

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MÚLTIPLOS COMPENSADORES ESTÁTICOS EM SISTEMAS RADIAIS FORTEMENTE CARREGADOS CONSIDERANDO A PRESENÇA DE CARGAS DINAMICAMENTE ATIVAS

Álvaro José Pessoa Ramos
CHESF

Eduardo Fontana
UFPE

Manfredo Correia Lima*
CHESF

* Rua Delmiro Gouveia, 333, Anexo II, Bongi, Recife, PE
Fone: 081-4451011, Ramais 2607-2189, Fax 081-2510551
E-mail: mvbclima@elogica.com.br

Resumo: O controle da tensão em sistemas radiais fortemente carregados, como o subsistema Norte da CHESF, requer medidas específicas, tais como o emprego de múltiplos compensadores estáticos (CE). Os problemas intrínsecos a este sistema tornam-se mais críticos devido à presença de elevada parcela de cargas dinamicamente ativas na subestação (SE) Fortaleza. Visando a introdução de melhorias na qualidade da energia fornecida, foram efetuados estudos de transitórios eletromagnéticos com o ATP, considerando representação detalhada dos CE e da carga da SE Fortaleza, cuja parcela dinamicamente ativa foi modelada por motores de indução. Os resultados obtidos são descritos no presente artigo.

Palavras chave: compensador estático (CE), sistema radial, sistema de controle, modelagem da carga

Abstract: Voltage control in heavily loaded radial systems, as CHESF North transmission system, requires special actions, as the use of multiple static VAr compensators (SVC). The intrinsic problems of this system become more critical due to the presence of a high amount of dynamically active loads in Fortaleza substation. In order to get improvements on power quality, there were performed electromagnetic transient studies using ATP, considering a detailed modeling of SVC and Fortaleza load, which dynamically active part is represented by induction motors. The simulation results are described in this paper.

Key words: static VAr compensator (SVC), radial system, load modeling, induction motor

1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda por maiores níveis de qualidade de energia e as restrições de investimentos de transmissão impostas ao setor elétrico requerem que sejam considerados efeitos há até pouco tempo atrás desprezados, tais como a influência da presença de cargas dinamicamente ativas durante e na eliminação de defeitos no sistema elétrico. As SE Milagres e Fortaleza localizam-se no subsistema Norte da CHESF, composto por cerca de 700km de linhas de transmissão em 230kV e características predominantemente radiais (Figura 1-2). Os compensadores estáticos de Milagres e Fortaleza possuem nominais de respectivamente 70MVar indutivo a 100MVar capacitivo e 140MVar indutivo a 200MVar capacitivo e estão conectados às barras de 230kV das SE de mesmo nome (Figura 1-1).

2.0 - OBJETIVOS

O desenvolvimento de modelo para CE no ATP (Alternative Transient Program), contemplando representação detalhada dos equipamentos de potência, e do sistema de controle através da subrotina TACS e os resultados obtidos ao se comparar simulações efetuadas com este modelo com aquelas

realizadas em TNA (Transient Network Analyser) [1] ratificaram a viabilidade do emprego de simulações digitais para realização de estudos de transitórios eletromagnéticos, considerando a operação de múltiplos CE, com custo bastante inferior àqueles realizados em TNA. Por outro lado, o comportamento peculiar da carga da SE Fortaleza, que requer alguns segundos para se recuperar após a eliminação de defeitos, sugere a forte presença nesta SE de cargas dinamicamente ativas.

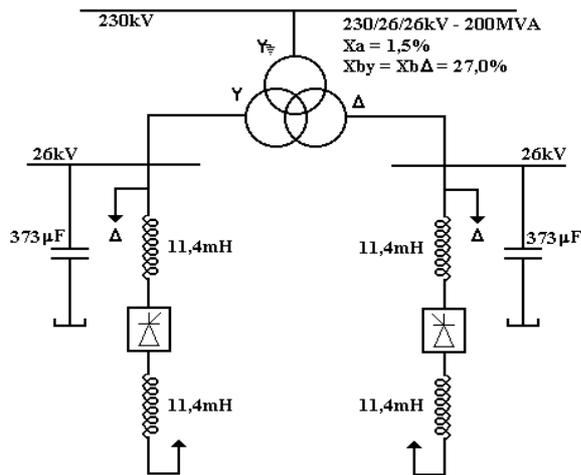


Figura 1-1 - Compensador Estático de Fortaleza
 Para analisar a influência destas cargas no desempenho dos CE e definir eventuais mudanças de projeto necessárias ao seu adequado desempenho, amenizando os efeitos de defeitos sobre a rede elétrica, foram realizados os estudos descritos neste artigo.

