



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC 02
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

PROTEÇÃO ADAPTATIVA PARA GRANDES BANCOS DE CAPACITORES

Licínio Ribeiro de Miranda

GENERAL ELECTRIC

RESUMO

Este trabalho apresenta métodos que aprimoram a proteção de BCS e que tomam como base não apenas os desbalanços inerentes ao banco de capacitores mas, também, simultaneamente, os desbalanços do próprio sistema de potência, proporcionando aumento de sensibilidade e segurança para o sistema de proteção.

São considerados os seguintes métodos: Tensão Diferencial, Compensação do Desbalanço da Tensão de Neutro, Balanço da Corrente de Fase e Balanço da Corrente de Neutro.

As técnicas utilizadas pelos relés atuais desconsideram os desbalanços do sistema, ou assumem valores de compensação de desbalanços com base em dados históricos. Na maioria das vezes, estes dados históricos não refletem os valores reais, tornando a proteção demasiadamente sensível e sujeita a disparos indevidos, ou insensível, a ponto de não operar adequadamente para faltas internas. Adicionalmente, devido aos bancos serem formados por diversos elementos individuais de capacitor, não é rara a necessidade de remover ou curto-circuitar um ou mais elementos individuais e manter o banco em funcionamento, até o momento apropriado para uma manutenção mais abrangente. No período em que o banco opera com limitações, os ajustes originais da proteção já não condizem com as condições atuais do sistema. Se mantidos, os ajustes originais podem provocar operações indevidas. Se a sensibilidade for reduzida para acomodar as novas condições de desbalanço, podem comprometer a proteção de outros elementos individuais que, certamente, estarão trabalhando com percentuais de sobretensão causados pela remoção dos elementos danificados.

PALAVRAS-CHAVE

Capacitor, Proteção, Adaptativa, Auto-Ajuste, Auto-Sintonia

1.0 - INTRODUÇÃO

Banco de Capacitores Shunt (BCS) são utilizados para fornecer compensação reativa capacitiva e correção de fator de potência em sistemas elétricos. O uso de BCS tem sido intensificado, devido ao custo relativamente baixo, instalação rápida e alocação em qualquer ponto da rede. A utilização de BCS proporciona outros benefícios, tais como: melhor regulação de tensão, redução de perdas, redução ou adiamentos de investimentos na transmissão ou capacidade de geração e, ultimamente, na prevenção de apagões e de outras anomalias do sistema.

Os Bancos de Capacitores Shunt (BCS) são constituídos de vários elementos capacitivos individuais, agrupados em paralelo, e/ou em série, de forma a constituírem conjuntos capacitivos de várias tensões e capacidades, normalmente de 240V a 25kV, de 2.5kVAR a 1000kVAR.

Como regra geral, o número mínimo de unidades conectadas em paralelo deve ser tal que a isolação de uma unidade não cause um desbalanço de tensão maior que 110% da tensão nominal do grupo. Igualmente, o número mínimo de grupos conectados em série deve ser tal que, mediante o "bypass" de um grupo, as demais unidades

capacitivas não sofram uma sobretensão maior que 110% da máxima capacidade contínua prevista para aquelas unidades (IEEE 18-1992). A Norma também estabelece um limite máximo de energia que pode ser armazenada em grupos conectados em paralelo (4650 kVAr), a fim de minimizar riscos de explosão ou ruptura do invólucro do capacitor. Para não ultrapassar estes limites, a solução tem sido utilizar mais grupos de menor tensão nominal conectados em série. Entretanto, este arranjo reduz a sensibilidade quanto à detecção do desbalanço. O meio termo entre ambas as situações tem sido dividir o banco em duas seções, ou seja, arranjo dupla-estrela. Praticamente, os BCS de Alta e Extra Alta Tensão são conectados em estrela e alguns utilizam a configuração H com um transformador de corrente no elo de conexão, a fim de detectar o desbalanço entre as colunas do banco. A conexão de bancos em Delta é normalmente utilizada em sistemas de distribuição. Estes bancos são configurados com um grupo série de capacitores com tensão fase-fase.

O termo “**Proteção Adaptativa**” é aplicado neste trabalho com dois significados distintos: Auto-Ajuste e Auto-Sintonia.

