



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

LUIZ FELIPE COUTO RODRIGUES FRANÇA

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO SVC (SWITCH VAR COMPENSATION)
EM SISTEMAS DE SUBTRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Caraúbas/RN
(2015)

LUIZ FELIPE COUTO RODRIGUES FRANÇA

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO SVC (SWITCH VAR COMPENSATION)
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Projeto apresentado ao Conselho do Curso de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Max Chianca Pimentel Filho
Coorientador: Antônio Alisson Alencar Freitas

Caraúbas/RN
(2015)

LUIZ FELIPE COUTO RODRIGUES FRANÇA

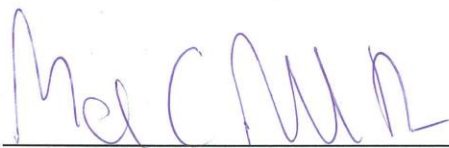
**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO SVC (SWITCH VAR COMPENSATION)
EM SISTEMAS DE SUBTRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado a Universidade Federal Rural
do Semi-Árido – UFERSA Campus
Caraúbas, para obtenção do título de
bacharel em Ciência e Tecnologia.

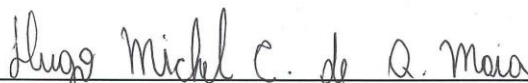
Orientador: Prof.^o Dr. Max Chianca
Pimentel Filho – UFERSA.

APROVADA EM: 04/12/2015

BANCA EXAMINADORA



Prof.^o Dr. Max Chianca Pimentel Filho – UFERSA
Presidente



Prof.^o Dr. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia – UFERSA
Primeiro Membro



Prof.^a Dra. Tania Luna Laura – UFERSA
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua bondade e por me conceder sabedoria para que pudesse desenvolver o presente trabalho.

Aos meus pais, Joseli França e Reinaldo Couto Rodrigues, por me ensinarem que o melhor caminho a se tomar é o da educação, sempre me incentivando, apesar da distância em que nos encontramos, após o início de minha vida acadêmica.

Aos meus tios, Geraldo Dantas Mestrinho e Rosilda Couto Rodrigues, que me proporcionaram a entrada na universidade, e sempre que precisei, estavam prontamente dispostos a me ajudar.

Aos meus orientadores, Max Chianca Pimentel Filho e Antônio Alisson Alencar Freitas que acreditaram em mim e me ajudaram grandemente no trabalho, com paciência e disponibilidade.

Aos professores da banca, Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia e Tânia Luna Laura pela participação e contribuição no trabalho.

A todos os meus amigos que estiveram comigo nessa caminhada até aqui - sem citar nomes por ser muitos - com eles foi possível superar a desconfiança, a saudade de estar longe de casa, fazendo com que eu tivesse forças para estar agora concluindo o bacharelado em Ciência e Tecnologia.

RESUMO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica têm crescido continuamente e a exigência dos consumidores da mesma forma. Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem o papel de fiscalizar as empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia elétrica de modo que seus serviços estejam dentro dos padrões mínimos exigidos. Neste contexto, as empresas de energia elétrica investem em tecnologia de modo que possam fornecer energia com qualidade e com preço competitivo. O *Switch Var Compensation* (SVC) é um desses equipamentos nas últimas duas décadas com o desenvolvimento da eletrônica de potência, na qual elementos no estado sólido passaram a ser utilizados em alta tensão.

Com o SVC é possível fornecer potência reativa capacitiva e indutiva de modo contínuo, dentro das limitações do equipamento. Anteriormente, apenas os motores síncronos tinham essa propriedade, porém além de um custo elevado, ocupam muito espaço nas subestações. Este trabalho tem como objetivo fazer uma apresentação do modo de funcionamento do SVC e simular o seu funcionamento em um sistema real de modo que se possa verificar seus benefícios.

Palavras-Chave: SVC, linhas de transmissão, fluxo de potência.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01: Fluxo de Potência na barra	7
FIGURA 02: Método de Newton-Raphson	10
FIGURA 03: Comportamento do SVC.....	17
FIGURA 04: Exemplo de um SVC	17
FIGURA 05: Ondas V_{entrada} , gatilho e V_{carga}	18
FIGURA 06: Exemplo de TSC	19
FIGURA 07: Exemplo de TCR	20
FIGURA 08: Controle do SVC	21
FIGURA 09: Detalhamento do controle	21
FIGURA 10: Representação de um sistema de distribuição real	23
FIGURA 11: Injeção do SVC no programa Scilab	26
FIGURA 12: Convergência das barras 1 e 2 a SVC -60MVA.....	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 LINHA DE TRANSMISSÃO	7
2.2 FLUXO DE POTÊNCIA	9
2.3 SVC (COMPENSADOR DE REATIVOS)	16
2.3.1 Tiristores	18
2.3.2 Banco de capacitores (TSC)	19
2.3.3 Banco de indutores (TCR)	20
2.3.4 Controle do SVC	21
2.3.5 Filtro sintonizado	21
2.3.6 Vantagens e desvantagens	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5. CONCLUSÃO	27
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parte da geração de energia é advinda das hidrelétricas, que normalmente ficam distantes dos centros consumidores, o restante é gerado por termelétricas, parques eólicos, usinas nucleares, biomassa e parques solares. Independente de como ela é gerada, ela terá que ser transmitida até os centros consumidores. Para esta tarefa existe um complexo sistema de linhas de transmissão e subestações, de modo que a energia chegue aos consumidores com segurança e de forma econômica.

As subestações têm a função de elevar e abaixar a tensão do sistema de modo conveniente. Normalmente, a geração é feita a uma tensão de 13,8 kV e transmitida em uma tensão variando entre 138kV até 750 kV. São necessários valores altos de tensão para que se possa transmitir grandes blocos de potência com baixa corrente e assim diminuindo as perdas nos condutores.

As linhas de transmissão têm o papel de transportar esta energia de um ponto a outro. Seja para interligar as gerações com as os grandes centros consumidores, até chegar nas nossas residências, formando milhares de quilômetros de fios de condução de energia.

Quando se transmite potencia por corrente alternada, vão existir dois tipos delas, a potência ativa e a reativa. A potência ativa é a que realiza trabalho (motriz, iluminação, aquecimento, etc.), já a reativa é responsável pelos campos eletromagnéticos do sistema, não realizando trabalho. A potência reativa pode ser gerada pelas usinas, e transmitidas até o ponto de consumo, como também pode ser gerada por capacitores, indutores, máquinas síncronas, entre outros. Portanto, para evitar que a potência reativa seja transmitida da geração até o ponto de consumo, é interessante instalar-se esses equipamentos perto do ponto de consumo.

Como o sistema é dinâmico, não se sabe de antemão quanto de potência reativa deve-se injetar no sistema a cada momento, portanto o ideal é se ter fontes variáveis de potência reativa, de modo que ela só injete o necessário para cada momento.

Uma das maneiras de se maximizar a transmissão é através de um dispositivo FACTS, que são dispositivos que controlam o fluxo de potência de um determinado circuito. Existem diversos deles que podem ser empregados, mas entraremos apenas no mérito do SVC (*Switch VAR Compensation*).

O nome deste dispositivo é assim dado pois ele é um circuito chaveado que consegue controlar a injeção de potência reativa sendo ele indutiva ou capacitiva, dentro dos seus limites de operação. Desta forma, em caso de linhas de transmissão, o SVC poderá fornecer potência reativa capacitiva nos períodos de alto carregamento, diminuindo as perdas e elevando os valores de tensão. Como também poderá fornecer energia reativa indutiva nas horas de carga leve onde, no caso de linhas longas, as tensões terminais podem ser maior que a da geração.