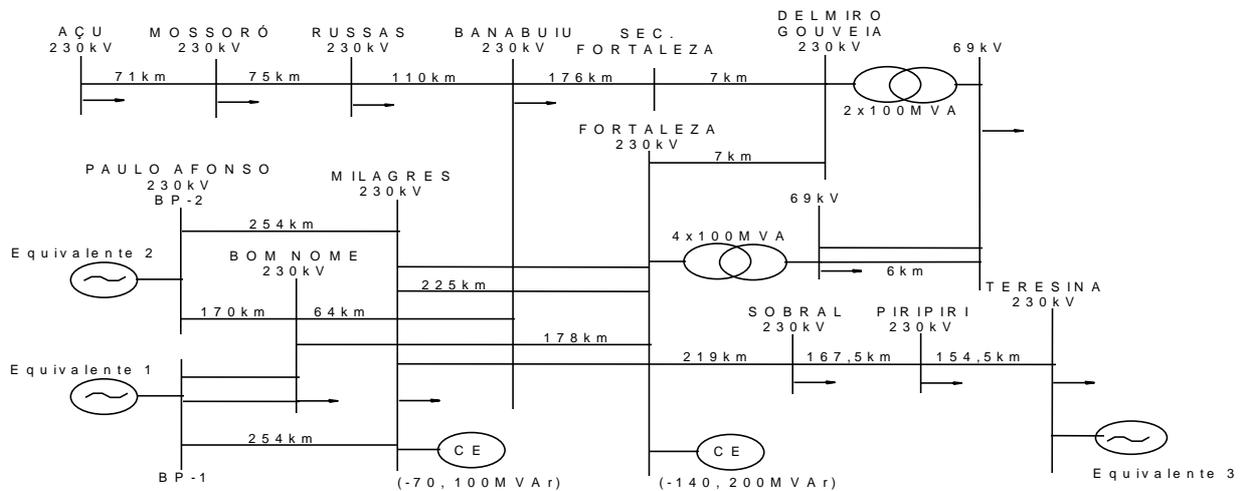


Figura 1-2 - Diagrama unifilar simplificado do sistema Norte da CHESF

3.0-MODELAGEM UTILIZADA

Para as demais cargas, usou-se impedâncias constantes e na SE Fortaleza, considerou-se percentuais de 10 a 50% da carga total desta SE representados por um motor de indução equivalente, através do modelo “Motor Universal” - tipo 3” existente no ATP. As principais funções do sistema de controle dos CE representadas no ATP são descritas a seguir [2].

-Malha de controle principal (canal normal), de filosofia proporcional-integral (PI) e malha de controle secundária (canal rápido), de filosofia proporcional-derivativa (PD).

-Esquema de Bloqueio por Subtensão: em defeitos no sistema de transmissão, o sistema de controle dos CE tentaria se contrapor às subtensões decorrentes, levando-os a operar em pontos fortemente capacitivos, embora durante o defeito, tal contribuição fosse muito pequena, tanto menor quanto maior o afundamento da tensão, pois a potência reativa do capacitor depende do quadrado da tensão. Entretanto, na eliminação do defeito, os CE estariam operando em pontos fortemente capacitivos, contribuindo para elevar as

sobretensões pós-defeito, principalmente quando houvesse rejeição de carga. Para evitar este inconveniente, foi implantado nos CE Fortaleza e Milagres o esquema de bloqueio por subtensão, que leva-os a operar em 0MVAR quando a tensão nos seus terminais cair abaixo de um valor ajustado. Uma vez restabelecida a tensão, os CE são liberados para voltar a controlá-la.

-Circuito Inicializador do Controlador PI: Para impedir a existência de possíveis instabilidades entre o limitador de corrente, que atua sobre o ângulo de disparo dos tiristores, impedindo que sejam excedidos seus limites de suportabilidade e o esquema de disparo protetivo, que efetua o disparo da válvula de tiristores em caso de falha no disparo principal, na atuação deste último, leva o CE para 10MVAR indutivo por 10mseg, liberando-o em seguida para operar livremente.