Auto-Ajuste é o cálculo de novas constantes para o relé de proteção, com o propósito de reajustar os desbalanços inerentes ao banco de capacitores, mediante situações de falhas não-reparadas, retirada de um elemento capacitor, ou mediante outras condições de manutenção e reparo do banco. É utilizado por solicitação ou sob supervisão do usuário.

Auto-Sintonia é uma operação de auto-ajuste contínuo das constantes de compensação utilizadas pelo relé, de forma a otimizar a sensibilidade e estabilidade da proteção, quando de pequenas alterações que ocorrem lentamente nos valores das reatâncias dos capacitores, devido a variações sazonais de temperatura e várias outras alterações que passam despercebidas.

A denominação K_A , K_B , K_n ... é usada neste trabalho para representar o fator de compensação, ou seja, é o fator que deve ser inserido na equação de proteção de forma a torná-la adaptativa. Do ponto de vista prático, o fator “K” é um parâmetro de ajuste do relé, que pode ser inserido manualmente pelo usuário ou, automaticamente, pelo próprio relé.

Na figura abaixo, por exemplo, o valor de parametrização “XA/XB”, referenciado nas equações como fator “ K_{AB} ”, é calculado automaticamente pelo relé, quando da digitação dos dados dos capacitores.

Neste exemplo, o parâmetro Auto SET possui três opções:

- Disabled – os cálculos não são executados e a função permanece desabilitada;
- Manual – os cálculos são executados, apresentados e inseridos, se aprovados pelo usuário;
- Auto – os cálculos são executados e inseridos automaticamente, independente da aprovação do usuário.

Os parâmetros XA/XB e XA/XC possuem duas opções:

- Yes – os valores indicados em XA/XB RATIO são aplicados no algoritmo de cálculo da função,
- No – os valores indicados em XA/XB RATIO não são aplicados no algoritmo de cálculo da função.

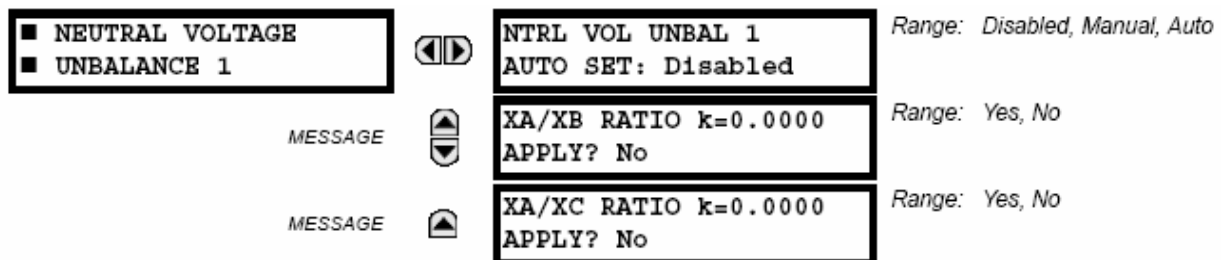


Figura 1 – Exemplo de Interface de Parametrização Usuário-Relé

2.0 - MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALTAS E PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES

2.1 Tensão Diferencial

Este método é baseado no princípio de divisão de tensão (veja fig. 2). Em condições normais, o banco possui uma relação de tensão constante entre a tensão de referência e a tensão auxiliar tomada de uma derivação entre os elementos, V1a e V2a, respectivamente.

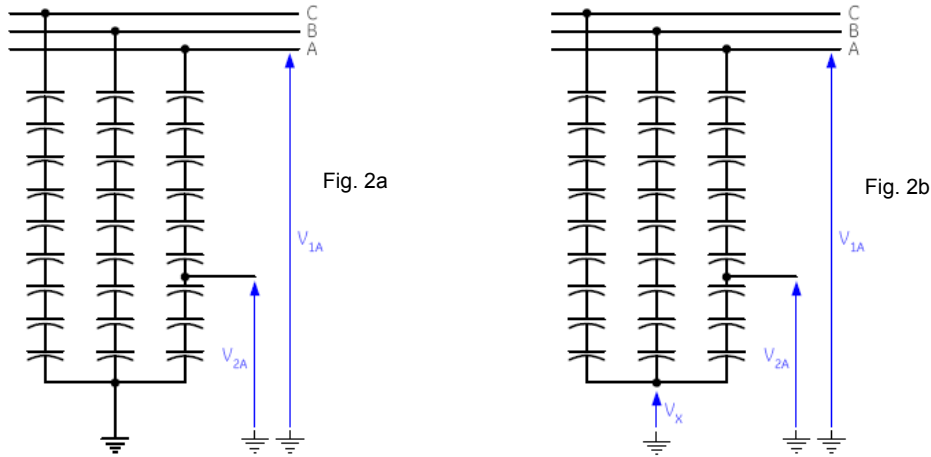


Figura 2 – Tensão Diferencial

Em princípio, este método pode ser usado em sistemas aterrados (Fig. 2a) e não aterrados (Fig. 2b). Em sistemas não aterrados, a tensão V_x também precisa ser medida pelo relé.