O SVC é um equipamento que vem sendo bastante desenvolvido recentemente, em busca de ser aperfeiçoado, uma vez que no seu princípio apenas consistia em um banco de reativos, capacitores e indutores, o qual não se podia ter um fracionamento, de modo em que ora se injetava mais de um ou outro, dependendo da necessidade da linha. Atualmente, é possível a dosagem desses reativos de modo a se limitar tanto a uma potência máxima ou mínima.

No SVC basicamente tem-se um capacitor em paralelo a um indutor regulável, de modo que a soma de ambos forme uma carga que possa ser capacitiva ou reativa, dependendo do que o meio se pede. Nele há também um filtro sintonizado, que pode ser composto por um indutor e um capacitor em série além de um tiristor, de modo que esse filtro atue como um compensador estático. A consequência do SVC é que também se tenha uma menor potência reativa no sistema, maximizando assim, a energia utilizada no sistema.

A fim de verificar a eficiência do SVC em sistemas reais utiliza-se o cálculo de fluxo de carga, simulação matemática que permite a solução do sistema de equações após aplicar as leis de circuito no sistema. No caso deste trabalho utilizaremos o método de Newton Raphson para solução do conjunto de equações. Analisando os seus resultados poderá se verificar o estado do sistema como tensão nas barras e correntes nas linhas e avaliar a influência do SVC no sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LINHA DE TRANSMISSÃO

Segundo Zanetta (2005), em uma linha de transmissão, há perdas devido ao efeito joule gerado pela passagem de corrente pelos fios condutores da linha. A resistência que o material do fio tem, provoca um aquecimento nesses fios com a passagem da corrente, o que gera perdas de potência no sistema. As linhas interligam as barras do sistema, possuindo uma impedância denominada Z , que é a resistência do fio, e a sua indutância, que é a razão do fluxo S que dá pela passagem de corrente pelo fio, com a intensidade em que esta corrente se desloca.

No estudo de fluxo de potência, podemos observar alguns agentes que alteram o fluxo inicial que lhe foi atribuído. Mas para fins de cálculo e tendo o presente trabalho como ênfase o estudo do SVC, será demonstrado a linha de transmissão de uma rede elementar, como segue a figura abaixo:

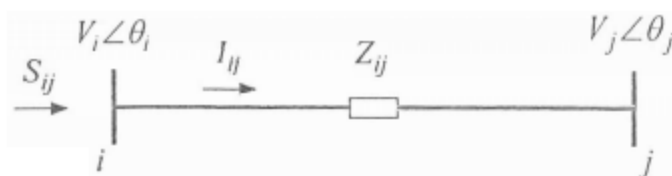


Figura 01: Fluxo de Potência na barra (Fonte: Zanetta Júnior).

O fluxo de potência S_{ij} , é determina pela primeira lei de Kirchhoff, de modo que seja:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \cdot \text{_____} (01)$$

É possível notar que se o fluxo vem no sentido j-i, seu sinal seria o oposto de S_{ij} , tal que:

$$S_{ij} = -S_{ji} \cdot \text{_____} (02)$$

Pelo fato de se ter a carga Z_{ij} entre as barras da linha estudada, é correto afirmar que há uma perda de tensão conforme é adicionada uma barra no sistema, enquanto, nota-se também que a corrente nos casos de linha de transmissão são as mesmas. De modo a se expressar da seguinte forma:

$$V_i < \theta_i \neq V_j < \theta_j. \text{_____} (03)$$

A potência que passa pela barra é dada por:

$$P - jQ = I^k V^k, \text{_____} (04)$$

O qual k é número da barra na linha de transmissão que foi verificada. Mas como a tensão tem uma fase θ_i , o seu valor será o conjugado, o que torna a equação deste modo:

$$P - jQ = V_k^* \times I^k, \text{_____} (05)$$

E ainda para uma barra i qualquer, de modo a se determinar as respectivas potências, têm-se:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \times I_i, \text{_____} (06)$$

Pode-se reescrever também a corrente I_i , partindo da lei dos nós na linha, de modo a obter um somatório de ordem n. Assim:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j, \text{_____} (07)$$

Substituindo, portanto, conclui-se que:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j, \text{_____} (08)$$

A carga i pode ser a representação de uma cidade ou de uma subestação, por exemplo. Para o caso da subestação a carga que se tem é nula, que implica dizer que permanece inalterada os valores de tensão e corrente. Já no caso de uma cidade, examinada em uma barra k, como há um consumo de potência, a tensão da barra k+1 será menor, e para se determinar os novos valores, temos que estudar o cálculo de fluxo de potência.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA

“O estudo de fluxo de potência é importante para a determinação do estado da rede e da distribuição dos fluxos, representada por equações algébricas” (MONTICELLI, 1983). É através do cálculo de fluxo de potência que se verifica a necessidade de potência de um dado meio estudado.

Suas equações são encontradas através do estudo de correntes de uma linha e suas carga, afim de se determinar as potências ativa e reativa denominadas respectivamente por P e Q. É a determinação das potências que serão necessárias para a escolha do melhor funcionamento do SVC.

Mas como num sistema de fluxo de carga real há várias ramificações - podendo ser uma subestação ou uma cidade, por exemplo – encontra-se equações não lineares, o que causa a necessidade de encontrar as incógnitas através de métodos numéricos. Há vários métodos disponíveis que darão os mesmos resultados, mas o presente trabalho irá se utilizar do método de Newton-Raphson, o método mais comumente utilizado na literatura.

Esse método, também conhecido por método das tangentes, consiste através de uma função predeterminada, utilizar-se de sua tangente (derivada primeira) para que haja uma interpolação e consequentemente, ter em mãos o resultado desejado. Para a primeira interpolação, utiliza-se de um valor aleatório, de modo que vai se interpolando, encontra-se um valor de erro que seja menor do que o erro preestabelecido, denominado ε .

A partir do conceito de derivada, temos:

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}, \text{ _____ (09)}$$

A derivada também pode ser descrita da seguinte maneira:

$$\Delta f(x) = \frac{df(x)}{dx} \Delta x. \text{ _____ (10)}$$

Tomando a variação $\Delta x = x_1 - x_0$, teremos assim:

$$x_1 - x_0 = \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^{-1} [y - f(x_0)], \text{ _____ (11)}$$

Ou ainda:

$$x_1 = x_0 + \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^{-1} [y - f(x_0)]. \quad (12)$$

Uma vez determinado x_1 , de maneira análoga temos x_2 :

$$x_2 = x_1 + \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^{-1} [y - f(x_1)]. \quad (13)$$

Como o fim da interpolação é dado pelo erro ε , a equação geral para uma forma k-esimal, seria:

$$x_{k+1} = x_k + \left(\frac{df(x)}{dx} \right)^{-1} [y - f(x_k)]. \quad (14)$$

O erro ε acima descrito, é dado por:

$$y - f(x_k) < \varepsilon. \quad (15)$$

O gráfico que representa o método de Newton-Raphson é:

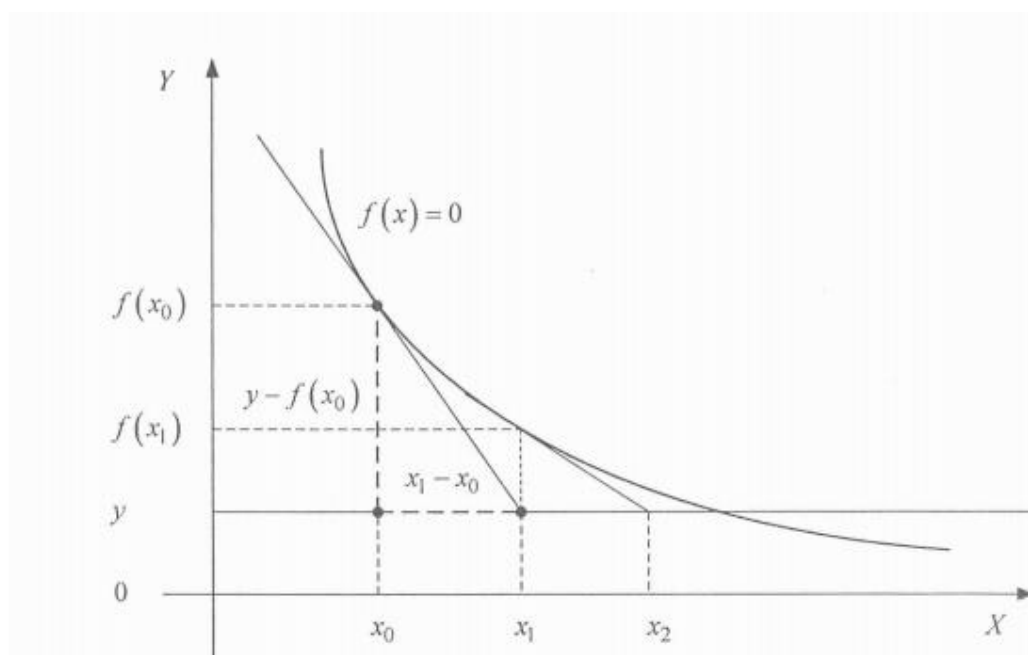


Figura 02: Método de Newton-Raphson (Fonte: Zanetta Júnior).

Agora que encontramos a forma geral, podemos verificar também para um sistema de equações, de modo que:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1, \quad (16)$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2, \quad (17)$$

⋮

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n. \quad (18)$$

Os pontos de interpolação serão dados a partir da série de Taylor:

$$\left[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} \right], \text{-----} (19)$$

Com isso, substituindo da eq.14, temos assim:

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n = y_1, \text{-----} (20)$$

$$f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Delta x_n = y_2, \text{-----} (21)$$

⋮

$$f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n = y_n, \text{-----} (22)$$

O sistema acima pode ser escrito na forma matricial da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}. \text{-----} (23)$$

A matriz derivada pode ser escrita de forma geral como matriz Jacobiana denominada [J]. Dessa forma, temos que o sistema de equações é formado por:

$$[\Delta f] = [J][\Delta x]. \text{-----} (24)$$

Finalmente encontrada, agora aplicaremos para o fluxo de potência em uma rede elétrica. Uma vez que a forma para rede elétrica é idêntica ao sistema demonstrado acima, sabe-se que o sistema de equações de um fluxo de potência é dado pela igualdade de uma função em termos de tensão e admitância, pelas potências ativa e reativa, de modo que matematicamente seja:

$$f_1(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) = P_1 - jQ_1, \text{-----} (25)$$

$$f_2(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) = P_2 - jQ_2 \text{-----} (26)$$

⋮

$$f_n(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) = P_n - jQ_n \text{-----} (27)$$

A função a ser descrita é a da lei dos nós, determinada a partir da passagem de corrente na linha de transmissão, eq.(08). Assim:

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* \sum_{j=1}^n Y_{1j} V_j, \text{-----} (28)$$

$$P_2 - jQ_2 = V_2^* \sum_{j=1}^n Y_{2j} V_j, \text{-----} (29)$$

⋮

$$P_n - jQ_n = V_n^* \sum_{j=1}^n Y_{nj} V_j, \text{---}(30)$$

Desta forma, temos de maneira semelhante a eq.24:

$$[J^{(k)}][\Delta V] = \Delta[P^{(k)}, Q^{(k)}], \text{---}(31),$$

A medida em que se isola a variação da tensão, tem-se:

$$[\Delta V] = [J^{(k)}]^{-1} \Delta[P^{(k)}, Q^{(k)}]. \text{---}(32)$$

Mas também é possível reescrever a admitância Y da eq.30, que inicialmente está na sua forma retangular, para a forma polar, de modo geral que:

$$Y_i = (G_{ij} + jB_{ij})e^{j(\theta_j - \theta_i)}, \text{---}(33)$$

Logo, substituindo, temos:

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} + jB_{ij}) e^{j(\theta_j - \theta_i)}, \text{---}(34)$$

Ou ainda, sabendo-se da relação da fórmula de Euler, o qual:

$$e^{j(\theta_j - \theta_i)} = \cos(\theta_j - \theta_i) + j\sin(\theta_j - \theta_i), \text{---}(35)$$

Assim:

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} + jB_{ij}) [\cos(\theta_j - \theta_i) + j\sin(\theta_j - \theta_i)]. \text{---}(36)$$

Realizando as devidas multiplicações:

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_j - \theta_i) - B_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i)], \text{---}(37)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [B_{ij} \cos(\theta_j - \theta_i) + G_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i)]. \text{---}(38)$$

Para uma melhor visualização, consideramos $\alpha = \theta_j - \theta_i$ de modo que:

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)], \text{---}(39)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [B_{ij} \cos(\alpha) + G_{ij} \sin(\alpha)]. \text{---}(40)$$

Uma vez encontradas as equações de potência P e Q, deve-se explorar a eq. 31, para que seja possível encontrar as devidas incógnitas. Para isso, é necessário também a montagem da matriz Jacobiana. A eq. 31 é:

$$[J^{(k)}][\Delta V] = \Delta[P^{(k)}, Q^{(k)}] \text{---}(31),$$

Na forma matricial, temos que:

$$\Delta[P^{(k)}, Q^{(k)}] = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}, \text{---}(41)$$

E também que:

$$[\Delta V] = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ V \end{bmatrix}, \text{---}(42)$$

Por fim, a matriz Jacobiana, a ser verificada:

$$[J] = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}. \text{---}(43)$$

O qual H, N, J e L são submatrizes da matriz principal (Jacobiana). Pelo fato de o Jacobiano ser um somatório de derivadas parciais, como deduzido anteriormente de ordem n, e ainda que temos duas equações que compõem a matriz potência, P e Q, é notório que a ordem do jacobiano é 2. A linha 1, composta pelas constantes H e N na matriz jacobiana, representam a eq. 39, enquanto a linha 2, composta pelas constantes J e L na matriz jacobiana, representam a eq. 40. Logo temos as devidas submatrizes:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix}, \text{---}(44)$$

$$N = \begin{bmatrix} V_1 \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & V_n \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ V_1 \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & V_n \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}, \text{---}(45)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P Q_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix}, \text{---}(46)$$

$$L = \begin{bmatrix} V_1 \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & V_n \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ V_1 \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & V_n \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}. \text{---}(47)$$

Apresentadas as submatrizes, calcularemos, portanto, as mesmas. Para a submatriz H, temos:

Para elementos da diagonal de H:

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i}, \text{---}(48)$$

Mas como substituído anteriormente a variável do ângulo, tem-se:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \alpha} \times \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i}, \text{---}(49)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} = \frac{\partial(\theta_j - \theta_i)}{\partial \theta_i} = -1, \text{---}(50)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial(\sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)])}{\partial \alpha} = \sum_{j=1}^n V_i V_j [-G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)], \text{---}(51)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j [-G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)] \times (-1), \text{---}(52)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) + B_{ij} \sin(\alpha)]. \text{---}(53)$$

Temos ainda que este somatório pode ser descrito por:

$$H_{ii} = -Q_i - V_i^2 B_{ij}. \text{---}(54)$$

Agora para elementos fora da diagonal de H:

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}, \text{---}(55)$$

Mas como substituído anteriormente a variável do ângulo, tem-se:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = \frac{\partial P_i}{\partial \alpha} \times \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_j}, \text{---}(56)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_j} = \frac{\partial(\theta_j - \theta_i)}{\partial \theta_j} = 1, \text{---}(57)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial(\sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)])}{\partial \alpha} = \sum_{j=1}^n V_i V_j [-G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)], \text{---}(58)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = - \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) + B_{ij} \sin(\alpha)]. \text{---}(59)$$

Agora, o mesmo para a submatriz N:

Para a diagonal de N, temos que:

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_i 2V_i G_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} [\cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)], \text{---}(60)$$

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + V_i^2 G_{ij}. \text{---}(61)$$

Para fora da diagonal:

$$N_{ij} = V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)]. \text{---}(62)$$

De forma análoga para a submatriz J:

Na diagonal de J, temos que:

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial \alpha} \times \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i}, \text{---}(63)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} = \frac{\partial(\theta_j - \theta_i)}{\partial \theta_i} = -1, \text{---}(64)$$

$$J_{ii} = - \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\alpha) - B_{ij} \sin(\alpha)], \text{---}(65)$$

$$J_{ii} = P_i - V_i^2 G_{ii}. \text{---}(66)$$

Por fim, os elementos da submatriz L, o qual para a sua diagonal:

$$L_{ii} = V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -V_i 2V_i B_{ii} - \sum_{j=1}^n V_j [B_{ij} \cos(\alpha) + G_{ij} \sin(\alpha)], \text{---}(67)$$

$$N_{ii} = Q_i - V_i^2 B_{ii}. \text{---}(68)$$

Apresentadas as equações é notório que:

$$H_{ij} = L_{ij} \text{ e que } J_{ij} = -N_{ij}. \text{---}(69)$$

Apresentadas as equações das barras de geração, deve-se verificar somente o tipo desta barra, que varia entre a barra *swing*, o qual deseja-se verificar as potências – caso deste trabalho -, ou barra PQ, onde deseja-se encontrar a tensão e sua fase a partir de uma potência conhecida.

2.3 SVC (Compensador de Reativos)

Apesar de ser um conceito antigo, o SVC passou a ser mais utilizado no final da década de 90, com o barateamento dos dispositivos eletrônicos (Tiristores) passando a ter um custo mais acessível e ser utilizado de forma mais constante em sistemas elétricos, de acordo com Zabur (1988). Portanto, apesar de existirem trabalhos mais antigos, seu maior número data aproximadamente a partir do ano 2000.

Ele tem como objetivo, ajustar os níveis de potência reativa em um sistema elétrico de potência direcionando o fluxo de potência, que pode ser gerado por diversos fatores, como por exemplo um consumo excessivo de consumo causado por um horário de pico, ou mesmo no caso de pouco consumo ajustar a potência acima citada.

Com esse direcionamento de fluxo, temos como consequência positiva uma maximização de energia, fazendo com que a energia produzida tenha um aproveitamento percentual mais eficiente, evitando assim que se construa ainda mais estações de energia e futuros gastos com usinas, reduzindo custos.

Normalmente a injeção de capacitivo na rede é feito através de bancos de capacitores e indutores chaveados, no qual um dos bancos estão ligados ou desligados, havendo uma injeção discreta de energia reativa (capacitiva ou indutiva) de acordo com o número de bancos chaveados através de soluções eletromecânicas tradicionais, como inicialmente descrito por Ridgway (1944). Posteriormente as técnicas de chaveamentos foram incorporando equipamentos eletrônicos e comandos via rádio, aumentando sua eficiência, como descrito em Hornak (1988).

Porém, apesar da evolução dos métodos de chaveamento eles continuavam injetando potência reativa na rede de modo discreto, inviabilizando injeções contínuas calculadas de acordo com a necessidade. A partir deste problema surgiu o SVC, descrito no trabalho de Zabur (1988). Os bancos de reativos variáveis são inicialmente descritos como na figura abaixo:

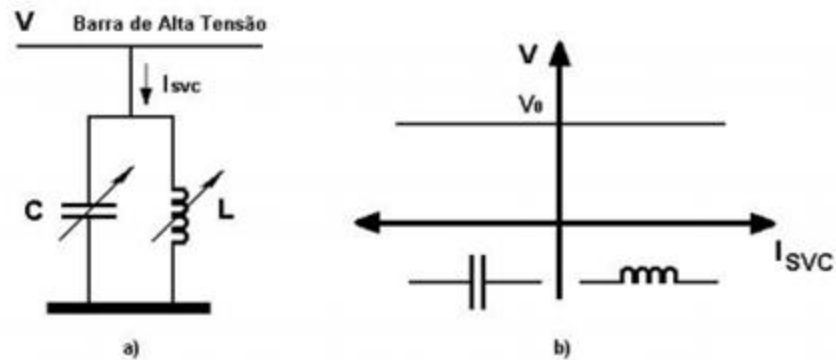


Figura 03: Comportamento do SVC (Fonte: Silva Júnior).

Os bancos de capacitores e indutores descritos anteriormente, são conectados ao sistema através de tiristores no qual é feito o controle do ângulo de chaveamento que se deseja injetar, dentro dos limites do equipamento, o valor ideal para a necessidade do sistema. Além disso deve-se ter também um filtro sintonizado ao sistema, de modo que se reduza os ruídos gerados por uma perda nessa transmissão. A figura abaixo, representa um tipo de SVC utilizado na presente pesquisa:

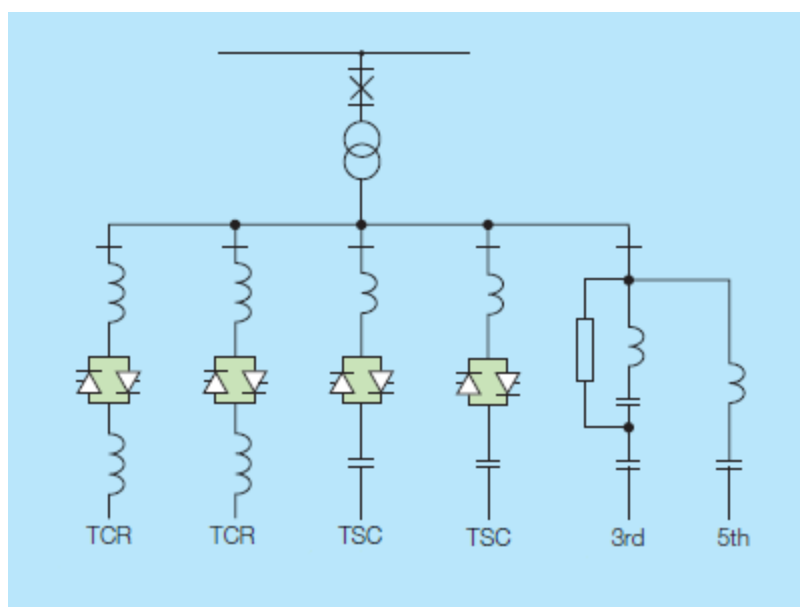


Figura 04: Exemplo de um SVC (Fonte: ABB).

