

Aplicação de Capacitor Série como Solução para partida de Grandes Motores de Indução

Suzuki M, Ferreira D. J, Borges W. M, Camargo J, Caixeta G. P, Pasqua L.

Resumo — Este artigo apresenta alguns resultados do PD-96 “Novo Sistema de Compensação Reativa – Compensador Série Modular - CSM”, cujo objetivo foi desenvolver um padrão de compensador série, que permitisse sua aplicação em qualquer ponto da distribuição, onde houvesse problemas de tensão. O primeiro foi o CSM-01, desenvolvido para 13,8 kV, sendo instalado a 22 km da SE, devido a problemas de partida de motores. O segundo foi o CSM-02, desenvolvido para o 23kV, que será instalado a 32 km da SE, devido a problemas de tensão. Como resultado, a compensação série poderá ser aplicada em maior escala, pois o CSM permite além de obter facilmente o custo final da instalação para realização das análises econômicas, também o seu reaproveitamento em outros pontos do sistema. Com isto, a CPFL terá uma nova tecnologia, eficiente e mais barata que as convencionais, para atender seus clientes dentro dos níveis de tensão estabelecidos pela ANEEL.

Palavras chave — *Compensação Reativa, Regulação de Tensão, Compensação Série.*

I. INTRODUÇÃO

Equipamentos convencionais utilizados para elevar e regular o nível de tensão, como bancos de capacitores e reguladores de tensão, algumas vezes não são suficientemente eficientes. É o que ocorrem em casos como os encontrados em linhas extensas com carga concentrada na sua extremidade, ou nas partidas de grandes motores de indução, pois o tempo de partida destes é menor que o tempo de resposta dos equipamentos convencionais. Isto exige que a concessionária insira no seu programa de expansão a construção de subestações, ramais de transmissão, alimentadores, elevando assim os custos dos investimentos [1].

A compensação em série na distribuição é uma técnica simples e conhecida, que consiste basicamente em compensar ou sobrecompensar a reatância indutiva a partir do ponto de instalação [2] a [8].

Ela fornece uma regulação de tensão e uma compensação de reativos instantânea e automática, proporcional a corrente, o que melhora o perfil da tensão e dá suporte à partida de motores. Além disto, com a necessidade de melhorar os níveis de qualidade de energia, a utilização de capacitores série também pode ser aplicada para reduzir flutuações de tensão e os respectivos índices de severidade de cintilação luminosa (Flicker) [9].

A CPFL é a empresa pioneira na aplicação de compensador série na distribuição. Em 1967, instalou um Compensador Série – CS no município de Guaíra - SP, que permitiu um fornecimento adequado da energia aos consumidores do município até entrada em operação da SE Guaíra 69 kV. Em 1989, instalou outro na cidade de Sabino - SP, propiciando um fornecimento adequado da energia aos

consumidores do município até os dias de hoje e que possibilitou a postergação da construção de duas SE, uma de 34,5-11,9 kV, em Sabino, e outra de 138-34,5 kV, em Cafelândia.

O Compensador Série Modular – CSM, proposto no PD-96, será constituído a partir do desenvolvimento de uma CSMU - Compensador Série Modular Unitário. O CSM será composto de uma plataforma com a menor quantidade de equipamentos possíveis, de forma totalmente flexível e otimizada, e que permita facilmente ser ajustado para aplicação em qualquer ponto da rede a partir da inserção de novas CSMU em paralelo.

Neste artigo serão mostrados todos os equipamentos que compõem o CSM, com suas respectivas funções, incluindo os equipamentos comuns, que não precisam de alteração e podem ser instalados em qualquer ponto do sistema de distribuição, e o conjunto de CSMU. A CSMU caracteriza o aspecto modular do CSM, cuja configuração define a reatância capacitiva do CSM, obtida através de estudos e simulações das condições operativas, para todas as possibilidades de carga, em regime permanente e transitório, e ainda considera as topologias possíveis da rede. Também serão mostradas algumas aplicações possíveis do CSM, bem como algumas recomendações para estas aplicações.

Por fim são apresentados os protótipos desenvolvidos: 1º protótipo instalado em 2007 e 2º protótipo que será instalado em 2009, destacando os detalhes dos equipamentos com alguns comentários sobre suas especificações, concluindo com uma avaliação do desempenho em campo do CSM-01 e o desempenho esperado do CSM-02.

II. COMPENSAÇÃO SÉRIE MODULAR - CSM

O PD-96 buscou desenvolver um padrão de compensação série modular, formado por módulos que pudessem se agregar, numa operação simples e segura, em conjuntos série ou paralelo, obtendo uma reatância capacitiva equivalente, conforme valor definido para o ponto escolhido para instalação.

A figura 01 apresenta um diagrama esquemático do CSM. Em função dos possíveis valores de reatâncias capacitivas, o CSM pode ser aplicado em praticamente qualquer ponto do sistema da rede primária onde houver problema de regulação de tensão.

O CSM é composto por dois conjuntos de equipamentos: primeiro, pelo Conjunto de CSMU, que é a parcela de equipamentos que poderia variar de um para outro ponto do sistema, e dos demais equipamentos, que deve ser comum para qualquer instalação.

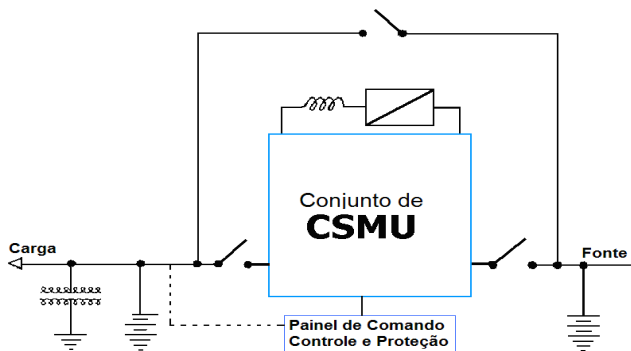


Figura 1 - Compensador Série Modular - CSM

O CSM é composto pelos seguintes equipamentos:

A-Conjunto de CSMU

A-1 Capacitores do Conjunto de CSMU

As unidades capacitivas do Conjunto de CSMU são agrupadas em série e/ou paralelo de forma que a reatância equivalente de cada fase do CSM seja igual ao valor previamente calculado e utilizado nas simulações de fluxo de carga para as condições de regime permanente. Elas devem ser especificadas com base na NBR-8761.

