando ocorrer um alarme?" A localização do elemento defeituoso é indicada nas duas etapas seguintes:

- A identificação da fase é fornecida em cada um dos bancos trifásicos nesses exemplos. Se for utilizado um sistema de balanço de neutro, então não há nenhuma identificação. Os elementos de proteção individual, por fase, são os preferidos.
- Os elementos de tensão fornecem a indicação se o elemento defeituoso está acima ou abaixo do ponto de medição. Considere o gráfico de tensão mostrado na Figura 9, -0.1 V, e o da Fig. 10, $+0.05$ V. Isso identifica se a falha está acima ou abaixo do ponto de conexão do TP.

Em um banco duplo-H, com TPs e TCs em cada perna, o número de unidades a serem verificadas para um alarme será tão pequeno quanto 1/24 do número total de unidades de capacitores. Isso pode poupar horas ou dias de testes, dependendo do tamanho do banco.

2.5 Fatores Complicadores

As simulações efetuadas usaram bancos com capacitores equilibrados em cada perna. Esta é uma condição baseada no melhor caso, e os fatores do mundo real têm que ser considerados durante a avaliação e ajuste dos relés de proteção. Tudo aquilo que causar uma condição de desbalanço transitório ou em regime deve ser considerado. Os relés de proteção modernos fornecem, normalmente, uma lógica de compensação avançada para anular qualquer desequilíbrio permanente visando maximizar a sensibilidade dos elementos de desbalanço de corrente e diferencial de tensão.

2.5.1 Tolerância de Fabricação

As normas reconhecem que as tolerâncias de fabricação podem levar a uma variação na capacitância entre unidades individuais com os mesmos valores nominais [2]. Para atender às normas, a classificação tem que estar entre menos 0 e mais 10%. Os fabricantes de bancos de capacitores colocam, geralmente, unidades num banco para limitar o desbalanço a menos de 0.5% [3]. Desequilíbrios em regime deste porte podem ser zerados em um sistema de balanço de corrente ou tensão através do ajuste da compensação quando for conhecido (ou presumido) que todos os elementos ou unidades estão saudáveis. Observe que isso deve ser feito sempre que uma unidade for trocada porque a unidade de substituição pode ou não ter a mesma capacitância que a unidade substituída.

2.5.2 Impacto a Irradiação Solar

Um caso especial de desequilíbrio causado por diferenças na capacitância da unidade é provocado pelo sol brilhante atingindo um lado de um banco de capacitores e não o outro, como mostrado na Figura 10. Neste caso, vemos o sol brilhante atingindo o lado direito do banco, enquanto o lado esquerdo fica na sombra.



FIGURA 10 - Banco de capacitores com sol no lado direito

A mudança na capacitância provocada pelo aquecimento solar pode vir de três causas diferentes:

- o filme dielétrico (normalmente polipropileno) altera com a temperatura;
- alterações do fluido dielétrico (óleo mineral ou outro fluido) com a temperatura;
- o aquecimento do fluido dielétrico causa expansão, permeando melhor o filme.

O aquecimento solar varia de acordo com a localização, orientação do banco e outros fatores, tais como o vento ou equipamentos próximos. Um estudo mostrou uma variação de 10°C simplesmente a partir do fundo de um cubículo externo até o topo em um dia ensolarado [4]. Foram observadas operações de relés nos bancos de capacitores quando o sol nascente atinge um dos lados, causando o aquecimento.

A maneira tradicional de compensar o aquecimento desigual e o desequilíbrio que isso provoca consiste em aumentar os ajustes de *pickup*. Abordar com precisão as alterações transitórias na capacitância exige mais sofisticação do que a compensação para uma diferença fixa entre as fileiras ("strings") do banco. Uma entrada de temperatura, ou duas entradas, pode ser levada até o relé para alterar os grupos de ajustes ou aumentar os valores de *pickup*. O relé usa o valor da temperatura, ou a diferença de temperatura, para modificar os valores de *pickup*. Uma simples medição de temperatura acima de um valor limite pode ser usada para elevar os valores de *pickup*. Se forem fornecidas várias temperaturas, os ajustes podem ser alterados dinamicamente para compensar a mudança na capacitância de um lado do banco. Uma lógica pode ser implementada dentro do relé de proteção do capacitor para combinar as entradas de temperatura com valores de alarme, bloqueando os alarmes se o desbalanço variar lentamente. O desafio da detecção de alterações transitórias na impedância do banco de capacitor consiste em ter capacidade para distinguir com segurança entre uma falha real dentro do banco de capacitor e as condições transitórias descritas anteriormente. A lógica do relé pode distinguir entre mudanças súbitas devido a falhas de elementos e mudanças graduais devido a variações de temperatura ou mesmo envelhecimento da unidade.

Uma possível desvantagem de qualquer uma dessas possibilidades é que, dependendo da construção do banco, falhas podem começar pequenas, com um elemento falhando, seguidas de outra falha e outra falha. Experiências podem fornecer a melhor indicação para um determinado local.

3.0 - CONCLUSÃO

As diversas variações no projeto de um banco de capacitores significam que não existe uma solução única para proteção do banco. Os conceitos básicos da proteção de curto-circuito e detecção de falha do elemento permanecem inalterados, independentemente do projeto do banco. Reconhecemos que os diferentes tipos de proteção são úteis para diferentes condições. As lições aprendidas com esses testes de falha em bancos de capacitores complexos incluem o seguinte:

- A falha de até mesmo um único elemento pode ser geralmente detectada por elementos de proteção de tensão ou corrente, mesmo em bancos com fusíveis internos. A detecção confiável de falhas do elemento em bancos muito grandes pode requerer mais falhas porque a relação sinal-ruído pode impedir a detecção confiável de falhas de elementos individuais.
- As medições de corrente são geralmente mais sensíveis do que as medições de tensão para o desbalanço do banco de capacitor. As medições de corrente de nível baixo apresentam menos ruído do que as medições de tensão de nível baixo.
- Os elementos de proteção baseados na tensão são tão rápidos ou mais rápidos do que os elementos baseados em corrente, tornando-os adequados para proteção contra uma falha catastrófica.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M. Dhillon and D. Tziouvaras, "Protection of Fuseless Capacitor Banks Using Digital Relays," proceedings of the 26th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1999.
- (2) IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE 18-2002.
- (3) E. Price and R. Wolsey, "String Current Unbalance Protection and Faulted String Identification for Grounded-Wye Fuseless Capacitor Banks," proceedings of the 65th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, maio de 2011.
- (4) F. Gutierrez, R. Moxley, D. Kopczynski, and D. Holmes, "Relays in the Hot Box," proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 2005.