O modelo utilizado para representação do sistema mecânico do motor de indução e descrito em [2] utiliza uma analogia elétrica-mecânica, onde a inércia da massa girante é representada por uma capacitância, o amortecimento mecânico por uma condutância e o

acoplamento entre massas conectadas a um mesmo eixo pelo inverso de uma indutância. Com base em tal analogia, é construído o circuito elétrico equivalente requerido pelo ATP. As indutâncias e resistências de dispersão e indutâncias comuns do motor são representadas através do uso de grandezas $d, q, 0$ [2]. Rogers e Shirmohammadi desenvolveram uma metodologia para obtenção dos parâmetros do motor para realização de estudos de transitórios eletromagnéticos [3]. Gabor Furst complementou e aperfeiçoou os trabalhos de [3] e desenvolveu um programa utilitário denominado INDMOT, que calcula, a partir dos dados de placa e das especificações de regime permanente, os parâmetros do motor de indução tipo 3 requeridos pelo modelo “Universal Machine” do ATP [2].

4.0 - ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

4.1-Aplicação de Pequenas Perturbações

Para definição dos ganhos proporcionais dos canais normais dos CEs Fortaleza e Milagres, foram aplicados steps na tensão de controle dos seus reguladores de tensão em carga máxima, carga mínima, carga mínima, na configuração de mínima potência de curto-circuito em operação normal e recomposição do sistema de transmissão a partir da SE Paulo Afonso. Partindo-se dos valores definidos em estudo de TNA realizado na entrada em operação do CE Milagres (0.40V/V-CE FTZ e 1.75V/V-CE MLG), verificou-se que o uso dos ganhos 0.70V/V-CE FTZ e 1.75V/V-CE MLG proporciona desempenho satisfatório nas três primeiras configurações estudadas. Entretanto, na recomposição, o seu uso produz instabilidade nos controles dos CE. O desempenho estável dos CE durante a recomposição só é obtido com o emprego dos valores de ganho anteriormente definidos e optou-se então pela manutenção destes valores. Os resultados deste item mostram que a solução para o compromisso rapidez de resposta x estabilidade em um sistema radial como o aqui estudado é o emprego de um controle adaptativo, com os parâmetros automaticamente variados, compensando mudanças de configuração na rede e no CE (saída de operação de uma seção). Recomenda-se que seja analisada a viabilidade da implantação deste esquema nos CE Milagres e Fortaleza.

4.2-Aplicação de Grandes Perturbações

Nesta etapa, foram efetuadas as seguintes simulações, com cargas modeladas por impedâncias constantes, situação mais crítica quanto às sobretensões pós-defeito:

Aplicação de curto-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos no 69kV das SE Fortaleza e Milagres, eliminados com rejeição total das suas cargas de 69kV

e de curto-circuitos bifásicos e trifásicos em linhas de 230kV nas áreas de influência dos CEs Milagres e Fortaleza, eliminados com abertura da linha em defeito. Tais simulações tiveram como objetivos, relativos aos CEs Milagres e Fortaleza, a reavaliação da filosofia de operação dos esquemas de bloqueio por subtensão, do circuito inicializador do regulador PI e dos ajustes dos canais rápidos. Seus resultados levam às seguintes constatações:

4.2.1-Os níveis de sobretensão registrados na eliminação de defeitos no 69kV da SE Milagres são muito reduzidos, não justificando a existência de esquema de bloqueio por subtensão no CE Milagres. Por outro lado, na eliminação de defeitos em linhas de 230kV, o CE MLG desloca-se para seu limite capacitivo, configurando uma necessidade de potência reativa capacitiva por parte do sistema elétrico nesta situação. Optou-se assim pela desativação do esquema de bloqueio por subtensão anteriormente ativado no CE MLG.

4.2.2-Os níveis de sobretensão registrados na eliminação de defeitos no 69kV da SE FTZ são ligeiramente inferiores ao se considerar ativado o esquema de bloqueio por subtensão do CE FTZ. Por outro lado, na eliminação de defeitos em linhas de 230kV, não há dificuldade quanto à recuperação da tensão e o consequente desbloqueio do CE pelo referido esquema. Optou-se assim por manter ativado o esquema de bloqueio por subtensão do CE FTZ, adequando seus níveis de atuação às necessidades atuais do sistema elétrico, o que levou à adoção dos seguintes ajustes:

⇒ Bloqueio 69kV fase-neutro: atuação a partir de 0.12pu

⇒ Bloqueio 230kV fase-neutro: atuação a partir de 0.25pu

⇒ Bloqueio 230kV fase-fase: atuação a partir de 0.25pu

4.2.3-Durante o estudo pré-operacional do CE FTZ realizado em TNA, as simulações de curto-circuito bifásico no 69kV da SE FTZ, eliminado com rejeição total da carga desta SE em carga mínima apresentaram elevados níveis de sobretensão na SE FTZ, que levavam ao surgimento de disparos protetivos nas válvulas de tiristores, que provocavam a atuação do circuito limitador de corrente do CE FTZ, implicando em oscilações não amortecidas de longa duração entre as citadas malhas de controle. No presente estudo, foram simuladas, entre outras, as contingências que no estudo anterior deram origem à referida instabilidade, não se verificando nenhum indício do citado problema. Optou-se então pela desativação do referido circuito em ambos os CE.