As unidades capacitivas podem ser protegidas através de fusíveis internos ou fusíveis externos.

Fusíveis internos: Destinado a isolar um elemento danificado e assim garantir uma operação sem distúrbio da unidade danificada ou do banco, no caso de ocorrência deste tipo de pequena falta. Operação de mais fusíveis em uma unidade pode exigir a desconexão do banco, de forma automática, caso o banco possua dispositivo de proteção contra desequilíbrio de tensão, ou de forma manual, a partir da medição da capacitância, ou através de algum tipo de sinalização que pode ser instalado no CSM.

Fusíveis externos: Destinado a desligar uma unidade capacitiva caso ela se torne parcial ou totalmente danificada. O fusível externo operará somente quando o número de perfurações nos elementos de um capacitor com defeito exceder um dado nível. O fusível externo é freqüentemente equipado com um dispositivo de sinalização por meio do qual a unidade danificada pode ser identificada. A operação de apenas um fusível externo já pode exigir a desconexão do banco, principalmente se houver um pequeno número de unidades diretamente em paralelo.



Figura 2 - Conjunto de capacitores definido como CSMU

Em ambos os casos, as características dos fusíveis devem ser coordenadas com as características dos relés de proteção,

ou seja, os fusíveis devem operar antes dos relés.

A figura 2 demonstra o conjunto de capacitores definido como CSMU.

A-2 Varistores do Conjunto de CSMU

Uma opção para o CSMU não utilizar capacitor dimensionados para suportar a tensão durante a circulação de correntes de curtos-circuitos é utilizar varistores em paralelo com os capacitores. Isto permite a utilização de capacitores considerados normais, ou seja, para as condições nominais de regime permanente.

Os varistores são dimensionados para limitar a tensão em seus terminais. Nesta condição os terminais de capacitores e varistores, ficam sujeitos à mesma tensão, sendo que pelos capacitores irá circular a corrente que eles suportam, segundo o projeto construtivo, e pelos varistores o restante da corrente. Para isto, os varistores têm que dissipar uma quantidade significativa de energia durante a circulação da corrente de curto-circuito.

A tensão nominal do varistor não pode ser superior à máxima tensão suportável pelo capacitor. Desta forma, avaliando as tabelas de varistores, fornecida pelos fabricantes, são selecionados alguns varistores candidatos a serem utilizados no conjunto CSMU.

Conhecendo as características dos varistores candidatos, são feitas simulações para as condições de curto circuito máximo, considerando o tempo de atuação da proteção. Avaliando os resultados destas simulações é definido o tipo e a quantidade de varistores necessários para o conjunto de CSMU.

Tendo o valor da tensão nominal do varistor escolhido, a reatância do CSMU e a corrente de carga máxima que circulará por ele, são definidas o tipo, as características e a quantidade de capacitores a serem utilizados no conjunto de CSMU.

A figura 3 mostra o varistor de óxido de zinco, que será utilizado no CSM.



Figura 3. Varistor de óxido de zinco.

B. Conjunto de Equipamentos Comuns

B-1 Painel de Comando, Controle e Proteção.

A função do Painel de Comando, Controle e Proteção é comandar a abertura e o fechamento da chave a vácuo.

Ele é formado por relés de sub e sobretensão, botoeiras,

contatores, inversor, um conjunto de capacitores eletrolíticos e um temporizador. A figura 4 apresenta o painel utilizado para comando da proteção.

O sistema de acionamento da chave de proteção do capacitor série é baseado em função da operação de um relé de subtensão, o qual verifica a tensão imediatamente após o capacitor série, utilizando um transformador de potencial (TP). Adota-se que para tensões inferiores a 60% da nominal, o relé deverá acionar um dispositivo para acionamento das chaves a vácuo. Desta forma, esta filosofia de proteção atua no sentido de proteger o equipamento frente às diversas faltas ocorridas no sistema elétrico.



Figura 4. Painel de comando da Chave a vácuo.

B-2 Chave de by-pass

A chave by-pass, ou de isolamento, tem a função de retirar o CSM de serviço, durante serviços de manutenção do mesmo, sem interromper o fornecimento de energia. Ela é formada por um conjunto de três chaves facas, manobra sem carga, que operam de forma intertravada, 2N- 1F, do tipo utilizado para fazer o by-pass dos reguladores de tensão, e são acionadas manualmente. A figura 5 mostra a disposição das chaves by-pass na estrutura do CSM.

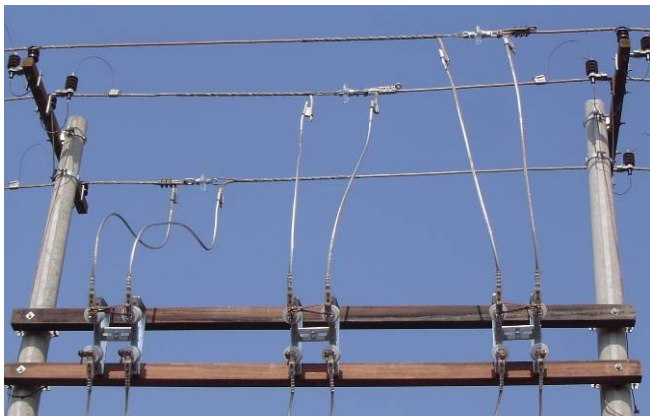


Figura 5. Chaves by-pass.

B-3 Chave a vácuo

A chave a vácuo possui três funções.

A primeira função é inserir o conjunto de CSMU após a energização da linha, através da atuação da bobina de abertura da chave. Para atuação da bobina de abertura é necessário que a tensão obtida do TP, permaneça por um

tempo pré-definido, através do temporizador contido no painel de comando, dentro da faixa considerada adequada. Durante a energização da linha a chave a vácuo permanece fechada, fazendo o by-pass do conjunto de CSMU.

A segunda função da chave a vácuo é retirar o conjunto de CSMU de serviço, através do by-pass do mesmo, assim que a proteção a montante do CSM atuar, ou quando a tensão, medida através do TP e avaliada pelos relés de sub e sobre tensão, ficar fora da faixa considerada adequada. Esta operação é feita através da atuação da bobina de fechamento, que fecha a chave a vácuo.