2.3.1 Tiristores

Os tiristores são de grande importância para o ideal funcionamento do SVC. É esse dispositivo que regula a quantidade de reativos que se injetará na barra condicionada. Os tiristores são diodos que possuem um gatilho, o qual pode ser disparado de forma manual ou ainda, de forma predeterminada, esse disparo é dado através do seu ângulo de disparo, o qual pode variar de 0° a 90° , onde o ângulo de disparo a 0° é a injeção máxima, e ângulo de 90° não possui injeção como no livro de HART (2012).

Há várias formas de se projetar um combinado de tiristores, o que pode variar é a eficiência que se deseja obter no meio, ou também o preço do projeto. Para o SVC estudado, os tiristores foram combinados de modo que se aproveite a onda completa, representados paralelamente um ao outro, e contendo um par para cada ponte reativa do sistema.

A figura abaixo representa a estrutura da onda obtida com o paralelo de tiristores descrito acima:

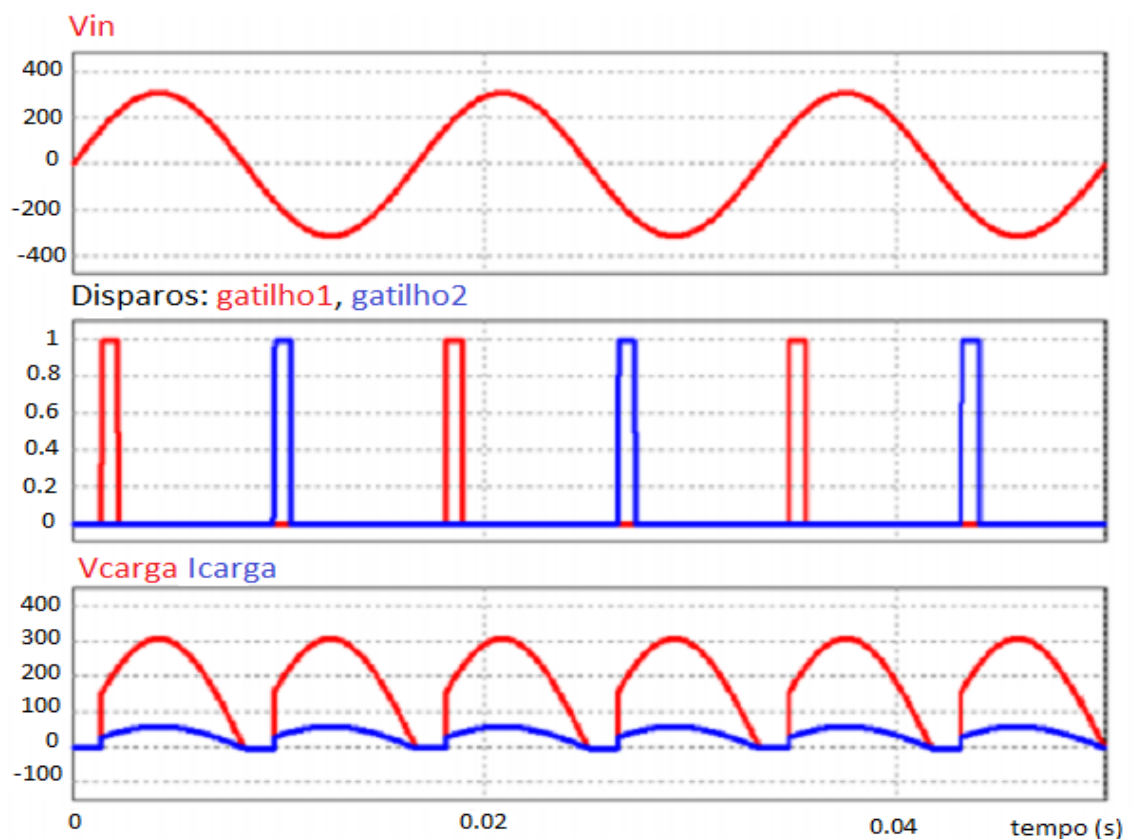


Figura 05: Ondas $V_{entrada}$, gatilho e V_{carga}

A primeira onda é a de tensão da barra. Um sistema de potência utiliza-se de corrente alternada, logo a onda senoidal representa V_{in} . A segunda onda é o tempo do gatilho, a partir de uma tensão predeterminada, aciona-se o gatilho, que precisa de milissegundos para que o tiristor permita a passagem de corrente no sistema. Já a terceira onda é a onda da tensão já retificada pelos tiristores dispostos em paralelo. Por ser um arranjo de onda completa, a imagem da onda fica inteiramente positiva, sendo decrescida apenas, pelo momento em que o gatilho leva para sua ativação, nesse breve tempo em que o gatilho ainda não está ativo, pode-se observar a corrente no meio igual a zero.

2.3.2 Banco de capacitores (TSC)

Os capacitores são os primeiros dispositivos a compor o SVC, inicialmente inclusive, eram apenas um banco de capacitores que faziam o papel de melhorar o sistema de potência quando havia uma sobrecarga. Mas diferente do SVC atual, não era possível dosar a quantidade de reativos que era injetada, o que não o tornava tão eficiente quanto esse dispositivo podia ser.

A sigla TSC vem do inglês *Thyristor Switched Capacitor*, que significa capacitores chaveados por tiristores. Essa configuração como característica reduzir a corrente na linha de carga, limitar os transitórios de chaveamento, amortecer as correntes de energização e prevenir ressonâncias com a rede, como explica (TARANTO, 2007).

O esquema mais simplificado de um TSC é dado como na figura abaixo:

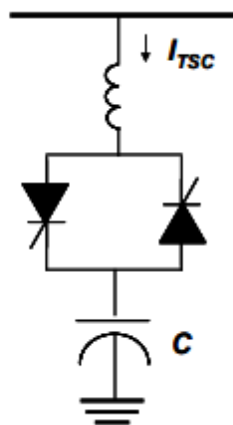


Figura 06: Exemplo de TSC (Fonte: Silva Júnior)

2.3.3 Banco de indutores (TCR)

Os indutores foram introduzidos ao SVC para que se pudesse ter um melhor balanceamento de reativos. A sigla TCR vem de *Thiristor Controlled Reactor*, uma vez que também é regulado pelo gatilho de um conjunto de tiristores.

O TCR também é importante em momentos de pouco consumo de energia pela carga, pois ao ser liberado o funcionamento de indutores no sistema, há um estímulo de corrente que mantém o sistema no momento em que a corrente se aproxima de zero, o que reduz a potência reativa absorvida, e agindo na forma de susceptância controlável, como dito por PEREZ, (2000).

Um TCR básico pode ser representado como na figura abaixo:

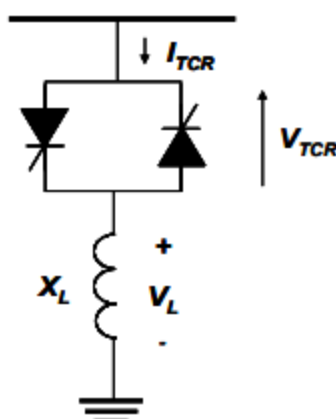


Figura 07: Exemplo de TCR (Fonte: Silva Júnior)

2.3.4 Controle do SVC

Como dito na seção 2.3.1, o tiristor possui um gatilho que regula o sistema que ativa os componentes do SVC, é composto por um sistema de medição, um regulador e um atuador. Esse sistema recebe os sinais de tensão e corrente da barra do circuito. O sinal da tensão é retificado e filtrado pelo sistema, logo após o sinal de tensão é comparado com uma tensão de referência preestabelecida.