4.2.3-Nas simulações de aplicação de defeito com subtensão na sua eliminação, a atuação do canal

rápido se dá com a tensão muito reduzida e em processo de recuperação. Isto ocorre porque, embora sua amplitude seja de pequeno valor, sua derivada é elevada, levando o canal rápido para seu limite indutivo, opondo-se ao seu crescimento. Verificou-se dificuldade na coordenação da atuação de duas malhas de controle com filosofias diferentes, o canal normal, PI e o canal rápido, PD. Optou-se então por priorizar a ação do canal normal, de maior precisão e tempo de resposta adequado às necessidades do sistema de transmissão. Assim, foram mantidos os atuais ajustes do canal rápido, mantendo a sua ação bastante limitada, pois a alteração dos mesmos apresenta mínimos benefícios em condições de sobretensão e desvantagens em condições de subtensão. Para evitar que o canal rápido dificulte a recuperação da tensão na eliminação de defeitos, manteve-se o bloqueio dos CE pelo esquema de subtensão atuando também sobre ele.

4.3-Aplicação de Grandes Perturbações Considerando o Comportamento Dinâmico da Carga de Fortaleza

Longos intervalos de tempo, da ordem de alguns segundos, para a recuperação das tensões após a eliminação de defeitos indicam a presença de elevada parcela de cargas dinamicamente ativas [4]. Ensaios realizados na SE Fortaleza e registros colhidos durante perturbações (Figura 4.3-1) mostram elevados tempos de recuperação da tensões nesta SE no período subsequente à eliminação de defeitos, indicando que parcela significativa da carga suprida a partir da SE Fortaleza é composta por motores de indução. Tais resultados motivaram a realização de simulações com diferentes parcelas da carga de 69kV da SE Fortaleza representadas por um motor de indução. Os resultados das simulações são analisados a seguir.

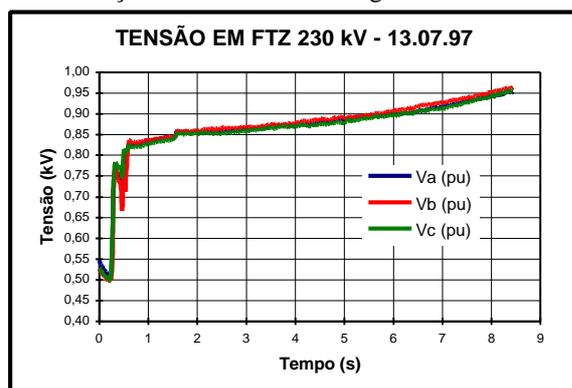


Figura 4.3-1 - Registro de campo de curto trifásico em linhas de 230kV na Área Norte da CHESF.

Foram efetuadas simulações de aplicação de curto-circuitos bifásico e trifásico à terra no 69kV da SE Fortaleza e eliminação com rejeição de toda a parcela da carga tipo impedância constante, percentuais de carga dinamicamente ativa de 10 a 30% da carga total, com e sem atuação do esquema de bloqueio do CE

Fortaleza por subtensão, e aplicação de curto-circuitos bifásico e trifásico à terra numa das linhas de transmissão Banabuiu-Fortaleza 230kV, eliminado com abertura da LT em falta, percentuais de carga dinamicamente ativa de 10 a 50% da carga total, com atuação do esquema de bloqueio do CE Fortaleza por subtensão, em ambos os casos, com e sem os efeitos da saturação nas indutâncias de dispersão do motor equivalente à parcela da carga representada.