A terceira função é inserir o conjunto de CSMU após o restabelecimento do fornecimento, ou seja, a tensão medida pelo TP ficar dentro da faixa considerada adequada pelo tempo pré-definido no temporizador. Para esta operação a bobina de abertura abre a chave a vácuo e insere o conjunto de CSMU.

A chave a vácuo é dimensionada em função da tensão, corrente e frequência nominal do sistema, bem como da tensão suportável de impulso atmosférico, da máxima corrente momentânea assimétrica e da corrente suportável simétrica de curta duração, e da tensão nominal de alimentação.

Como a bobina de fechamento da chave a vácuo é alimentada por um capacitor eletrolítico, a mesma deve operar através de solenóide, portanto as chaves que operam com motor são inadequadas para este uso.

A figura 6 apresenta a chave a vácuo utilizada para montagem da estrutura do CSM. Sua escolha foi em função das características técnicas, pois suporta uma corrente assimétrica de pico elevada, 23kA. A definição da chave se dá através do cálculo do reator de amortecimento: a máxima corrente utilizada no desenvolvimento dos cálculos depende da máxima corrente suportada pela chave.



Figura 6 - Chave a Vácuo

B-4 Reatores

Na ocorrência de curtos-circuitos a jusante do CSM, até que haja a atuação da bobina de fechamento, os capacitores do conjunto de CSM são carregados pela corrente de curto-circuito que circula por eles. Este tempo de fechamento depende do tempo de atuação da proteção e deve ser

estabelecido em função da configuração do CSM. Na configuração apenas com capacitores, este tempo pode ser dimensionado em até 500ms, e na configuração com capacitores e varistores, quanto maior o tempo, maior é a quantidade de varistores, por isto, deve se adotar o menor tempo possível, como por exemplo, 100ms.

Assim que a chave a vácuo fecha os capacitores se descarregam sobre ela e o reator. Como a NBR 8763 estabelece que o pico máximo da corrente de descarga não pode ser maior que 100 vezes a corrente nominal do capacitor, o reator tem a função de limitar a corrente neste valor. Os capacitores devem ser descarregados antes da inserção do CSM, ou seja, na abertura da chave a vácuo, do CSM da linha. O reator também tem a função de amortecer a corrente de descarga do capacitor sobre a chave a vácuo.

O esquema ilustrado no circuito da figura 7 representa um reator de núcleo de ar conectado em paralelo com o banco, o qual deve ser especificado para descarregar o capacitor de maneira a limitar o nível máximo da corrente.

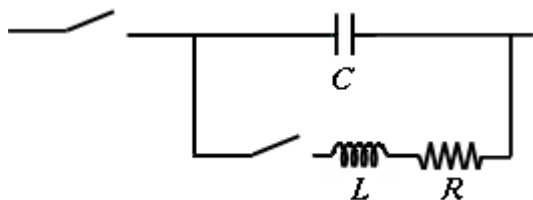


Figura 7. Circuito de amortecimento do banco de capacitores.

Além disso, essa corrente de descarga deve ser amortecida num intervalo de tempo suficiente para que o banco volte a operar quando o sistema é re-energizado.

A resistência “R” nesse circuito representa a resistência própria do reator, o qual é dimensionado de forma a evitar arco e danos nos contatos da chave.

A análise dos efeitos de troca de energia entre dois elementos capazes de armazenar energia em campo elétrico (capacitores) ou magnético (indutores) é o ponto de partida para determinar o reator de amortecimento do Capacitor Série Modular.

O atraso ou defasagem entre tensão e corrente no circuito RL é oposta à do circuito RC. Em consequência disso, o indutor e o capacitor trocam energia entre si quando estimulados pela mesma corrente (associação série) ou pela mesma tensão (associação paralela). Sob condições particulares, essa troca de energia pode dar origem a oscilações pouco amortecidas, que definem a frequência de ressonância, em torno da qual pode-se implementar osciladores auto-sustentados de uso prático.

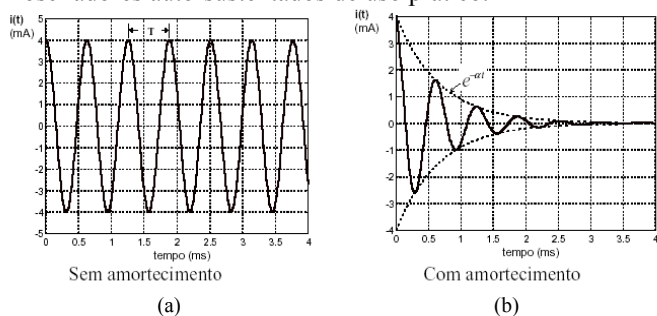


Figura 8. Comportamento da corrente para um circuito LC amortecido e sem amortecimento.

Pode-se observar na figura 8a, que um circuito LC ideal não apresentaria amortecimento, com isso o campo elétrico e o campo magnético se alto alimentariam ocasionando uma oscilação auto-sustentada. Com a inserção de uma resistência no circuito – circuito RLC – surge o amortecimento provocado pela dissipação de energia pelo resistor, resultando num perfil de corrente como na figura 8b.

Nas condições citadas anteriormente e com a definição do fator de qualidade do reator, monta-se e resolvem-se as equações diferenciais do circuito da Figura 7, determinando assim os valores de R e o L, ou seja, se define o Reator. Após a resolução deste circuito monta-se um circuito, utilizando o software PSCAD®/EMTDC™, de transitório eletromagnético se obtém a forma de onda da corrente amortecida pelo reator calculado.

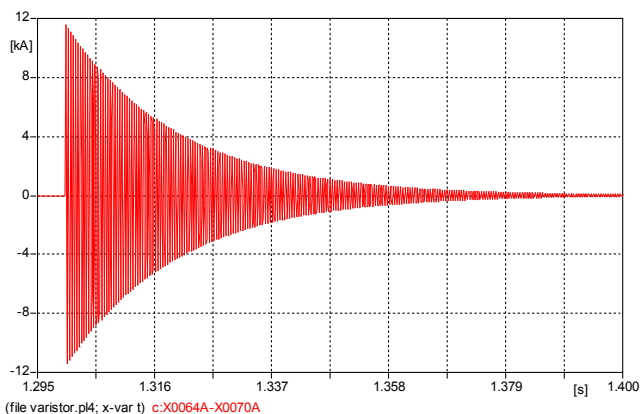


Figura 9 – Forma de onda esperada da corrente de descarga.