$$V_{OP(A)} = |V_{1A} - K_A \cdot V_{2A}| \quad \text{para bancos aterrados} \quad (1a)$$

$$V_{OP(A)} = |V_{1A} - K_A \cdot V_{2A} + V_x \cdot (K_A - 1)| \quad \text{para bancos não aterrados} \quad (1b)$$

ou, em valores secundários:

$$V_{OP(A)} = |V_{1A} - K_A \cdot \frac{n_{VT2}}{n_{VT1}} \cdot V_{2A}| \quad \text{para bancos aterrados} \quad (1c)$$

$$V_{OP(A)} = |V_{1A} - K_A \cdot \frac{n_{VT2}}{n_{VT1}} \cdot V_{2A} + V_x \cdot \frac{n_{VTX}}{n_{VT1}} \cdot (k_A - 1)| \quad \text{para bancos não aterrados} \quad (1d)$$

Onde:

n_{VT} é a relação de transformação dos TPs

k_A é a relação entre as tensões da fase A. As mesmas relações são aplicadas nas fases B e C.

k_A preferencialmente é escolhido de forma a satisfazer a condição de:

$$K_A \cdot \frac{n_{VT2}}{n_{VT1}} \approx 1 \quad (1e)$$

Se desconsiderados os erros de medição, K_A se torna igual a 1. Desta forma, a equação diferencial de tensão retorna à sua fórmula tradicional, ou seja:

$$V_{OP} = |V_{1A} - V_{2A}| \quad (1f)$$

k_A pode ser usado como fator de compensação para a proteção adaptativa, como Auto-Ajuste e/ou Auto-Sintonia, ou seja:

$$\dot{k}_A = \frac{V_{1A}}{V_{2A}} \quad (2)$$

Observar que as equações podem ser implementadas com fasores ou magnitudes.

Durante condições normais, ou sob pequenos desbalanços causados por diferenças entre os bancos, as tensões estarão praticamente em fase e as versões com fasores ou magnitudes trarão os mesmos resultados.

Os ajustes, entretanto, deverão levar em conta erros gerados pelos TPs de medição.

2.2 Compensação do Desbalanço de Tensão de Neutro (59NU)

Este método é utilizado em bancos não aterrados (veja fig. 3) e é baseado nas leis de Kirchhoff (lei dos nós - correntes) aplicadas no ponto de neutro do banco:

$$\frac{V_A - V_X}{Z_A} + \frac{V_B - V_X}{Z_B} + \frac{V_C - V_X}{Z_C} = 0 \quad (3a)$$

Colocando $-V_X$ em evidência, resulta: $-V_X \left(\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \right) + \frac{V_A}{Z_A} + \frac{V_B}{Z_B} + \frac{V_C}{Z_C} = 0$ (3b)

equivalente a: $-V_X \left(\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \right) + \frac{V_A}{Z_A} + \frac{V_B}{Z_A} + \frac{V_C}{Z_A} + \frac{V_B}{Z_B} - \frac{V_B}{Z_A} + \frac{V_C}{Z_C} - \frac{V_C}{Z_A} = 0$ (3c)

equivalente a:

$$-V_X \left(\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \right) + \frac{1}{Z_A} (V_A + V_B + V_C) + V_B \left(\frac{1}{Z_B} - \frac{1}{Z_A} \right) + V_C \left(\frac{1}{Z_C} - \frac{1}{Z_A} \right) = 0 \quad (3d)$$

Multiplicando ambos os lados por $-Z_A$ e substituindo o somatório das tensões por $3V_0$, resulta:

$$V_X \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} + \frac{Z_A}{Z_C} \right) - 3V_0 + V_B \left(1 - \frac{Z_A}{Z_B} \right) + V_C \left(1 - \frac{Z_A}{Z_C} \right) = 0 \quad (3e)$$

