CAPITULO 4

ANÁLISE DO COLAPSO DE TENSÃO PELA ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE PQ E PV

4.1 - Introdução

O fundamento teórico desta análise é a definição de estabilidade e controlabilidade PQ e PV, baseada em como as tensões nas barras de carga e gerações de potência reativa nas barras de geração devem reagir a mudanças de tensão nas barras de geração e mudanças de carga reativa nas barras PQ e PV [3].

Inicialmente toma-se o modelo linearizado resultante de todas as equações não-lineares de fluxo de carga, exceto a equação de balanço de potência ativa na barra *swing*:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & H_1 & I_1 & J_1 \\ G_2 & H_2 & I_2 & J_2 \\ G_3 & H_3 & I_3 & J_3 \\ G_4 & H_4 & I_4 & J_4 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \Delta\theta_G \\ \Delta\theta_L \\ \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Para esta análise, supõe-se uma variação de potência ativa igual a zero .

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & J_3 \\ I_4 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_3 & H_3 \\ G_4 & H_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_G \\ \Delta\theta_L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & J_1 \\ I_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 & H_1 \\ G_2 & H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_G \\ \Delta\theta_L \end{bmatrix}$$

Tirando dessa última relação $\Delta\theta_G$ e $\Delta\theta_L$:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_G \\ \Delta\theta_L \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_1 & H_1 \\ G_2 & H_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 & J_1 \\ I_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & J_3 \\ I_4 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_3 & H_3 \\ G_4 & H_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 & H_1 \\ G_2 & H_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 & J_1 \\ I_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3^* & J_3^* \\ I_4^* & J_4^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

onde a matriz com os elementos com asterisco, é o resultado das operações com as matrizes acima.

Explicitando ΔV nesta última relação, tem-se:

$$\Delta V = J_4^{*-1}\,\Delta Q_L - J_4^{*-1} I_4^* \Delta E \qquad \text{e então:}$$

$$\Delta Q_G = (I_3^* - J_3^* J_4^{*-1} I_4^*)\ \Delta E + J_3^* J_4^{*-1} \Delta Q_L$$

Definindo:

$$\begin{cases} S_{VE} = - J_4^{*-1}\ I_4^{*} \\ S_{QGE} = I_3^{*} - J_3^{*} J_4^{*-1} I_4^{*} \\ S_{QGQL} = - J_3^{*} J_4^{*-1} \\ S_{QLV} = J_4^{*} \end{cases}$$

S_{VE} fornece a variação de V em função da variação de E, ou seja, fornece a variação de tensão nas barras de carga, em função da variação de tensão das barras de geração.

S_{VE} tem as seguintes dimensões:

$$\begin{cases} \text{número de linhas} = \text{números de barras de carga} \\ \text{número de colunas} = \text{números de barras de geração} \end{cases}$$

S_{QGQL} fornece a variação de geração de potência reativa nas barras de geração em função da variação de carga reativa nas barras de carga.

S_{QGQL} tem as seguintes dimensões:

$$\begin{cases} \text{número de linhas} = \text{número de barras de geração} \\ \text{número de colunas} = \text{número de barras de carga.} \end{cases}$$

S_{QGE} fornece a variação de geração de potência reativa nas barras de geração, em função da variação de tensão nas barras de geração.

SQGE tem as seguintes dimensões:

$$\begin{cases} \text{número de linhas} = \text{número de barras de geração} \\ \text{número de colunas} = \text{número de barras de geração,} \end{cases}$$

sendo, portanto, uma matriz quadrada.

SQLV^{-1} fornece a variação de tensão nas barras de carga, em função da variação de carga reativa nas barras de carga.

SQLV tem as seguintes dimensões:

$$\begin{cases} \text{número de linhas} = \text{número de barras de carga} \\ \text{número de colunas} = \text{número de barras de carga,} \end{cases}$$

sendo, portanto, uma matriz quadrada.