A figura 9 mostra a forma de onda esperada da corrente de descarga dos capacitores sobre a chave a vácuo e o Reator.

A figura 10 apresenta o reator de núcleo de ar utilizado para a proteção do banco.



Figura 10 - Reator de núcleo de ar para proteção do CSM.

B-5 Pára-raios

Os pára-raios são instalados antes e depois do CSM, com a função de proteção contra descargas atmosféricas sobre as partes metálicas da linha. Eles são iguais aos equipamentos normalmente utilizados em sistema primário de distribuição.

B-6 Transformador de Potencial – TP

O TP possui duas funções. A primeira função é

responsável pela medição da tensão no lado carga do CSM, medição está que é avaliada pelos relés de sub e sobre tensão, contidos no painel de comando, controle e proteção do CSM. Caso as mesmas estejam fora da faixa de tensão permissível os relés irão enviar um sinal para a bobina de fechamento da chave a vácuo atuar, e retirar o CSM de serviço, ou seja, fazer o by-pass do conjunto de CSMU.

A segunda função é alimentar a bobina de abertura da chave a vácuo, quando a tensão for considerada adequada. Ou seja, permanecer dentro da faixa considerada aceitável, durante um período de tempo pré-definido.

O TP é um equipamento normalmente utilizado em sistema primário de distribuição. O mesmo pode ser substituído por um transformador convencional de distribuição, caso a máxima corrente que pode ser absorvida pelo TP seja menor que a corrente necessária para o acionamento da bobina de abertura da chave a vácuo.

III. POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DO CSM

- Como solução para problemas de Flicker

O CSM pode ser utilizado para reduzir problemas de oscilações de tensão, que provocam cintilação (efeito Flicker). Neste caso a reatância capacitiva do CSM deve ser menor do que a reatância indutiva da linha [04].

- Como suporte para partida de grandes motores

O CSM pode ser utilizado para aumentar o nível de curto-circuito, e propiciar a regulação automática de tensão, quando da partida de grandes motores. Este foi o motivo da escolha do ponto de instalação do CSM-01.

Para tanto, a reatância capacitiva do CSM deve ser dimensionada de forma a evitar a ocorrência de ressonância Subsíncrona, devido à excitação do motor. [05].

- Como solução para melhoria do perfil de tensão.

O CSM pode ser utilizado para melhorar o perfil de tensão de uma determinada região atendida por uma linha extensa, com carga distribuída, como o caso que originou a escolha do ponto de instalação do CSM-02. Neste caso, além de avaliar os níveis de tensão durante todas as condições de carga à jusante do CSM, têm que ser avaliadas também as condições de carga à sua montante.

Nos casos de linhas extensas com cargas apenas na extremidade, a reatância do CSM pode ser dimensionada para fornecer uma faixa elevada de regulação de tensão, visto que a tensão a jusante do CSM é que efetivamente precisa ser regulada, pois na sua montante não existem cargas instaladas.

O ideal é que, em qualquer caso, a reatância seja definida após várias simulações, para as condições de regime permanente, para um montante significativo de valores de reatância e em todas as possíveis condições de carga. Em todos os casos deve se verificar se os níveis de tensão em nos consumidores da linha, desde o mais próximo ao consumidor mais afastado da subestação, estão dentro dos limites considerados adequados pela ANEEL.

Portanto, o valor a ser adotado para a reatância capacitiva do CSM é aquele que apresentar o melhor resultado em termos de regulação de tensão, em toda a extensão da linha, para todas as condições atuais e previstas de carga, incluindo possíveis manobras nas redes de distribuição ou transmissão. Caso seja preciso, podem se adicionar equipamentos convencionais, como bancos de capacitores em derivação e banco de regulador de tensão. Neste caso, é necessário avaliar, os níveis de tensão, de uma forma geral, ao longo da linha, sobre todas as condições possíveis de operação. [1] a [7]

IV. COMPENSADOR SÉRIE MODULAR - CSM-01

Como visto no item anterior, o CSM pode ser utilizado para dar suporte à partida de grandes motores de indução, pois ele propicia a compensação reativa e a regulação de forma instantânea, atendendo as necessidades da partida dos motores.

No ponto escolhido para instalação do CSM-01 haviam instalado 61 motores de indução trifásicos - (MIT), que faziam recalque de água de um sistema de irrigação de uma fazenda de laranja, de um grande cliente da CPFL. Antes da instalação apenas 40 MIT conseguiam partir e com a instalação do CSM-01, todos os motores conseguiram entrar em operação adequadamente.

A análise técnica e econômica realizada para definição do conjunto de CSMU do CSM-01, conclui que utilizar apenas capacitores, dimensionados para suportar a tensão proporcionada pela circulação da máxima corrente de curto circuito, durante 500ms, era mais vantajoso do que adotar a configuração com capacitores e varistores. A figura 11 apresenta o CSM-01 instalado.



Figura 11 - CSM-01 instalado

O CSM 01 foi instalado em um alimentador de 13,8 kV, e

constituiu dos seguintes equipamentos:

- RACK para 16 capacitores por fase.
- Conjunto de 15 Capacitores por fase com fusível externo.
- Painel de Comando, Controle e Proteção.
- Transformador para alimentação do painel.
- Chave by-pass.
- Chave a vácuo.
- Reator com núcleo de ar.

A figura 12 apresenta o corte lateral da estrutura.