Ao romper esse limite da tensão de referência, o sinal libera os tiristores, que conseqüentemente abre o SVC para a barra do circuito, fazendo assim, com que o sistema funcione como compensador de reativos na barra (TARANTO, 2007).

O sistema descrito é assim expresso:

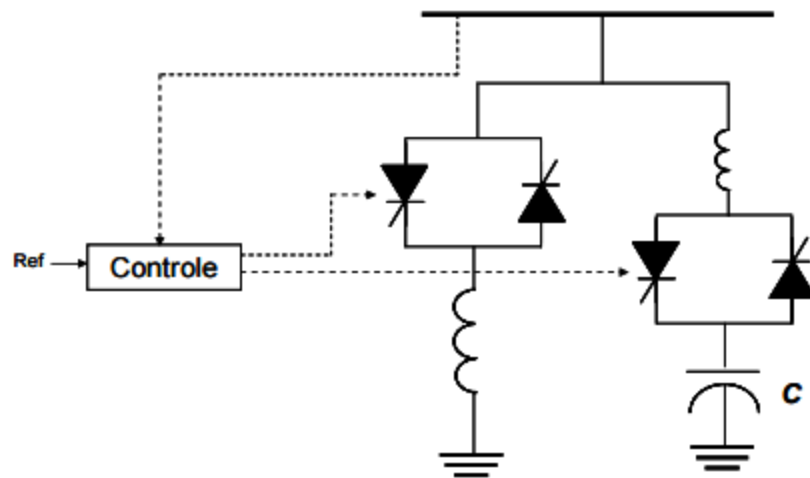


Figura 08: Controle do SVC (Fonte: Silva Júnior)

O detalhamento do controle se dá pela figura abaixo:

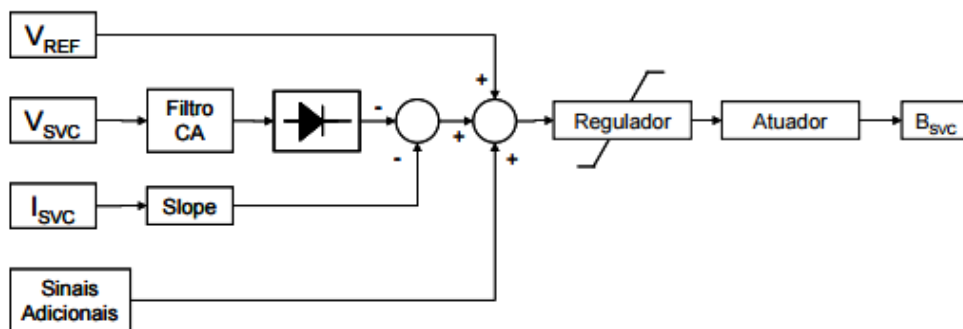


Figura 09: Detalhamento do controle (Fonte: Silva Júnior)

2.3.5 Filtro sintonizado

Para minimizar perdas e ruídos do sistema, é implantado ao SVC um filtro sintonizado que capta e corrige as ocorrências acima citadas. Um exemplo de perda é a causada pelo gatilho do tiristor, uma vez que ele leva um certo tempo para ser ativado, com a adição do filtro é minimizado esse problema com a onda da tensão em que é imposta no sistema.

Além dos ruídos de ressonância, causados no momento em que é acionado o SVC, devido aos dispositivos reativos que tendem a mudar a fase da onda da tensão em relação com a impedância da barra.

2.3.6 Vantagens e desvantagens do SVC

Uma das vantagens da utilização do SVC é o maior controle e direcionamento de fluxos de potência, uma vez que se pode dosar a quantidade de reativos que se deseja inserir no meio, corrigindo assim o fator de correção de potência do meio, como descrito no trabalho de Naturesa (2001). E como ele é ativado a partir de uma determinada tensão de referência, há também uma prevenção de quedas em cascata no sistema.

Outra vantagem é o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência, uma vez que o SVC possui um filtro sintonizado, que vem a corrigir problemas com ruídos na onda do sistema, como apresentado por Silva Junior (2008). Com a maximização do sistema, temos também que os níveis de transmissão de potência estão em um ponto próximo ao limite térmico.

A maior desvantagem e de maior relevância é o seu alto custo de instalação, “com um custo de operação entre U\$20 a U\$45 por KVAR”, como descrito em (ACHARYA, 2004). Além disso, há também o tempo que os tiristores levam para que o seu gatilho seja acionado, pelo fato de o sistema ser de alta potência, fazendo com que se perda assim uma pequena quantidade de energia, como mostra a figura da seção 2.3.1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a resolução dos circuitos elétricos, será utilizado um programa feito em Scilab, e será simulado um sistema real para verificar a ação do SVC. Foi verificada a influência do SVC na barra em que ele foi instalado, testando o a injeção de reativos no valor de 20MVA/-60MVA, variando a verificação de 10MVA de forma decrescente. Os resultados encontram-se na próxima seção em forma de tabela, o dispositivo foi inserido na segunda barra do sistema.

O sistema de distribuição estudado foi uma simulação de um sistema real, onde há as fontes de geração de energia, as linhas que interligam as barras até chegar nas residências. A figura abaixo representa o sistema descrito:

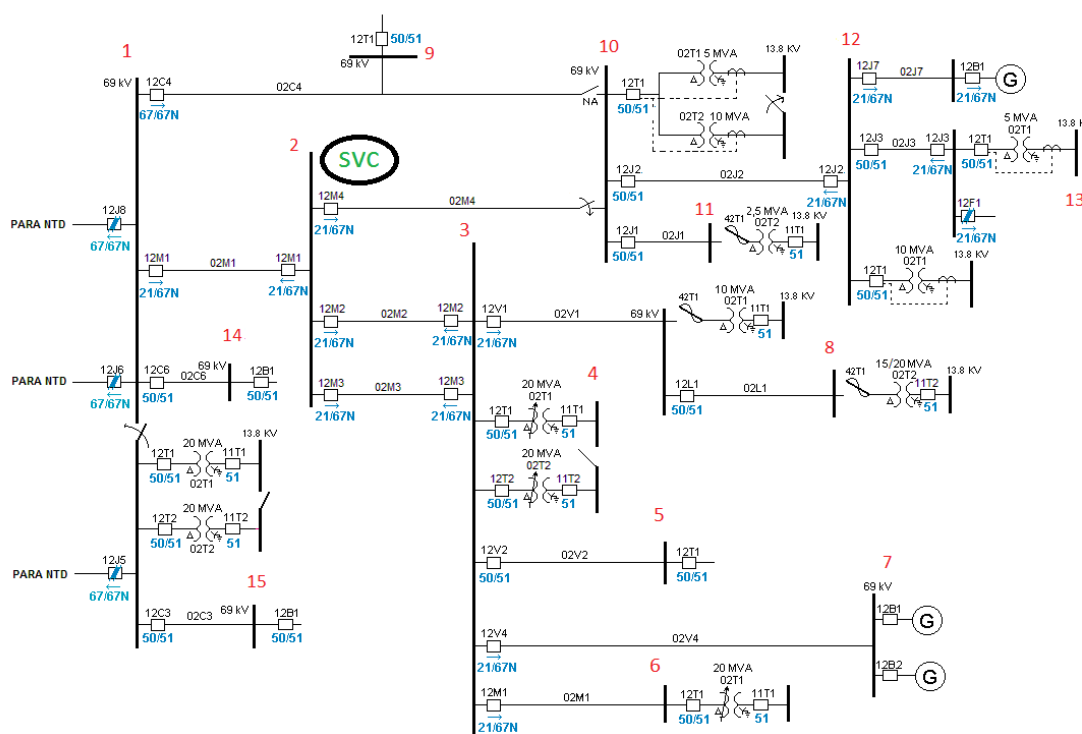


Figura 10: Representação de um sistema de distribuição real

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar o efeito do SVC em um sistema de potência foi elaborado em Scilab um programa computacional baseado no método de Newton no qual se pode analisar o efeito do regulador para mais de uma configuração. O sistema simulado foi uma regional real em 69 kV e 1,7 GVA que atende 10 cidades e 5 indústrias de grande porte, por questões de sigilo o nome das subestações serão substituídos e pequenas modificações realizadas.

No caso deste sistema, o SVC está conectado a barra de entrega da empresa transmissora de energia elétrica (barra 2 da figura 10). A tabela 01 mostra a evolução das perdas e do nível de tensão após a variação da potência reativa injetada.

S(svc) MVA	Perdas MVA	Perdas %	V(barra2) MV	S(sistema) MVA
20	0,1235	7,44	0,9452	1,7585
10	0,1191	7,17	0,9536	1,7551
0	0,1153	6,94	0,9617	1,752
-10	0,1119	6,74	0,9697	1,7493
-20	0,1089	6,56	0,9775	1,7469
-30	0,1062	6,4	0,9851	1,7447
-40	0,1039	6,25	0,9925	1,7428
-50	0,1018	6,13	0,9998	1,7412
-60	0,0999	6,02	1,007	1,7397

Tabela 01: Resultados SVC.

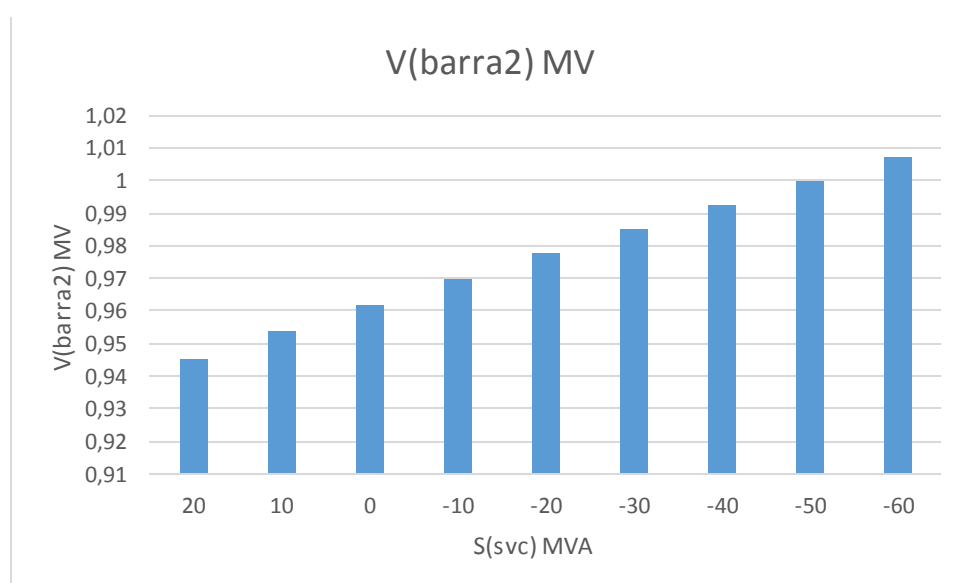


Tabela 02: Ganho na barra onde foi instalado o SVC.

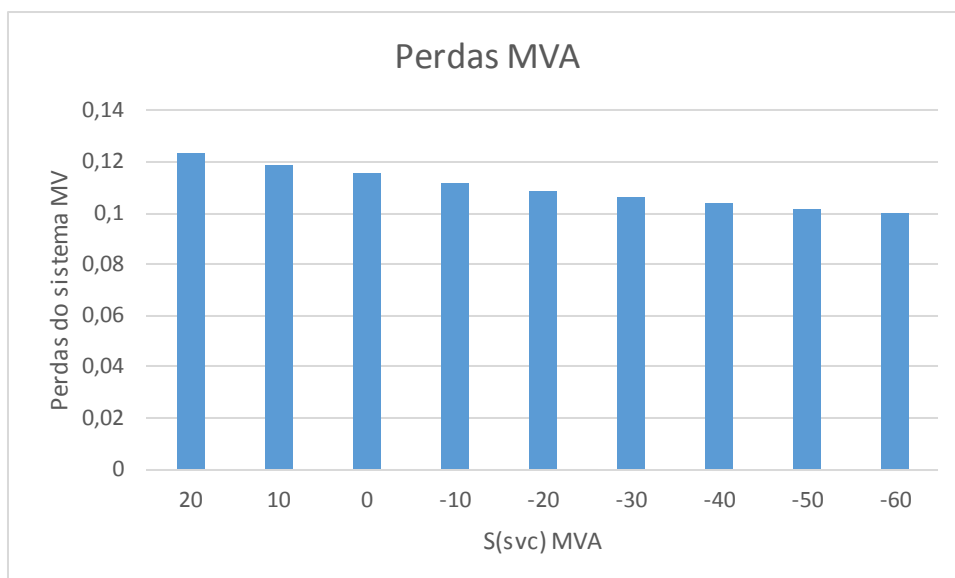


Tabela 03: Minimização da perda ao ser injetado capacitivos.

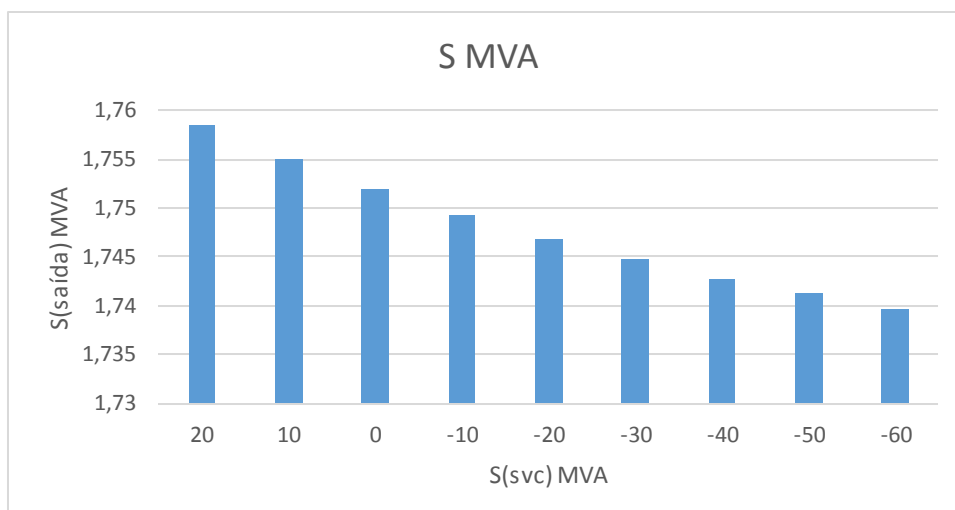


Tabela 04: S saída após injeção de reativos

A partir dos dados obtidos, nota-se que a partir do momento em que é injetado no sistema o banco de capacitores, ou seja, o meu $S(svc)$ é negativo, as perdas no sistema diminuem, de modo que diminui também o fluxo do sistema dado por $S(sistema)$, enquanto a tensão na barra em que se encontra o SVC aumenta.

