



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

GSE 07
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

MONITORAMENTO ON-LINE DE COMPENSADORES SÉRIE DA SUBESTAÇÃO DA ELETRONORTE DE MIRACEMA-TO EM 500KV UTILIZANDO REDES NEURAIS

Ubiratan Holanda Bezerra*
UFPA

Raimundo Nonato M. Machado
CEFETPA.

João Paulo Abreu Vieira
UFPA

Marcus Vinicius Alves Nunes
UFPA

Manoel Ribeiro Filho
UFPA

Walter Brum de Paula
ELETRONORTE

Meireluci Martins Rocha
UFPA

Fábio Sobral Magalhães
UFPA

RESUMO

Este artigo apresenta a concepção e o desenvolvimento de um sensor virtual para o monitoramento em tempo real da operação do compensador série da subestação de Miracema –TO do sistema interligado Norte-Sul I, com o objetivo de detectar indicações de falhas nos arranjos capacitivos do compensador, de modo a permitir que sejam implementadas ações de manutenção preditiva que poderão evitar que as unidades capacitivas operem em situações de risco. Em alguns casos essas situações de risco poderão evoluir para a queima de unidades capacitivas, provocando o desligamento do compensador pela atuação do sistema de proteção. A operação contínua do banco de capacitores série provoca o aquecimento das células capacitivas que se reflete na alteração do valor das capacitâncias dessas células. A alteração das capacitâncias provoca a circulação de uma corrente de desequilíbrio no arranjo capacitivo por fase, cujo valor e sinal, positivo ou negativo, associado ao cálculo da queda de tensão nos arranjos capacitivos, poderão ser utilizados para a detecção do conjunto de células com indicação de defeito incipiente. O sensor virtual aqui proposto é formado por rotinas computacionais que representam o modelo matemático dos arranjos capacitivos em termos de circuitos elétricos equivalentes, sendo este modelo alimentado em tempo real por valores de tensão e corrente adquiridos pelo sistema de medição. A partir dos dados de tempo real o sensor avalia, por meio de um modelo neural do tipo PNN – Probabilistic Neural Network, o risco de falha e identifica o arranjo capacitivo mais provável para falhar. Os resultados de simulação apresentados neste trabalho indicam que o sensor virtual tem um grande potencial para o uso no sistema real, o que deverá ser implementado em breve.

PALAVRAS-CHAVE

Compensadores Séries, Linhas de Transmissão, Redes Neurais.

1.0 - INTRODUÇÃO

O monitoramento das células capacitivas dos compensadores série apresenta-se hoje como uma necessidade prioritária na garantia da confiabilidade operacional do sistema interligado Norte Sul I. Em um histórico recente (2004), a Eletronorte indisponibilizou um banco de compensadores série variável devido a um incêndio nos capacitores de uma das fases. Este incêndio ocorreu em função de um superaquecimento das células capacitivas, o que contribuiu para a modificação das características construtivas das células, alterando a capacitância das mesmas. Assim, a avaliação on-line de cada um dos quatro grupos de 30 capacitores que compõem as 120 células em cada uma das três fases da linha de transmissão torna-se um fator necessário, tanto para a segurança do sistema elétrico interligado, quanto para a garantia da confiabilidade e estabilidade da operação do mesmo. Com a contínua monitoração da tensão e corrente dos arranjos capacitivos, é possível prever uma situação de risco que pode resultar na indisponibilidade do compensador série, com possibilidade de perda total ou parcial do