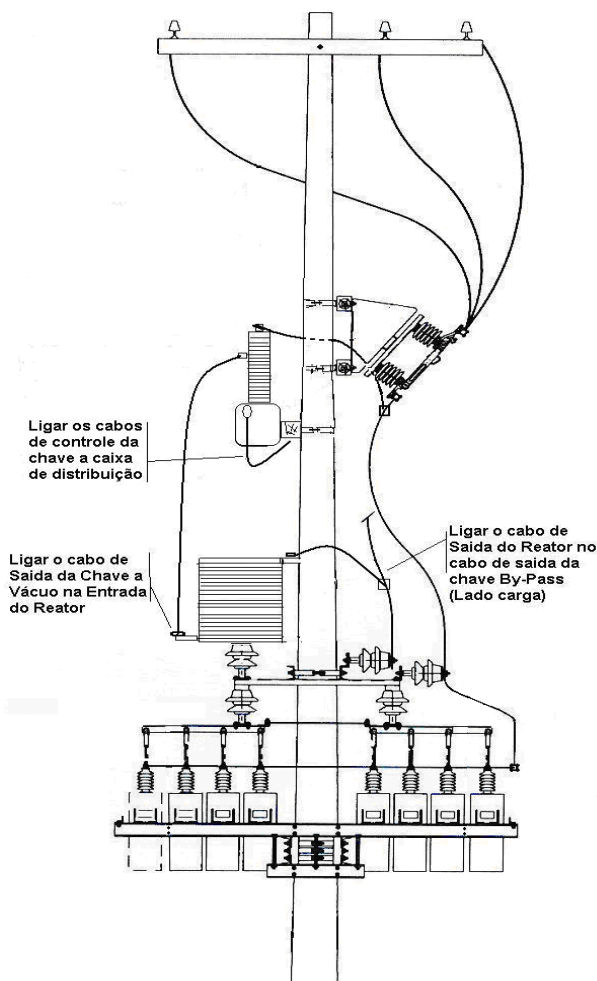


Figura 12 - Vista lateral da Estrutura do 1º protótipo instalada

V. COMPENSADOR SÉRIE MODULAR - CSM-02

O ponto escolhido para o CSM-02 está localizado numa linha de distribuição rural do sistema de distribuição de 23 kV, da CPFL – Piratininga. Neste ponto existem quedas de tensão próximas dos limites críticos, e ele será utilizado para mitigar estes problemas.

A análise técnica e econômica realizada para definição do conjunto de CSMU do CSM-02, concluiu que utilizar apenas capacitores dimensionados para suportar a tensão proporcionada pela circulação da máxima corrente de curto circuito, durante 500ms, apresentaria um custo muito mais elevado do que utilizar uma configuração com capacitores e varistores. Portanto, foi definida a utilização de 7 varistores

e 3 capacitores por fase.

As figuras 13 e 14 apresentam a vista frontal e lateral do CSM-02 respectivamente, que está sendo desenvolvido.

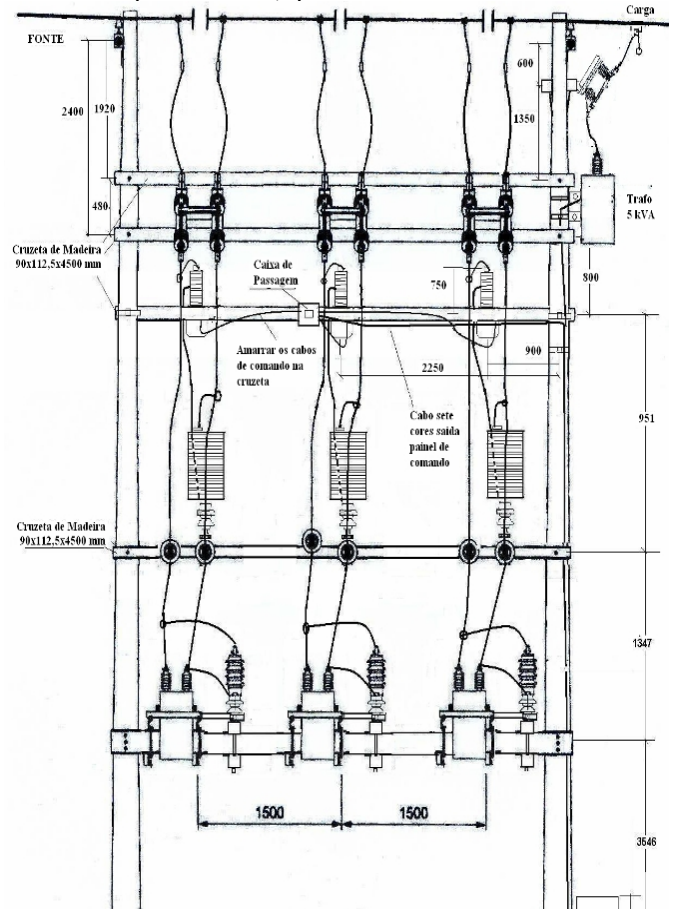


Figura 13 - Vista Frontal do desenho do CSM-02.

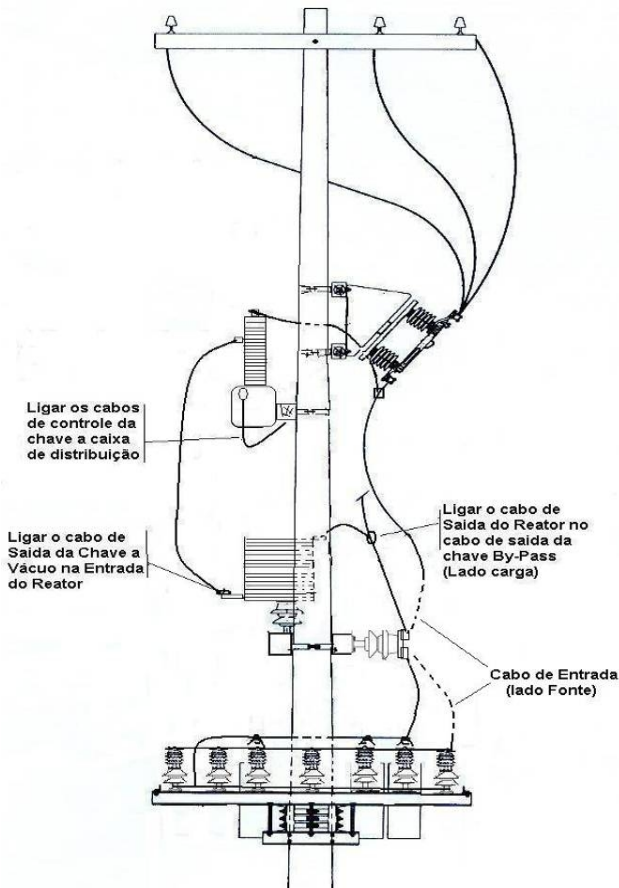


Figura 14 - Vista lateral do desenho do CSM-02

VI. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SISTEMA UTILIZANDO O METODO DA "CURVA PV"

Mesmo com todos os equipamentos corretivos de tensão em operação, os níveis de queda de tensão aumentam à medida que outras cargas são ligadas, comprometendo a estabilidade da tensão. Isto pode ser comprovado através da realização de uma simulação de fluxo de carga.