O elenco de simulações realizado procurou cobrir situações extremas às quais é submetido o sistema de transmissão. Conforme descrito em [2], a brusca redução da tensão terminal de motores de indução em carga devido a curto-circuitos externos provocará queda de velocidade. Na eliminação do defeito, a máquina tentará retomar sua velocidade pré-defeito, o que poderá ou não ter êxito, dependendo das características do motor e da rede estudada. Isto implicará em elevadas correntes de estator, próximas à corrente de partida e elevada demanda de potência reativa [4], podendo haver até um colapso de tensão, caso o sistema de transmissão não esteja apto a fornecê-la. O intervalo necessário para a recuperação da tensão depende dos seguintes fatores:

- Duração e magnitude do afundamento da tensão terminal do motor durante a falta
- Curva torque x velocidade, inércia e amortecimento dos motores estudados
- Parcela da carga total correspondente a motores de indução
- Suporte de potência reativa disponível
- Montante de carga perdida na eliminação da falta

Dentre os vários casos simulados, é apresentada a aplicação de curto trifásico à terra numa das linhas Banabuiu-Fortaleza 230kV, eliminado em 200mseg com abertura da linha, carga máxima, com atuação do esquema de subtensão e 35% da carga de Fortaleza representada por um motor de indução equivalente (160.000HP/13.8kV), sem saturação nas suas indutâncias. Os resultados das simulações mostram que (Figuras 4.3-2):

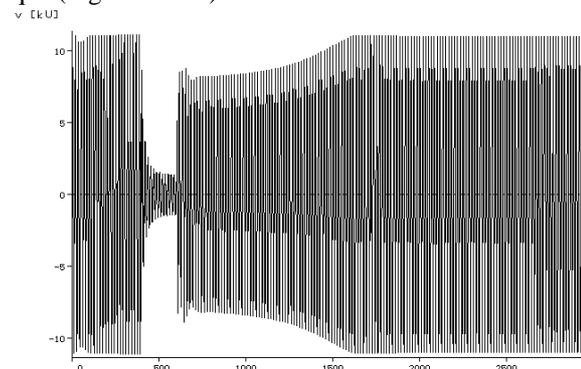


Figura 4.3-2a - Tensão terminal do motor equivalente

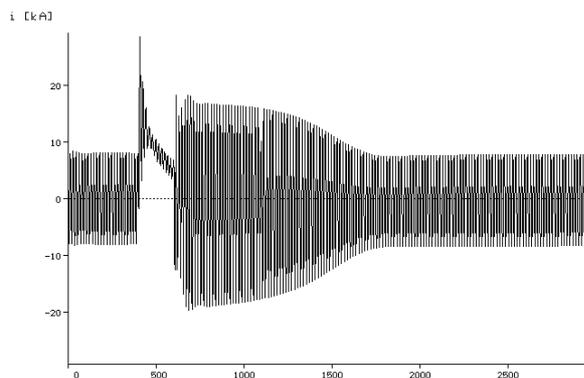


Figura 4.3-2b - Corrente fase a do motor equivalente

- O transitório de retomada de velocidade do motor após eliminada a falta dura cerca de 1.4seg e sua tensão terminal cai para cerca de 70% durante este intervalo.

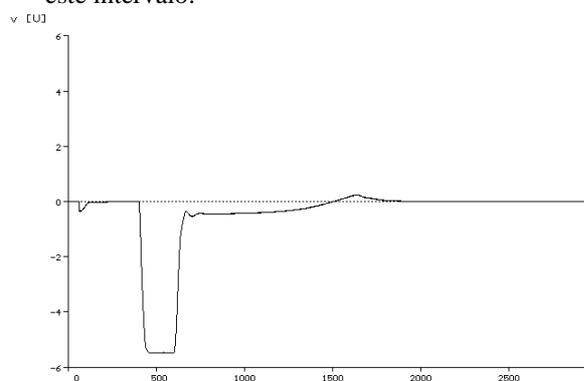


Figura 4.3-2c - Erro de tensão do CE Fortaleza

- Na eliminação da falta, ambos os CE deslocam-se para pontos fortemente capacitivos e lá permanecem até a extinção do transitório de retomada de velocidade, ratificando o elevado consumo de potência reativa do motor equivalente durante este intervalo e que graças à ação dos CE na recuperação das tensões, é atingido um novo regime permanente próximo ao anterior à aplicação da falta.