mesmo. É importante destacar ainda que o custo de um compensador série é bastante elevado e muitas vezes as concessionárias não fazem seguros para os mesmos, desestimuladas pelos valores das apólices. A aquisição dos compensadores séries no projeto Norte-Sul I pela Eletronorte foi avaliado em US\$ 143 milhões (cento e quarenta e três milhões de dólares), o que representa um grande investimento, justificando-se o desenvolvimento de sistemas de monitoramento específicos para evitar indisponibilidades desses equipamentos.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram levantadas as possibilidades da ocorrência de defeitos, pela variação da capacitância, em cada grupo de 30 células. Dessa forma, consideradas as varias possibilidades de combinações de defeitos, e o conseqüente cálculo das capacitâncias equivalentes para os grupos de 30 células correspondentes a cada defeito, essas capacitâncias são usadas para o cálculo das tensões em cada grupo e o cálculo da corrente de desequilíbrio do banco de capacitores. As tensões calculadas nos grupos de 30 células e a corrente de desequilíbrio medida são utilizadas como padrões para a identificação do grupo de 30 células com indicação de um possível defeito. Os resultados provenientes deste cálculo de tensões em cada grupo de 30 células e a corrente de desbalanço serão utilizados no treinamento da Rede Neural PNN, a qual será aplicada, em tempo real, no monitoramento de cada um dos grupos de 30 capacitores para a avaliação de anormalidades que se refletem em variações de temperatura, corrente e tensão.

A proposta apresentada neste artigo tem um caráter de ineditismo, pois o que está sendo desenvolvido através do projeto de P&D com a Eletronorte é um sistema de suporte à tomada de decisões que auxiliará as equipes de operação e manutenção das subestações em termos da manutenção preditiva das células, com relação aos aspectos de aquecimento das mesmas. O resultado positivo será a redução dos custos com a manutenção dos capacitores, o aumento da confiabilidade do sistema elétrico, além do caráter tecnológico inovador da proposta aqui apresentada, baseada no desenvolvimento de um sensor virtual com suporte em inteligência computacional para detecção e identificação dos grupos de 30 capacitores com indicação de falhas. A partir destes resultados, as equipes de operação e manutenção poderão tomar as ações preventivas necessárias.

2.0 - COMPENSAÇÃO SÉRIE

Geralmente as grandes estações geradoras localizam-se geograficamente muito distantes dos centros consumidores. Dessa forma, há necessidade de se ter um sistema de transmissão eficiente para transportar grandes blocos de energia. Estudos técnico-econômicos demonstram que o uso da compensação série em linhas de transmissão é uma alternativa bastante vantajosa em relação à adição de novas linhas de transmissão, compensadores síncrono-estáticos e transmissão em corrente contínua.

Durante a década de 50, na Suécia, surgiu à primeira aplicação de compensação série convencional em linhas de alta tensão, em um circuito de 245 kV. Já a primeira aplicação de compensação série controlada (TCSC) ocorreu na década de 90 nos Estados Unidos [1]. Hoje a compensação série tem sido largamente utilizada em diversos países nos mais variados níveis de tensão.

A compensação série vem sendo usada com bastante eficiência em sistemas elétricos, visando o aumento da capacidade das linhas de transmissão, expansão da região de estabilidade do sistema e até mesmo da melhoria na qualidade da tensão. Além disso, ela propicia uma melhor distribuição do fluxo de potência nas linhas de transmissão do sistema. Outra característica peculiar da compensação série é a capacidade de amortecimento das oscilações do sistema [1].

Os capacitores são conectados em série com a linha de transmissão visando diminuir a reatância entre a fonte e a carga, sendo um dos seus benefícios o aumento da potência que pode ser transmitida pela linha sem perda de estabilidade. Observa-se ainda que com o uso da compensação série, a redução da corrente de linha é baixa. Porém, caso esta corrente esteja restrita por questões de limites térmicos, não é possível obter a vantagem ímpar da compensação série, que é o aumento da capacidade de transmissão. Assim, uma das principais características desse tipo de compensação reside no fato de que a potência reativa gerada aumenta proporcionalmente com o quadrado da corrente, ou seja, durante o período de carga pesada a geração de reativos ($I^2 X_c$) pode compensar o alto consumo da linha de transmissão ($I^2 X_l$). Devido a isto, a compensação série torna-se mais vantajosa em relação à compensação em derivação, que pode ser considerada uma regulação automática da tensão [2].