Além do fluxo de carga, há um método amplamente utilizado para análise de estabilidade, a "Curva PV". Este método determina no estado estacionário, o quanto a tensão de operação está próxima do ponto de instabilidade de tensão e dos limites de carga relacionados à estabilidade de tensão.

Neste contexto é apresentado abaixo o estudo de estabilidade de tensão referente ao sistema de um grande cliente da CPFL, no qual foi selecionado para a instalação do primeiro protótipo do CSM.

A figura 15 mostra o diagrama unifilar da rede com as impedâncias características de cada trecho, sem a inserção do CSM.

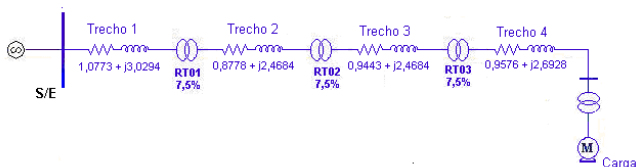


Figura 15 - Diagrama unifilar adotado para o cálculo da curva PV

As expressões 1 e 2 apresentam as relações entre tensão e

carga. Os pontos da curva PV podem então ser obtidos a partir de sucessivas interações. Onde P^* é definida como sendo a capacidade de transferência de potência do sistema, e o valor correspondente de tensão, define a tensão crítica (V_{crit}) do ponto de vista de estabilidade [11].

$$V_A = \sqrt{\frac{E^2 - 2 \cdot ((R \cdot P) + (X \cdot Q)) + \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 \cdot ((R \cdot P) + (X \cdot Q)) - 4 \cdot ((X \cdot P) - (R \cdot Q))^2}}{2}} \quad (1)$$

$$V_B = \sqrt{\frac{E^2 - 2 \cdot ((R \cdot P) + (X \cdot Q)) - \sqrt{E^4 - 4 \cdot E^2 \cdot ((R \cdot P) + (X \cdot Q)) - 4 \cdot ((X \cdot P) - (R \cdot Q))^2}}{2}} \quad (2)$$

Utilizando as duas expressões pode se obter a curva PV, apresentada na Figura 16, no PAC (entrada da fazenda). A potência $P(\text{pu})$ equivale à capacidade de transmissão do sistema a partir do PAC. Para a obtenção da curva PV, os reguladores de tensão e capacitores em derivação, foram considerados na realização dos cálculos.

O limite máximo de transferência de potência é atingido em P^* . Este ponto de operação de tensão crítica V_{crit} , é caracterizada pela não convergência do fluxo de carga sendo também definida como limite (estático) de estabilidade de tensão.

De acordo com a figura 16, a capacidade de transferência de potência do sistema no PAC, fica em torno de 0,53 pu, o que justifica os problemas de afundamento de tensão ocorridos na planta da fazenda. Neste caso, o sistema não tem margem de estabilidade.

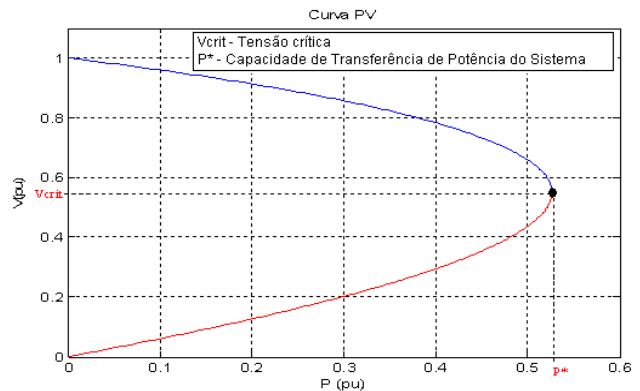


Figura 16. Curva PV para o Sistema de Colômbia sem o CSM.

Como já comentado, uma das causas do problema aqui mencionado está no nível de curto circuito, uma vez que quanto maior este valor, menor a queda de tensão e menos flutuação de tensão ocorrem durante a partida de motores.

Como a inserção do capacitor série provoca a redução da impedância da linha e do ângulo de fase entre as tensões das extremidades da linha, ele amplia a capacidade de transferência de potência entre os terminais da mesma. Este é o motivo principal da aplicação de capacitores série em longas linhas de transmissão. Ou seja, além de melhorar a regulação de tensão e a estabilidade do sistema ele aumenta a capacidade de transferência de potência da linha.

Este conceito pode ser demonstrado usando um sistema simples com dois barramentos sem perdas. Mantendo fixa a tensão, a potência ativa é dada por:

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

Onde X é a reatância da linha de transmissão. Contudo este valor de X poderia ser reduzido com a inserção do capacitor série, neste caso a reatância poderia ser representada como:

$$X_{novo} = X - X_{CS} \quad (4)$$

A potência transferida no sistema é dada pela curva PV, e conforme apresentada acima, a utilização do capacitor série reduz a reatância da linha, aumentando a capacidade de transmissão.

De acordo com esta teoria pode-se demonstrar a melhora do fluxo de potência através da análise do sistema em estudo.

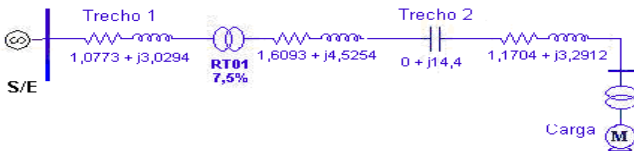


Figura 17 – Diagrama unifilar adotado para o cálculo da curva PV

A Figura 17 apresenta o diagrama unifilar do sistema em estudo com as respectivas impedâncias de cada trecho.

A curva PV do sistema com o CSM instalado, considerando as expressões 1 e 2, é mostrada na Figura 18. Nota-se que há um aumento significativo na potência transferida pelo sistema com a utilização da compensação série, que favorece a partida e funcionamento dos MIT.