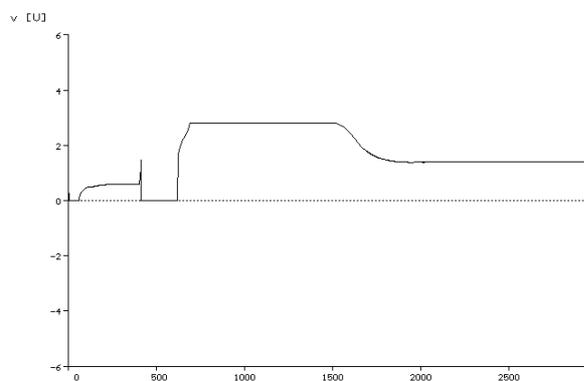


Figura 4.3-2d - Saída canal normal (PI) CE Fortaleza

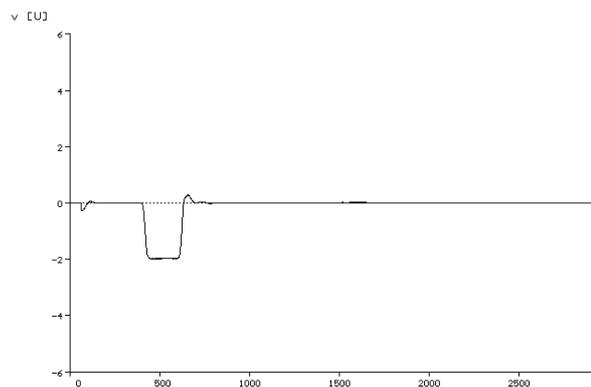


Figura 4.3-2e - Erro de tensão do CE Milagres

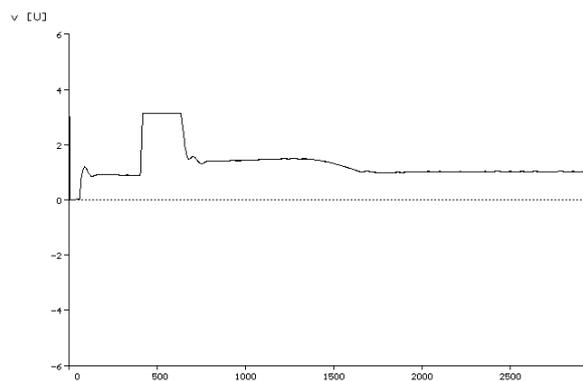


Figura 4.3-2f - Saída canal normal (PI) CE Milagres

5.0-CONCLUSÕES

5.1-Com percentuais de carga tipo motor de indução na SE Fortaleza de até 50% da carga total, não há bloqueio permanente do CE Fortaleza pelo esquema de subtensão, ratificando-se a adequacidade dos ajustes definidos.

5.2-Conforme estabelecido pelo autor, o programa INDMOT fornece parâmetros que satisfazem aos dados de placa e aos requisitos de regime permanente de uma dado motor, devendo sua curva torque x velocidade ser comparada com ensaios de campo e efetuados os necessários ajustes nos parâmetros calculados.

5.3-Ao se usar esta ferramenta para representar um motor equivalente a um grande número de pequenos motores, o grau de incerteza é ainda maior, reforçando a necessidade da validação dos resultados obtidos com a realização de ensaios de campo.

5.4-Ao se estudar um sistema radial fortemente carregado como o subsistema Norte da CHESF, a inércia do motor equivalente adquire especial relevância, pois alterações no seu valor modificam a frequência natural da rede elétrica, modificando a resposta dos CE.

5.5- Apesar das limitações impostas, os resultados obtidos permitiram efetuar uma estimativa da parcela de cargas dinamicamente ativas presente na SE Fortaleza, situada entre 10 e 40% da carga total.

5.6- É evidente a importância da representação da dinâmica da carga em estudos para determinação de medidas destinadas a elevar os níveis de qualidade de energia, bem como que se disponha de adequados equipamentos de supervisão.

6.0 - REFERÊNCIAS

- [1] A. N. Vasconcelos, A. J. P. Ramos, J. S. Monteiro, M. Correia Lima, H. D. Silva e L. R. Lins, "Detailed Modeling of an Actual Static Var Compensator For Electromagnetic Transient Studies", 91 WM 211-3 PWRs - IEEE/PES 1991 Winter Meeting, New York, USA, February 3-7, 1991;
- [2] Lima, Manfredo V. B. Correia, "Análise do Desempenho de Múltiplos Compensadores Estáticos em Sistemas Radiais Fortemente Carregados, Considerando a Presença de Cargas Dinamicamente Ativas", Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 1997;
- [3] Rogers, G. J. and Shirmohammadi, D., "Induction Machine Modelling for Electromagnetic Transient Program", IEEE 87 WM 213-2, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.4, April, 1984;
- [4] Shaffer, John D., "Air Conditioner Response to Transmission Faults", 96 WM 331-9 PWRs-IEEE/PES 1996 Winter Meeting, Baltimore, USA, July 21, 1995;