3.0 - DESCRIÇÃO DO COMPENSADOR SÉRIE DA SUBESTAÇÃO DE MIRACEMA-TO

O banco de capacitores é um conjunto de células capacitivas com ligações série-paralelo, com fusível interno individual e resistor de descarga, que trabalham conectadas em série com a linha de transmissão. Assim, toda a corrente de carga de linha passa também pelos capacitores. Os bancos de capacitores série utilizados na linha de transmissão extra-alta tensão, são projetados como bancos monofásicos instalados em plataformas. Estas por sua vez são ligadas ao potencial das linhas de transmissão, sendo necessário que elas sejam isoladas do nível de terra.

Os custos destes bancos aumentam, na mesma proporção do quadrado da corrente, por isso não é econômico projetar bancos de capacitores baseados na ocorrência do pior caso de falha do sistema de potência. Portanto, é preciso prover o banco com um sistema que o proteja, de modo a limitar os esforços sobre ele durante a

ocorrência de falhas no sistema ou em condições de carga não esperada. A potência reativa dos bancos de capacitores atualmente varia entre aproximadamente 100 Mvar até mais de 1000 Mvar. Em aplicações reais, a tensão do sistema está em torno de 100 kV e 750 kV [1].

A subestação de Miracema, em Tocantins, conta hoje com banco de capacitores fabricados pela IESA e sistema de proteção da ABB. Esta subestação localiza-se em uma das linhas de transmissão de 500 kV que interliga Miracema a Colinas-GO, em aproximadamente 173 km de extensão. O banco é composto por capacitores de potência monofásicos, tipo MRH-350 Kvar /8.660V/60Hz, e a capacitância nominal de uma unidade capacitiva do banco está em torno de aproximadamente $93 \mu\text{F}$ e a capacitância de cada grupo próximo de $111.6 \mu\text{F}$ [3]. Além disso, as unidades capacitivas estão protegidas por fusíveis internos, que não permitem a inutilização da célula caso um elemento capacitivo venha sofrer uma interrupção, tornando mais seguro o sistema de compensação. Na figura 1 é apresentada uma ilustração de parte do banco de capacitores, contendo um bloco de 30 unidades capacitivas.



Figura 1 – Vista Parcial do Banco de capacitores do compensador série da SE Miracema –TO, da ELETRONORTE

O sistema de proteção de desbalanço do compensador atua contra sobre-tensão e detecta assimetria nos bancos de capacitores devido à queima de fusíveis. A proteção também detecta curtos-circuitos que são causados por centelhamentos através das buchas (isolador de porcelana) ou entre as unidades capacitivas. A proteção de desbalanço deriva-se do coeficiente entre a corrente de desbalanço e a corrente da linha. A corrente de desbalanço é medida na ponte entre as conexões dos grupos de 30 células como mostrado na figura 2 a seguir.

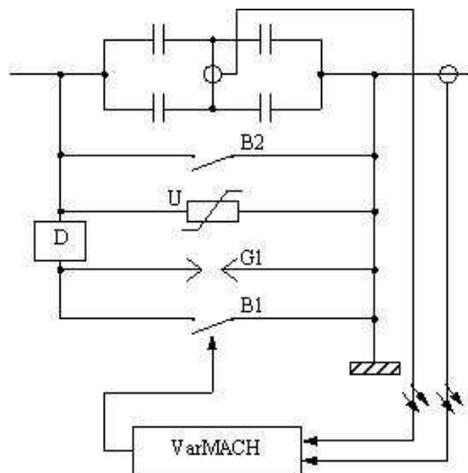


Figura 2. Diagrama do Esquema de Proteção de Desbalanço do Compensador Série

A proteção de desbalanço possui três níveis de operação: um nível de alarme, um nível de baixa corrente, e um nível de alta corrente de operação para By-Pass, todos com tempos de atrasos Independentes. Quando uma condição de desbalanço é detectada as seguintes ações são executadas pela proteção de desbalanço:

- ❖ Alarme da fase onde ocorreu o defeito, após uma condição de desbalanço, causado pelo By-Pass. Detectado pela proteção de desbalanço esta efetuará as seguintes ações:
 - Fechamento Trifásico do Disjuntor de By-Pass B1
 - Bloqueio Definitivo

- Alarme da fase onde ocorreu o defeito

O desbalanço no capacitor é causado por uma falha em uma das unidades capacitivas. O banco de capacitores pode não ser reinserido antes que a falha seja reparada, pois é necessário fazer a inspeção no compensador, para identificar a célula com defeito.