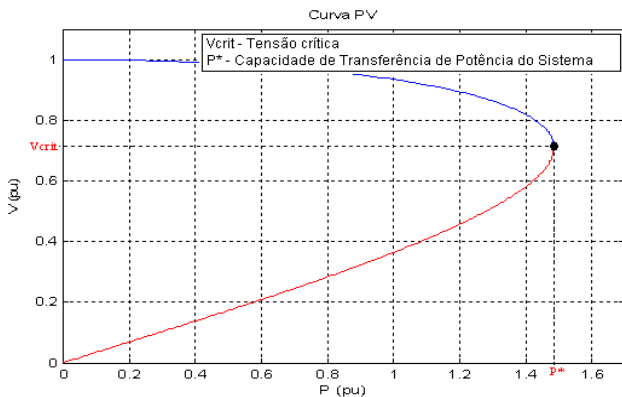


Figura 18. Curva PV para a linha com CSM.

O limite máximo de transferência de potência é superior ao dobro do limite máximo obtido para o sistema sem a utilização do CSM (figura 16). Agora o sistema passa a ter margem de estabilidade de aproximadamente 45%. De acordo com esta análise pode-se concluir que a utilização do CSM aumenta a transferência de potência proporcionando maior estabilidade ao sistema para que pudéssemos operar todas as cargas motrizes conectadas ao alimentador.

VII. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CSM

A energização deste sistema foi realizada sob condições normais de operação. A figura 19 apresenta o resultado do monitoramento da tensão na entrada do CSM.

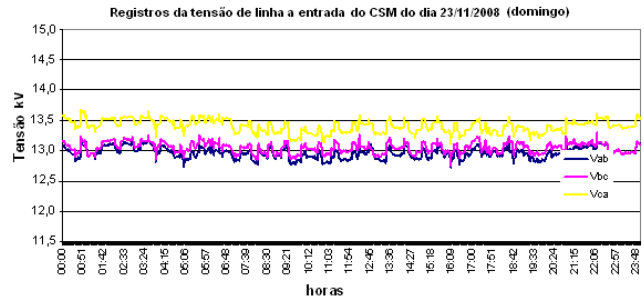


Figura 19 Resultado do Monitoramento da Tensão na entrada do CSM

A figura 20 e 21 apresenta o resultado do monitoramento da tensão na saída do CSM, comparando os resultados para dias úteis e fins de semana.

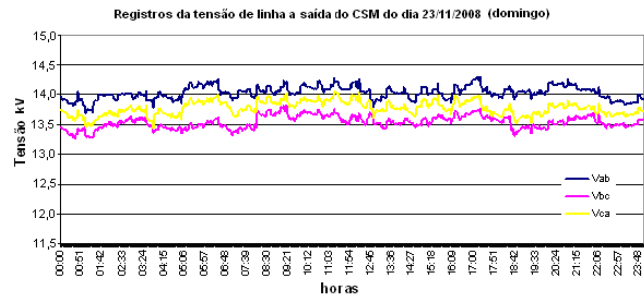


Figura 20 Resultado do Monitoramento da Tensão na saída do CSM

Os resultados apresentados neste trabalho constataram a eficiência do CSM. Comparando os resultados obtidos nas figuras 19 e 20 nota-se o ganho de tensão obtido com o CSM. Além de regular a tensão no alimentador aumentou a estabilidade do sistema elevando o nível de curto circuito nos pontos de instalação das cargas, desta forma possibilitando a entrada de operação de todas as cargas motrizes do cliente, fato que não ocorria antes da instalação do CSM.

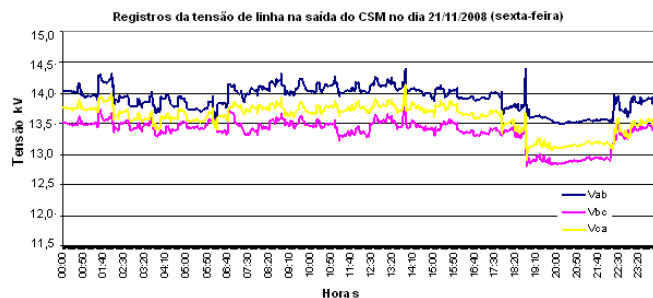


Figura 21 Resultado do Monitoramento da Tensão na saída do CSM

A figura 21 apresenta o resultado do monitoramento da tensão na saída do CSM em uma sexta-feira, nota-se na figura que ocorre uma queda de tensão durante o horário de ponta, isto ocorre porque os motores são desligados reduzindo o ganho de tensão do CSM.

O CSM operou durante o segundo semestre de 2008 sendo retirado do sistema em dezembro/2008 em virtude da entrada em operação da SE Colômbia 2. Estão sendo realizados estudos para realocar o banco, ou parte dele, para outro ponto do sistema elétrico da CPFL.

VIII. COMPENSADOR SÉRIE MODULAR – RECOMENDAÇÕES

Apesar do PD-96 ter se proposto a desenvolver um padrão de compensador série modular, que possa ser instalado em

qualquer ponto do sistema primário de distribuição da CPFL – Piratininga, com problemas de regulação de tensão; alguns cuidados especiais devem ser tomados na hora da escolha do ponto e do dimensionamento da reatância capacitiva do CSM, principalmente no que se refere a:

A. Análise da possibilidade de ocorrência de Ferroressonância.

Devem ser feitas simulações considerando as condições transitórias de energização da linha. Quando um transformador a vazio é energizado, as correntes de energização podem permanecer momentaneamente com valores significativos e superiores aos valores nominais, pois estes dependem das condições do núcleo e operativas do sistema. A condição crítica ocorre quando a energização é feita com a tensão próxima ao nível zero. Neste caso, os harmônicos preponderantes são os pares de baixa ordem, com forte saturação do meio magnético, o que favorece a condição de ressonância não-linear, podendo ser estabelecidas correntes sub-harmônicas e oscilatórias. Este fenômeno, chamado de ferroressonância, pode gerar níveis de tensão bastante elevados. [4]

B. Auto-Excitação de MIT com ocorrência da RSS

O campo elétrico do sistema elétrico com o CSM energizado pode interagir com campo magnético dos MIT – Motores Trifásicos de indução. Esta interação pode resultar num circuito ressonante série, principalmente quando há sobrecompensação da linha, pois a reatância capacitiva resultante pode ressonar com a reatância indutiva dos MIT em uma determinada condição de acionamento dos mesmos. Portanto, numa linha onde há predominância de motores devem ser feitos estudos dos transitórios, considerando a energização dos motores, para verificar a possibilidade da ocorrência de Ressonância Subsíncrona (RSS) [4] e [10].