Definindo: $k_{AB} = \frac{Z_A}{Z_B} \approx \frac{X_A}{X_B}$ e $k_{AC} = \frac{Z_A}{Z_C} \approx \frac{X_A}{X_C}$ (4)

a equação de balanço de sinal pode ser escrita como:

$$V_{OP} = \frac{1}{3} (1 + k_{AB} + k_{AC}) V_X - 3V_0 + V_B (1 - k_{AB}) + V_C (1 - k_{AC}) \quad (5)$$

K_{AB} e K_{AC} podem ser usados como fator de compensação para a proteção adaptativa, como Auto-Ajuste e/ou Auto-Sintonia.

Observar que a equação 5 envolve fasores, não magnitudes. A função de proteção utiliza a soma vetorial das tensões implementadas neste método.

A relação das impedâncias do capacitor entre a fase A e as outras duas é muito próxima de 1. Conseqüentemente, os fatores de correção para as fases B e C são pequenos, enquanto que o coeficiente de V_X é próximo de 3.

Se o banco estiver perfeitamente balanceado ($K_{AB}=1$, $K_{AC}=1$), a equação 5 resulta em :

$$V_{OP} = |V_X - V_0| \quad (6)$$

A equação 5 identifica a fonte de desbalanço inerente ao banco e, assim, permite a compensação apropriada do desbalanço, bem como a análise do impacto causado pela compensação imperfeita e/ou erros causados pelos transformadores de instrumentos.

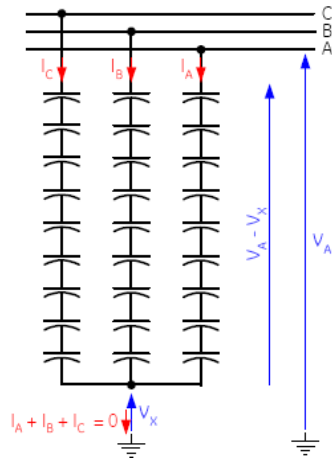


Figura 3 - Compensação de Sobretensão de Neutro

2.3 Balanço da Corrente de Fase (60P)

Este método é baseado no balanço das correntes de fase de dois bancos em paralelo e é aplicável em sistemas aterrados e não aterrados. As pequenas diferenças entre os bancos acabam por gerar uma corrente circulante

que necessita ser compensada, a fim de se obter maior sensibilidade da função de proteção. Esta função de proteção é fundada na seguinte teoria:

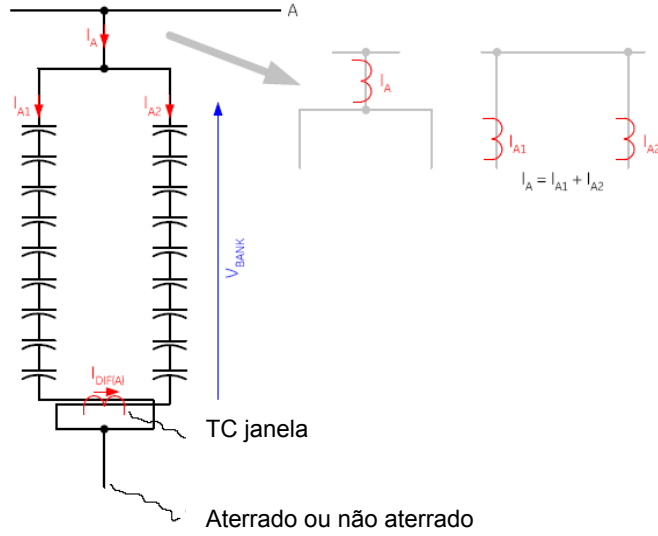


Figura 4 – Balanço de Corrente de Fase

$$I_{DIF(A)} = V_{Banco(A)} \cdot \frac{Z_{1A} - Z_{2A}}{Z_{1A} \cdot Z_{2A}} \text{ e, } I_A = V_{Banco(A)} \cdot \frac{Z_{1A} + Z_{2A}}{Z_{1A} \cdot Z_{2A}} \quad (9a), (9b)$$