4.0 - REDE NEURAL PROBABILÍSTICA.

Uma rede neural probabilística (“*Probabilistic Neural Network*” - PNN) é basicamente um classificador Bayesiano implementado em paralelo. A PNN, como descrita por [4], é baseada na estimação de funções densidade de probabilidade para as varias classes estabelecidas pelos padrões de treinamento. Um diagrama esquemático para uma PNN é mostrado na Figura.3. A camada de entrada é responsável pela conexão do padrão de entrada X para a camada de bases radiais. $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]$, é uma matriz contendo os M vetores a serem classificados.

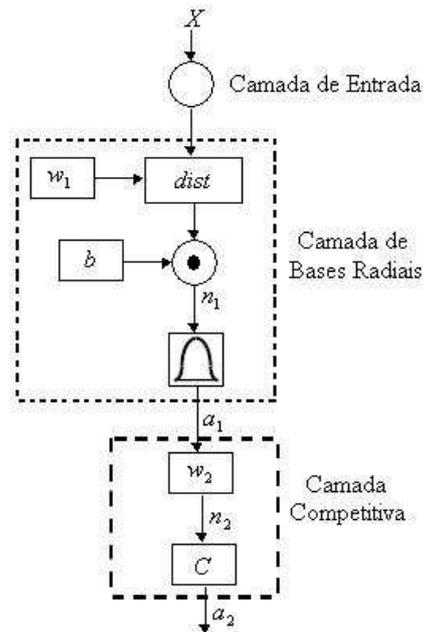


Figura 3. Diagrama esquemático de uma rede PNN.

Na camada de bases radiais os vetores de treinamento são armazenados em uma matriz pesos, w_1 . Quando um novo padrão é apresentado à entrada, o bloco $dist$ calcula a distancia euclidiana entre cada vetor do padrão de entrada para cada um dos vetores pesos armazenados. O vetor na saída do bloco $dist$ é multiplicado, ponto a ponto, por um fator de polarização, b , o qual define a sensibilidade do neurônio, sendo

$$b = \sqrt{-\frac{\log 0.5}{\mu}} \quad (1)$$

sendo μ um parâmetro de sensibilidade definido pelo usuário [5]. O resultado dessa multiplicação, n_1 é aplicado a uma função de base radial fornecendo como saída a_1 obtida através de

$$a_1 = e^{n_1^2} \quad (2)$$

Então, um vetor no padrão de entrada próximo a um vetor de treinamento é representado por um valor próximo de 1 no vetor de saída a_1 . Na camada competitiva a matriz de pesos w_2 contém os vetores alvos representando cada uma das classes correspondendo a cada vetor no padrão de treinamento. Cada vetor em w_2 tem um 1 somente na linha associada a uma classe em particular e 0 nas demais posições. A multiplicação $w_2 a_1$ soma os elementos de a_1 correspondentes a cada uma das classes, fornecendo a saída n_2 . Finalmente o bloco C

fornece na saída a_2 um 1 correspondendo ao maior elemento de n_2 e 0 para os outros valores. Assim, a rede classifica cada vetor do padrão de entrada em uma classe específica, pois aquela tem a máxima probabilidade de estar correta. A Principal vantagem da PNN está em seu fácil e direto projeto, e não depender de treinamento.

5.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para efeito de identificação cada grupo de 30 células foi designado por G1, G2, G3, G4, como mostrado na figura 4. As simulações foram realizadas considerando tensão e carga nominais do sistema. O procedimento aqui utilizado para a discriminação do grupo defeituoso baseia-se na corrente de desequilíbrio medida pelo sensor resistivo, e nas quedas de tensão em cada um dos grupos de 30 células. A circulação de corrente de desequilíbrio no sentido de V1 para V2 é tomado como positivo. As quedas de tensão nos grupos de 30 células são calculadas tomando-se os valores rms da tensão de entrada V_e , e da tensão de saída V_s , obtendo-se as quedas em relação às tensões V1 e V2. Os resultados obtidos mostraram que a fase da corrente de desequilíbrio pode indicar defeitos em dois dos quatro grupos, ou seja, grupos G1 ou G4 quando este sinal é positivo,, e grupos G2 ou G3 quando é negativo.. A tabela 1 mostra o sinal da fase da corrente de desequilíbrio para defeitos em cada grupo, considerando-se como referência a fase da corrente total do banco.