C. Proteção contra sobre corrente

Sempre deve se considerar que, para qualquer configuração proposta, o CSM trabalha em conjunto com a proteção da linha. Em função disto deve avaliar se os ajustes de sobrecorrentes da chave religadora a montante do CSM, se existir, ou dos relés do disjuntor do alimentador, estão parametrizados para que a primeira operação ocorra na curva instantânea. Ou seja, permita a operação da chave religadora ou do disjuntor antes de 500 ms, quando o CSMU é composto apenas por capacitores, ou 100 ms, quando o CSMU for composto pela associação de capacitores e varistores.

IX. CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do PD-96 “Novos Sistema de Compensação Reativa - Compensador Série Modular - CSM”, a CPFL espera viabilizar uma nova tecnologia de compensação reativa série, para ser agregada aos critérios de planejamento da expansão e da operação, visando atender seus clientes, dentro dos níveis de tensão estabelecidos pela ANEEL, com menores investimentos, e com maior eficiência.

Apesar de ainda não estar concluído, o projeto já trouxe benefícios, pois o primeiro protótipo, instalado distante da subestação, num ponto de concentração de cargas de um dos alimentadores do sistema de 13,8 kV da CPFL, resolveu um sério problema de regulação de tensão. Naquele ponto, os equipamentos de regulação de tensão tradicionais não conseguiam manter a tensão regulada durante a partida dos 61 MIT existentes no sistema de irrigação de uma fazenda de um grande consumidor da CPFL. Antes da instalação apenas 40 MIT conseguiam partir e com a instalação do CSM-01, todos os motores conseguiram entrar em operação adequadamente.

Como está previsto para 2009 a entrada em operação de SE nova, próximo da referida fazenda, o CSM-01 poderá ser removido e aproveitado em outro ponto do sistema de distribuição da CPFL, em virtude dos requisitos técnicos do CSM.

O desenvolvimento do CSM-2 está em fase final de desenvolvimento. Sendo que as diferenças principais entre esse e o CSM-1 são: (1) o nível da tensão do sistema de distribuição, o CSM-1 foi instalado no sistema de 13,8 kV e o CSM-2 será instalado no sistema de 23 kV; (2) para o CSM-1 a configuração do conjunto de CSMU se mostrou mais vantajosa, em termos de custo, utilizando apenas capacitores que suportassem a tensão proporcionada nos capacitores, com a circulação da máxima corrente de curto-circuito, enquanto a configuração do conjunto de CSMU do CSM-2 se mostrou mais vantajosa utilizando a configuração com capacitores e varistores, no caso foram utilizados 3 capacitores e 7 varistores, isto deveu-se ao nível de curto circuito mais elevado encontrado no sistema de 23 kV.

A CPFL pretende avaliar o desempenho dos dois tipos de CSM desenvolvido, para depois definir se adota um único padrão, tanto para o 13,8 como para o 23 kV, ou se adota um padrão considerando cada nível de tensão. O padrão, ou os padrões, adotados deverão ser ensaiados em órgãos certificadores reconhecidos.

Com equipamentos padronizados, robustos, adequados, seguros, que tenham custos pré-definidos, e possuem certificação, será possível utilizar o CSM como uma alternativa técnica segura para o Planejamento da Expansão e Operação da Distribuição, para todas as Concessionárias do Brasil, quebrando com isto os paradigmas que dificultaram o uso desta tecnologia.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Marafão F. P.; Camargo J.; Zanetti E.R.; Jr Souza R.A. “Capacitor Série como Alternativa de Investimentos para a Expansão da Distribuição” - XVI SENDI - Brasília - 2004.
- [2]. MARTINS, W.B., J. Camargo, M. Suzuki, D.J. Ferreira, e G.P. Caixeta. Relatório técnico CPFL – Novo sistema de compensação Reativa Série Modular– PD96, outubro, 2007.
- [3]. OLIVEIRA, H.R.P.M., C.E.C. Figueiredo, N.C. de Jesus. Operação de Sistemas de Compensação Série em Alimentadores de Média Tensão. Eletricidade Moderna, outubro, 2004.
- [4]. JESUS, N. C. de; Torres, A. O. ; Moor Neto, J. A. ; Oliveira, H. R. P. M. ; Figueiredo, C. E. C. ; Libano, F. B. ; Braga, Rodrigo A. M. . Considerações sobre Aplicação de Compensação Série em Sistemas de Distribuição Visando Melhorias na Qualidade de Energia. V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2003, Aracaju, 2003.
- [5]. H. R. P. M. de Oliveira & C. E.C. Figueiredo &N.C. de Jesus "Resultados Obtidos na Operação de Sistemas de Compensação Série

em Alimentadores de Média Tensão da AES Sul" XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI 2002.

- [6]. Garcia, F. R. And Mello, G. S., "Compensação Série em Sistemas de Distribuição e Subtransmissão: Novas Tecnologias de Controle e Proteção". XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas-SP, 21 a 26 de outubro de 2001.
- [7]. MISKE, S.A. Considerations for the Application of Series Capacitors to Radial Power Distribution Circuits. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April, 2001.
- [8]. LARSSON, L. O.; LOMBARD, J. J.; SAMUELSSON, J.; ALLARD, G.; BERNECHE, P.; "Application of a New Concept for a Compact Series Capacitor Scheme for Distribution Networks". Canadian Electrical Association, 1995, Vancouver.
- [9]. HEDIN, J.S. & L. H. Paulsson. Application and evaluation of a new concept for compact series compensation for distribution networks. 12th International Conference on Electricity Distribution. vol. 1. Birmingham, UK, May 17–21 1993, Conf. Publ. no. 373, pp. 1.22/1–5.
- [10]. C.F. Wagner., "Self-excitation of Induction Motors with Series Capacitor Series Capacitor" AIEE Transactions, vol.60, 1941, pp.1241-1247
- [11]. Alcântara, M. V. P. "Estudo de Impactos na Estabilidade de Tensão Utilizando Curvas PV".