4.1.1 - Montagem das Matrizes de Sensibilidade

Quando se quer montar a matriz Jacobiano para a resolução do fluxo de potência, algumas regras são obedecidas para facilitar essa resolução, a saber:

- Exclue-se as equações de potência reativa das barras PV, uma vez que a potência reativa gerada fica em aberto para que se possa manter o nível de tensão desejado.

- A equação de potência reativa na barra *swing* é excluída pela mesma razão, ou seja, fixa-se o valor da tensão e, para isso, deixa-se em aberto o valor da potência reativa gerada na barra.

- Como a barra *swing* é responsável pela balanço de potência ativa, sua equação de potência ativa também é excluída.

- Note-se que a razão pela qual da equação de potência reativa na barra *swing* ser excluída do Jacobiano, não é a mesma razão pela qual a equação de potência ativa é excluída. A equação de potência reativa é excluída pela mesma razão que as equações de potência reativa nas barras PV, ou seja, não é só ela a responsável pelo balanço de potência reativa do sistema, e sim todas as barras com capacidade de geração de potência reativa.

Conclui-se que se forem incluídas no Jacobiano todas as equações, menos a equação de potência ativa da barra *swing*, seria possível resolver o fluxo de potência, porém poderiam ser encontrados valores de tensão fora da faixa normal de operação, de forma que poderia ser impossível operar o sistema. Todavia, se fosse arbitrado o valor correto para a geração de potência reativa nas barras PV, seriam encontrados os valores de tensão dentro da faixa normal de operação. O que foi dito parte do princípio de que já se conhece o valor da geração da potência reativa quando, na verdade, este é um item que se deseja descobrir.

Para um determinado ponto de operação, se for arbitrado o valor correto de potência ativa gerada na barra *swing*, o mesmo que foi dito para as barras de geração de potência reativa poderia ser repetido para a barra *swing*. Contudo, a análise é feita através de uma pequena variação de carga e/ou geração de potência reativa. Isto vai provocar uma variação na potência ativa gerada na barra *swing*, razão pela qual essa equação é excluída.

Excluindo somente a equação de potência ativa da barra *swing*, permite-se obter dados sobre todas as barras, uma vez que essas matrizes de sensibilidade retratam o sistema completamente, como será mostrado posteriormente.

Deve-se notar também que, com variação de tensão nas barras PV e PQ, há uma mudança nas perdas de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, de forma que há alteração no balanço do sistema. A mudança de geração ativa na barra *swing* não viola o modelo proposto, que considera variação nula de potência ativa, já que essa equação não faz parte do modelo.

Note-se que ao zerar a variação de potência ativa, não se despreza o efeito causado na defasagem angular pela variação de tensão nas barras, ou seja, trabalha-se com o sistema completo (e não na forma desacoplada).

A partir dessas definições, pode-se estabelecer os conceitos de estabilidade e controlabilidade PQ e PV.

4.2 - Estabilidade PQ

A definição de estabilidade PQ é baseada no relacionamento causa/efeito que existe nas barras PQ, quando o sistema está sob condições normais de operação.

A variação da magnitude de tensão ΔV é assumida como sendo o estado PQ, a mudança de carga reativa ΔQ_L é assumida como sendo o distúrbio e, a mudança de tensão nas barras de geração ΔE é assumida como sendo o controle.

Definição:

Um sistema é dito PQ estável se:

- Quando $\Delta E = 0$, qualquer distúrbio positivo ΔQ_L (tornar a carga menos indutiva) causa, no estado PQ (tensão V na barra de carga), um acréscimo ΔV.

- Quando $\Delta Q_L = 0$, qualquer controle ΔE positivo causa no estado, um acréscimo ΔV.

Ou seja, um sistema é estável PQ, se:

- Quando a tensão no gerador é mantida fixa, então um decréscimo na carga causa um acréscimo em algumas tensões de barras PQ.

- Quando a carga é mantida fixa, um aumento na tensão do gerador causa um acréscimo em algumas das tensões de barras PQ.

4.3 - Controlabilidade PQ

Seja j uma barra de carga qualquer.