Considerando que a tensão é a mesma para ambas as expressões:

$$V_{Banco(A)} = I_{DIF(A)} \cdot \frac{Z_{1A} \cdot Z_{2A}}{Z_{1A} - Z_{2A}} = I_A \cdot \frac{Z_{1A} \cdot Z_{2A}}{Z_{1A} + Z_{2A}} \Rightarrow \quad (9c)$$

$$I_{DIF(A)} \cdot \frac{Z_{1A} \cdot Z_{2A}}{Z_{1A} - Z_{2A}} - I_A \cdot \frac{Z_{1A} \cdot Z_{2A}}{Z_{1A} + Z_{2A}} = 0 \quad (9d)$$

Dividindo ambos os lados pelo coeficiente da corrente diferencial, resulta:

$$I_{DIF(A)} - I_A \cdot \frac{Z_{1A} - Z_{2A}}{Z_{1A} + Z_{2A}} = 0 \quad (9e)$$

$$\text{Definindo o fator } k_A \text{ (fator de compensação) como: } k_A = \frac{Z_{1A} - Z_{2A}}{Z_{1A} + Z_{2A}} \approx \frac{X_{1A} - X_{2A}}{X_{1A} + X_{2A}} \quad (10)$$

resulta na seguinte equação, a qual representa o sinal de operação da proteção de desbalanço de fase:

$$I_{OP(A)} = \left| I_{DIF(A)} - k_A \cdot I_A \right| \quad (11)$$

O sinal de operação (11) implementa a compensação do desbalanço inerente ao banco. A equação identifica que o erro é proporcional à intensidade total da corrente de fase (I_A) e à diferença de impedância entre os bancos (K_A). Quando a compensação é feita por meio da subtração da corrente diferencial baseada em dados históricos – prática usada atualmente – aumenta a sensibilidade da proteção. Porém, quando a corrente muda, por exemplo, no caso de uma falta externa próxima ao banco, a subtração de um dado histórico não proporciona a compensação apropriada para a proteção, podendo causar disparos indevidos.

Observar que a equação (11) representa a soma vetorial entre dois sinais. Entretanto, como o fator K é um número real com a parte imaginária muito próxima de zero, as duas correntes estão em fase e suas magnitudes, não fasores, podem ser usadas também.

2.4 Balanço da Corrente de Neutro (60N)

Esta função é baseada no balanço entre as correntes de interconexão de Neutro de dois bancos paralelos e é aplicável em sistemas aterrados e não aterrados. Normalmente, a medição vetorial de corrente diferencial é feita por um TC tipo janela posicionado entre os bancos (veja fig. 5).

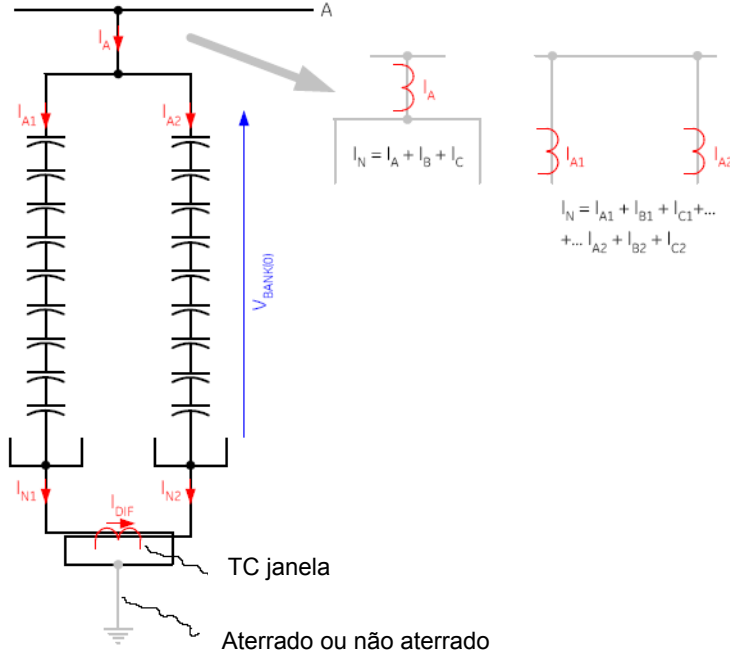


Figura 5 – Balanço de Corrente de Neutro

As pequenas diferenças entre os bancos acabam por gerar uma corrente circulante que necessita ser compensada, a fim de se obter maior sensibilidade da função de proteção. Esta função de proteção é fundada na seguinte teoria:

$$I_{A1} = (V_A - V_X) Y_{A1}; \quad I_{A2} = (V_A - V_X) Y_{A2} \quad (14a)$$

$$I_{B1} = (V_B - V_X) Y_{B1}; \quad I_{B2} = (V_B - V_X) Y_{B2} \quad (14b)$$

$$I_{C1} = (V_C - V_X) Y_{C1}; \quad I_{C2} = (V_C - V_X) Y_{C2} \quad (14c)$$

O somatório das duas correntes de Neutro pode ser escrito como:

$$I_{N1} = I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = (V_A - V_X) Y_{A1} + (V_B - V_X) Y_{B1} + (V_C - V_X) Y_{C1} \quad (14d)$$

$$I_{N2} = I_{A2} + I_{B2} + I_{C2} = (V_A - V_X) Y_{A2} + (V_B - V_X) Y_{B2} + (V_C - V_X) Y_{C2} \quad (14e)$$

A corrente diferencial é a diferença vetorial entre as duas correntes. Desta forma:

$$I_{\text{DIF}} = I_{N1} - I_{N2} = (V_A - V_X)(Y_{A1} - Y_{A2}) + (V_B - V_X)(Y_{B1} - Y_{B2}) + (V_C - V_X)(Y_{C1} - Y_{C2}) \quad (14f)$$

As correntes totais de cada fase são derivadas da admitância total dos dois bancos em cada fase:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} = (V_A - V_X) \cdot (Y_{A1} + Y_{A2}) \quad (15a)$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} = (V_B - V_X) \cdot (Y_{B1} + Y_{B2}) \quad (15b)$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = (V_C - V_X) \cdot (Y_{C1} + Y_{C2}) \quad (15c)$$

Inserindo a equação 15 na 14, pode-se eliminar as tensões e obter a equação de balanço de correntes para os dois bancos, como sendo:

$$I_{DIF} = I_A \cdot \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{Y_{A1} + Y_{A2}} + I_B \cdot \frac{Y_{B1} - Y_{B2}}{Y_{B1} + Y_{B2}} + I_C \cdot \frac{Y_{C1} - Y_{C2}}{Y_{C1} + Y_{C2}} \quad (16)$$

Definindo K_A , K_B e K_C como:

$$k_A = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{Y_{A1} + Y_{A2}}; \quad k_B = \frac{Y_{B1} - Y_{B2}}{Y_{B1} + Y_{B2}}; \quad k_C = \frac{Y_{C1} - Y_{C2}}{Y_{C1} + Y_{C2}} \quad (17)$$

Resulta:

$$I_{OP} = |I_{DIF} - (k_A \cdot I_A + k_B \cdot I_B + k_C \cdot I_C)| \quad (18)$$

Se os bancos forem considerados idênticos, a equação (18) é reduzida a uma equação de sobrecorrente para medição da corrente diferencial de neutro.

Alternativamente, a equação (18) pode ser reescrita em termos de componentes simétricas, ou seja:

$$I_{OP} = |I_{DIF} - (k_0 \cdot I_0 + k_1 \cdot I_1 + k_2 \cdot I_2)| \quad (19)$$

É justificável assumir que a componente de seq. positiva representa quantidades mais significativas se comparada com as de seq. negativa e zero. Desta forma, apenas a componente de seq. positiva pode ser considerada para aumentar a sensibilidade. Esta aproximação resulta em uma equação simplificada das equações (18) e (19), como:

$$I_{OP} = |I_{DIF} - k_1 \cdot I_1| \quad (20)$$

Com apenas um fator desconhecido (k_1), o auto-ajuste, ou ajuste adaptativo, pode ser implementado como:

$$\dot{k}_1 = \frac{I_{DIF}}{I_1}, \text{ sob condições normais de operação.} \quad (21)$$

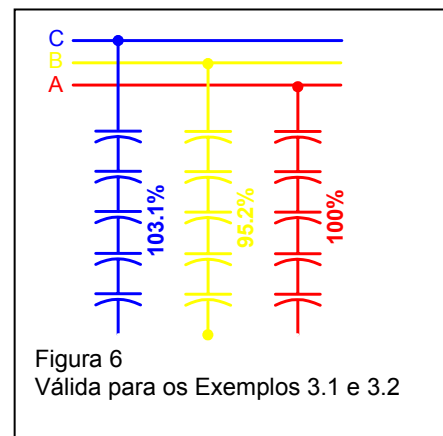
3 - EXEMPLO - COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO TRADICIONAL E O ADAPTATIVO