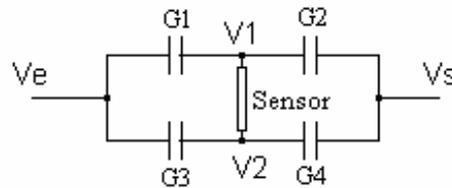


FIGURA 4 – Identificação dos grupos de 30 células componentes do banco.

Tabela 1 – Sinal da fase da corrente de desequilíbrio.

Grupo com defeito	Sinal da fase
G1	+
G2	-
G3	-
G4	+

Para a identificação do grupo defeituoso foram considerados os valores das tensões em cada grupo de 30 células. Esses valores foram normalizados em relação à tensão total do banco para se obter os padrões de treinamento da rede PNN. Assim, na ausência de defeitos a tensão em cada grupo é 0,5 em relação à tensão total do banco devido à simetria existente. A tabela 2 mostra o padrão de tensão obtido para defeitos no grupo G1. A primeira linha da tabela são os valores na ausência de defeitos e as linhas de 2 a 5 representam os valores para variações de 10% na capacitância de uma célula no grupo G1.

Tabela 2 – Valores da tensão em relação à tensão total do banco para defeitos no grupo G1.

Tensão em G1	Tensão em G2	Tensão em G3	Tensão em G4
0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
0.5005	0.4995	0.5004	0.4996
0.5007	0.4993	0.5006	0.4994
0.5009	0.4991	0.5009	0.4991
0.5012	0.4988	0.5011	0.4989

A rede PNN usada para classificação considera uma estrutura com 5 classes:

- Classe 1: defeito no grupo G1.
- Classe 2: defeito no grupo G2.
- Classe 3: defeito no grupo G3.
- Classe 4: defeito no grupo G4.
- Classe 5: normal ou sem defeito.

A matriz de pesos w_1 é composta de 20 vetores, sendo 4 por classe, cada um com as tensões de cada grupo, para cada tipo de defeito considerado, tendo dimensão 4x20. A matriz de pesos w_2 contendo a especificação das classes tem dimensão 20x5.

Para efeito de validação foram simulados vários padrões considerando situações relativas a cada uma das classes. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da rede em classificar corretamente todos os defeitos simulados nos diversos grupos. Como ilustração apresenta-se os resultados obtidos para a simulação de defeito

no grupo 1. O padrão de entrada para a rede PNN, correspondente ao defeito no grupo 1, considerando variação de capacitância de 10% é dado pelo vetor:

$$x = [0.5008 \quad 0.4992 \quad 0.5008 \quad 0.4992]^T$$

A partir desse padrão a rede apresentou como saída o vetor a1:

$$a1 = [3.8836 \quad 1.4930 \quad 3.8836 \quad 1.4930 \quad 3.0966]^T$$

Observa-se que são apresentados dois valores máximos iguais. Dessa forma o defeito poderá ser no Grupo 1 ou no Grupo 3. Essa ambigüidade é eliminada considerando-se o sinal da corrente de desequilíbrio. Esta operação também é realizada pela rede PNN, multiplicando o valor de a1 por uma matriz identidade modificada de acordo com o sinal da corrente. Para isto, a saída n_2 da rede é multiplicada por uma matriz identidade, 5x5, onde são adicionados zeros nas posições (1,1) e (4,4) se o sinal da fase é negativo, ou nas posições (2,2) e (3,3) se o sinal da fase é positivo, eliminando-se assim a ambigüidade de classificação. Para o caso exemplo, apresenta-se a seguir, a matriz e a saída modificada a2 da rede PNN, contendo a classificação correta. Observa-se no vetor a2 que é retido o valor máximo correspondente a classe 1, ou seja defeito no Grupo 1.