Um sistema é PQ controlável se for PQ estável e:

- Quando $\Delta E = 0$, para cada j existe um distúrbio positivo ΔQ_L que causa um acréscimo na tensão ΔV_j, e

- Quando $\Delta Q_L = 0$ para cada j existe um controle positivo ΔE que causa um acréscimo de tensão ΔV_j.

Ou seja, para o sistema ser PQ controlável, necessita-se que ele seja PQ estável e que a tensão em qualquer barra de carga possa ser aumentada / diminuída pelo decréscimo / acréscimo da carga reativa em algumas barras PQ ou pelo acréscimo / decréscimo da tensão nas barras de geração.

Controlabilidade PQ é uma condição mais forte do que a estabilidade PQ, porque aquela assume que cada barra de carga PQ pode ser afetada por, pelo menos, um distúrbio em outra barra PQ e por, pelo menos, um controle em barra de geração.

Como o estado para estabilidade e controlabilidade PQ é a tensão na barra PQ, faz-se uso da relação:

$$\Delta V = S_{QLV}^{-1} \; \Delta Q_L + S_{VE} \; \Delta E$$

4.4 - Condições de Estabilidade e Controlabilidade PQ

Uma condição suficiente para estabilidade PQ é que S_{QLV} seja uma matriz M (os elementos de M^{-1} são todos positivos ou nulos) e S_{VE} seja uma matriz com todos os elementos positivos ou nulos.

- Suponha que $\Delta E = 0$:

$$\dot{\Delta V} = S_{QLV}^{-1} \; \Delta Q_L$$

Se S_{QLV} for uma matriz M, então pela definição S_{QLV}^{-1} é uma matriz com elementos positivos ou nulos e, para qualquer distúrbio positivo em ΔQ_L (tornar menos indutivo), ΔV será positivo.

- Suponha-se que $\Delta Q_L = 0$

$\Delta V = S_{VE} \cdot \Delta E$

Se S_{VE} for uma matriz com elementos positivos ou nulos, qualquer variação positiva em E, refletirá positivamente em ΔV.

Uma condição suficiente para controlabilidade PQ é que S_{QLV} seja uma matriz M e S_{VE} seja uma matriz com elementos positivos ou nulos sem linhas nulas. Note que se S_{QLV} é inversível, então S_{QLV}^{-1} não tem linhas nulas.

Então, se $\Delta E=0$

$$\Delta V = S_{QLV}^{-1} \Delta Q_L$$

e para qualquer distúrbio positivo ΔQ_L, ΔV é positivo também, desde que S_{QLV}^{-1} é não singular, todas as suas linhas e colunas são diferentes de zero. Então para cada i, existe um j tal que $S_{QLV\,ij}^{-1} > 0$.

Além do mais, se $\Delta Q_{Lj} > 0$, então:

$$\Delta V_i = \left[0, \; \ldots \; , 1, \; \ldots \; , 0 \right] \Delta V$$

$$\Delta V_i = \left[0, \; \ldots \; , 1, \; \ldots \; , 0 \right] S_{QLV}^{-1} \, \Delta Q_L$$

$$\Delta V_i = S_{QLV}^{-1}{}_{i} \; \Delta Q_L = \sum_{k=m+1}^{m+n} S_{QLV}^{-1}{}_{ik} \; \Delta Q_{L\,k}$$

$$\Delta V_i \geq S_{QLV}^{-1}{}_{ij} \; \Delta Q_{L\,ij}$$

Assumindo só um $k=j \longrightarrow \; \geq S_{QLV}^{-1}{}_{ij} \; \Delta_{QLj} > 0$

Onde $S_{QLV}^{-1}{}_{i}$ é a i-ésima linha da matriz S_{QLV}^{-1} e $S_{QLV}^{-1}{}_{ij}$ é o elemento i,j da matriz S_{QLV}^{-1}.

Se $\Delta Q_L = 0$, então:

$$\Delta V = S_{VE} \, . \, \Delta E$$

E para qualquer ΔE positivo, ΔV é positivo porque S_{VE} é uma matriz com elementos positivos ou nulos. Se agora, $1<i<m$, então desde que S_{VE} não tem lihas nulas, existe uma coluna j talque $S_{VE\,ij} > 0$.