3.1 Exemplo 1 – Condições Normais de Operação

Desbalanço do Banco: $X_A/X_B = 1.05$; $X_A/X_C = 0.97$

Fase A	= 73.35V	$\angle -158.30^\circ$
Fase B	= 68.90V	$\angle +83.80^\circ$
Fase C	= 73.79V	$\angle -36.60^\circ$
Neutro	= 1.19V	$\angle +143.50^\circ$
3V0 Sistema	= 2.99V	$\angle -120.00^\circ$

O método tradicional calcula o valor de operação como sendo:



$$V_{OP} = \left| V_N - \frac{1}{3} V_X \right| = \left| 1.19 \angle +143.5^\circ - \frac{1}{3} (2.99 \angle -120.0^\circ) \right| = 1.64V$$

Para que a proteção não opere em condições normais, o valor de pick-up necessita ser ajustado acima de 1.64V.

No método proposto - Compensação do Desbalanço da Tensão de Neutro – o valor de operação é calculado como:

$$V_{OP} = \frac{1}{3} \left[(1 + 1.05 + 0.97) * 1.19 \angle 143.5^\circ - 2.99 \angle -120.0^\circ + 68.90 \angle 83.8^\circ * (1 - 1.05) + 73.79 \angle -36.6^\circ * (1 - 0.97) \right] = 0.0V$$

Conclusão: utilizando-se o método Compensação do Desbalanço, não é necessário dessensibilizar a função para acomodar as diferenças de reatâncias entre os bancos.

3.2 Exemplo 2 – Falta Externa Próxima ao Banco

Desbalanço do Banco: $X_A/X_B = 1.05$; $X_A/X_C = 0.97$

Fase A	= 3.23V	$\angle -100.0^\circ$
Fase B	= 130.3V	$\angle +137.1^\circ$
Fase C	= 58.2V	$\angle -153.7^\circ$
Neutro	= 54.5V	$\angle +156.8^\circ$
3V0 Sistema	= 159.8V	$\angle +158.0^\circ$

O método tradicional calcula o valor de operação como sendo:

$$V_{OP} = \left| V_N - \frac{1}{3} V_X \right| = \left| 54.5 \angle 156.8^\circ - \frac{1}{3} (159.8 \angle 158.0^\circ) \right| = 1.72V$$

Para que a proteção não opere durante uma falta externa, o valor de pick-up necessita ser ajustado acima de 1.72V.

No método proposto - Compensação do Desbalanço da Tensão de Neutro – o valor de operação é calculado como:

$$V_{OP} = \frac{1}{3} \left[(1 + 1.05 + 0.97) * 54.5 \angle 156.8^\circ - 159.8 \angle 158.8^\circ + 130.3 \angle 137.1^\circ * (1 - 1.05) + 58.2 \angle -153.7^\circ * (1 - 0.97) \right] = 0.0V$$

O método Compensação do Desbalanço mantém a equação balanceada e, conseqüentemente, a proteção permanece estável também para faltas externas, sem a necessidade de dessensibilizar a função para acomodar as diferenças de reatâncias entre os bancos.

4 CONCLUSÃO

Os métodos apresentados neste trabalho fornecem equações que permitem compensar, dinamicamente, desbalanços inerentes aos bancos de capacitores e ao sistema de potência. O exato balanceamento das equações proporciona meios de se estabelecer ajustes precisos, manuais ou automáticos, otimizando a sensibilidade para faltas internas e aumentando a estabilidade das proteções, mediante várias circunstâncias operativas, tais como: condição normal de operação, sob faltas externas próximas ao banco, alteração das características do banco de capacitores devido à remoção, curto-circuito ou reparo das unidades individuais de capacitor, alterações sazonais e de temperatura.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE Std. C37.99-2000: - Guide for Protection of Shunt Capacitor Banks, June 2000
- (2) Capacitor Bank Protection and Control Relay, Instruction Manual, General Electric, Publication, 2006
- (3) Kaszteny B., Brunello G., Wester C.: "Capacitor Bank Fundamentals and Protection", April, 2003
- (4) Kaszteny B., Brunello G., Clark E., Fundamentals of Adaptive Protection of Large Capacitor Banks