$$s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$a2 = [3.8836 \quad 0 \quad 0 \quad 1.4930 \quad 3.0966]^T$$

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta para a monitoração on-line do banco de capacitores do compensador série da SE Miracema, visando a identificação de defeitos incipientes nos grupos de capacitores que compõem o banco. A estratégia de monitoramento foi baseada nas medidas de corrente de desequilíbrio e quedas de tensão nos grupos capacitivos, que alimentam uma rede neural PNN, a qual realiza a identificação do grupo com indicação de falha incipiente.

Esta estratégia permite que os operadores do sistema possam acompanhar a evolução das condições operativas do banco de capacitores, e tenham de forma antecipada a indicação de possíveis falhas nos arranjos capacitivos, permitindo desse modo a verificação em campo e a manutenção preditiva antes que a unidade falhe. Os estudos de simulação conduzidos para a implementação do sensor virtual demonstraram que o mesmo é capaz de discriminar os defeitos nos grupos, o que representa uma indicação sólida para a sua implementação no sistema real, o que será realizado com a conclusão do projeto de P&D ora em desenvolvimento pela Universidade Federal do Pará, para a ELETRONORTE.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Paixão, R. L. D.; A compensação série chaveada como solução para o problema do colapso transitório de tensão na interligação Norte-Nordeste, 2006., Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade de Brasília, DF
- (2) Ramos, Dorel Soares; Dias, Eduardo Mário.; Sistemas Elétricos de Potência em Regime Permanente. Volume 2. Rio de Janeiro, 1983.
- (3) Capacitores de potência de média tensão MRH. Manual de fabricantes IESA, INEPAR.
- (4) Specht, D.F.; Probabilistic neural networks for classification, mapping, or associative memory. Neural Networks, 1988., IEEE International Conference on 24-27 July 1988 Page(s):525 - 532 vol.1
- (5) Gerbec, D.; Gasperic, S.; Smon, I.; Gubina, F.; Allocation of the Load Profiles to Consumers Using Probabilistic Neural Networks Power Systems, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 2, May 2005 Page(s):548 – 555

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ubiratan Holanda Bezerra

Nascido em Fortaleza-CE em 23 de outubro de 1950

Doutorado (1988), COPPE-UFRJ-RJ, Mestrado (1980), UNIFEI-MG, e Graduação (1976), UFPA-PA

Universidade Federal do Pará – UFPA

Professor

Raimundo Nonato das Mercês Machado

Nascido em Belém-PA em 16 de setembro de 1952

Doutorado (2006), Mestrado (1999), e Graduação (1976), UFPA-PA

Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará -- CEFETPA

Professor

João Paulo Abreu Vieira

Nascido em Macapá-AP em 09 de julho de 1980

Mestrado (2006) e Graduação (1980) em Engenharia Elétrica: UFPA

Professor da Universidade Federal do Pará - UFPA, desde 2006

Manoel Ribeiro Filho

Nascido em Imperatriz, Maranhão, em 12 de fevereiro de 1956

Graduação em Engenharia Elétrica UFPA (1979), Mestrado(1991) e

Doutorado (2002) no Programa de Pós_Graduação em Engenharia Elétrica (UFPA)

Áreas de Atuação: Realidade Virtual, Jogos Eletrônicos, Métodos dos Elementos Finitos

Coordenador do Curso de Engenharia da Computação - UFPA

Luis Fábio Sobral Magalhães

Nascido em Belém, PA, em 26 de janeiro de 1978.

Graduação (1998) : CESUPA-PA em Tecnologia em Processamento de Dados.

Empresas: Conecta Informática(PE)/Banpará - (1999-2000)

Programador Junior

Empresas: DIEBOLD PROCOMP(SP)/Banpará - (2001- 01/2005)

Analista de Sistemas

Empresas: Foton Informática(DF)/Banpará - Desde 02/2005

Analista de Sistemas