Note com uma injeção de 60 MVar capacitivo consegue-se controlar a tensão na barra 2. Também pode-se verificar que ao aumentar a injeção de energia reativa capacitiva, houve uma diminuição nas perdas passando de 7,44% da carga total do sistema para 6,02%. Como com a injeção de reativo capacitivo no sistema faz com que o nível de tensão aumente e como as cargas são modeladas como de potência constante, um aumento da tensão vem acompanhado com a diminuição da corrente, diminuindo-se as perdas por efeito Joule.

```

386 .....if TC==2 & i~=NCC & abs(B(i,1))>0.01 then
387 .....fp=1.0
388 .....O=acos(fp)
389 .....S=B(i,1)*1000*-(cos(O)+%i*sin(O))/(3*Sb)
390 .....
391 .....//Corrente constante
392 .....IL(i,1)=conj((S)/(Vpu(1,1)-Vpu(1,2)))+conj((S)/(Vpu(1,1)-Vpu(1,3)))
393 .....IL(i,2)=conj((S)/(Vpu(1,2)-Vpu(1,1)))+conj((S)/(Vpu(1,2)-Vpu(1,3)))
394 .....IL(i,3)=conj((S)/(Vpu(1,3)-Vpu(1,1)))+conj((S)/(Vpu(1,3)-Vpu(1,2)))
395 .....end
396 //
397 .....if TC==3 & i~=NCC & abs(Vpu(i,1)-Vpu(i,2)) & abs(B(i,1))>0.01 then
398 .....fp=1.0
399 .....O=acos(fp)
400 .....//disp(i)
401 .....S=B(i,1)*1000*-(cos(O)+%i*sin(O))/(3*Sb)
402 .....if i==2 then
403 .....S=-600000000*%i/(3*Sb)
404 .....//disp(S)
405 .....end
406 .....
407 .....
408 .....

```

Figura 11: Injeção do SVC no programa Scilab

Os resultados de tensão, para o reativo injetado acima serão:

```

Perdas totais = 0.099929      perdas percentuais = 6.019810
-->Vpu
Vpu =

1. - 0.5 - 0.8660254i - 0.5 + 0.8660254i
1.0070512 - 0.1222919i - 0.6094335 - 0.8109860i - 0.3976177 + 0.9332779i
0.9955922 - 0.1507073i - 0.6283125 - 0.7868545i - 0.3672798 + 0.9375618i
0.9936754 - 0.1553589i - 0.6313825 - 0.7828687i - 0.3622930 + 0.9382276i
0.9955922 - 0.1507073i - 0.6283125 - 0.7868545i - 0.3672798 + 0.9375618i
1.0035374 - 0.1304904i - 0.6147767 - 0.8038437i - 0.3887607 + 0.9343341i
0.9444523 - 0.2087122i - 0.6529763 - 0.7135636i - 0.2914760 + 0.9222758i
1.0033433 - 0.1308199i - 0.6149650 - 0.8035109i - 0.3883783 + 0.9343308i
1.0035374 - 0.1304904i - 0.6147767 - 0.8038437i - 0.3887607 + 0.9343341i
0.9996898 - 0.1403726i - 0.6214111 - 0.7955705i - 0.3782787 + 0.9359431i
0.9074445 - 0.2558261i - 0.6752741 - 0.6579569i - 0.2321703 + 0.9137830i
0.9955922 - 0.1507073i - 0.6283125 - 0.7868545i - 0.3672798 + 0.9375618i
0.9536114 - 0.1967370i - 0.6471849 - 0.7274832i - 0.3064264 + 0.9242202i
0.9377447 - 0.2051275i - 0.6465179 - 0.7095470i - 0.2912267 + 0.9146744i
0.8018604 - 0.3295519i - 0.6863305 - 0.5296556i - 0.1155299 + 0.8592074i
0.8018604 - 0.3295519i - 0.6863305 - 0.5296556i - 0.1155299 + 0.8592074i
0.7001042 - 0.4073535i - 0.7028306 - 0.4026313i - 0.0027264 + 0.8099848i

```

Figura 12: Convergência das barras 1 e 2 a SVC -60MVA

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi verificada as vantagens em se introduzir o dispositivo SVC em um sistema real de distribuição de energia, e no controle da tensão na barra em que está inserido o SVC.

Os resultados das simulações realizadas para o cálculo do fluxo de potência, feitas a partir do programa Scilab, foram introduzidas em forma de tabela e apresentadas nas figuras 11 e 12.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se a eficácia do SVC em sistemas reais de distribuição de energia, o qual reduziu as perdas no sistema na medida em que foi injetado capacitância na barra estudada. As perdas descritas anteriormente pelo efeito joule, por exemplo, que são comuns de ter em um sistema real, podem ser minimizadas com a introdução do dispositivo SVC no meio.

Para isso, liberou-se o banco de capacitores TSC, para se encontrar os devidos resultados de melhoria do sistema. Esses resultados são de importância no sentido de se evitar o desperdício de energia que foi produzida, importância maior em tempos de racionamento de energia e crise hídricas.

Implantado esse conceito, passa-se a um menor anseio de criação de novas usinas, uma vez que se há uma maximização da energia que já está sendo produzida. Com isso, conclui-se que a instalação do SVC é benéfica a operação do sistema, reduzindo as perdas e elevando as tensões para valores próximos aos nominais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. Extemoz **SVC for integration of wind power into a 230 kV grid**. Disponível em: <<http://new.abb.com/facts/references/reference-extremoz>> Acesso em: 13 de jun. 2015.

ACHARYA, N., **“Facts and Figures about FACTS”, Training Workshop on FACTS Application**, EPSM, Energy, Asian Institute of Technology, 16 dez. 2004.

BUTLER, J. W.; SCHROEDER, T. W.; RIDGWAY, W. **Electrical engineering: Capacitors, condensers and system stability**. v. 63, Issue:12, 1944. p.1130-1138.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projeto de Circuitos**. 7 Ed. Editora Mcgraw Hill, 2012.

HORNAK, D. L. Capacitor control relaying for switched capacitor banks. **Papers presented at the 32nd anual conference**, 1988. p. B6/1-B6/8.

PEREZ H. A., ACHA E., ESQUIVEL C.R. F., **“Advanced SVC Model for Newton-Raphon Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies”**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, fev. 2000.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. 1. Ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1983.

NATURESA, J. S. **A Influência de compensadores estáticos de reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, 2001.

SILVA JUNIOR, G. S. da. **Análise da influência de um compensador estático de reativos na operação de sistema elétrico industrial com cogeração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão São Luis, 2008.

SHMILOVITZ, D.; CZARKOWSKI, D.; ZABUR, Z. New switch-mode topology for VAR Compensation. **Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium**. v. 5, 1999. p. 98-101.

TARANTO G. N. “**Curso de Extensão – Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência**”, Apostila Curso ALUMAR, Rio de Janeiro, 2007.

ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. 1. Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.