Assumindo o vetor positivo, com $\Delta E_j > 0$, tem-se:

$$\Delta V_i = [0, \ldots, 1, \ldots, 0]\ S_{VE}\ \Delta E$$
$$\underbrace{\qquad\qquad\qquad}_{\text{coluna } i}$$

$$\Delta V_i = S_{VE_i}\ \Delta E$$

$$\Delta V_i = \sum_{k=1}^{M} S_{VE_{ik}}\ \Delta E_k \geq S_{VE_{ij}}\ \Delta E_j > 0$$

Onde: S_{VE_i} é a i-ésima linha da matriz S_{VE}.

$S_{VE_{ij}}$ é o elemento i,j da matriz S_{VE}.

Fica claro, portanto que se quiser aumentar a tensão na barra PQ_i, pode-se reduzir a carga conectada em cada barra PQ_j para as quais $S_{QLV_{ij}}$ são positivos.

Fica claro também, que pode se aumentar a tensão em uma barra PQ_i pelo aumento da tensão nas barras PV_j para as quais $S_{VE_{ij}}$ são positivos.

4.5 - Estabilidade PV

A definição de estabilidade PV é baseada na relação causa/efeito que existe nas barras de geração.

O estado nas barras de geração são as mudanças na injeção de potência reativa ΔQ_G , os distúrbios são as mudanças de carga ΔQ_L nas barras PQ, e os controles são as mudanças das tensões nas barras de geração ΔE.

Definição:

Um sistema é estável PV se:

- Quando $\Delta E = 0$, qualquer distúrbio negativo ΔQ_L (tornar mais indutivo), causa um acréscimo no estado ΔQ_G.

- Quando $\Delta Q_L = 0$, existe um controle positivo ΔE que causa mudanças no estado ΔQ_G, tal que:

$$\sum_{i=1}^{M} \Delta Q_{Gi} \geq 0$$

onde M é o número de barras de geração.

Será feita posteriormente uma análise a respeito dessa última condição.

4.6 - Controlabilidade PV

Um sistema é controlável PV se:

- Quando $\Delta E = 0$, qualquer distúrbio negativo ΔQ_L causa um acréscimo no estado ΔQ_G.

- Quando $\Delta Q_L = 0$, qualquer controle positivo ΔE causa mudanças na variável de estado ΔQ_G, tal que:

$$\sum_{i=1}^{M} \Delta Q_{Gi} > 0$$

e se $\Delta E_i > 0$ com $\Delta E_j = 0$ para todo $j \neq i$, então $\Delta Q_{Gi} > 0$ e $\Delta Q_{Gj} \leq 0$ para todo $j \neq i$.

Como o estado para controlabilidade PV é a mudança de geração reativa ΔQ_G, faz-se uso da relação:

$$\Delta Q_G = \mathrm{SQGE}\ \Delta_E - \mathrm{SQGQL}\ \Delta Q_L$$

Note-se que a controlabilidade PV é uma condição significativamente mais forte do que a estabilidade PV, uma vez que ela requer:

- Aumento na geração de potência reativa na barra de geração onde a tensão é aumentada;

- Variação negativa ou nula de geração de potência reativa nas outras barras PV;

- Um aumento de geração reativa líquida tanto para mudança na carga reativa como para mudança na tensão de qualquer barra PV.

Esses requisitos forçam um controle de geração de potência reativa local.

4.7 - Condições de Estabilidade e Controlabilidade PV

Um sistema é PV estável se e somente se:

- A matriz SQGQL for uma matriz com elementos positivos ou nulos e;

- A matriz SQGE for tal que:

$$\sum_{i=1}^{M} SQGE_{ij} \geq 0$$

para pelo menos um j, $1 \leq j \leq M$.

A primeira condição vem do fato de um aumento de carga reativa requerer um aumento de geração de potência reativa, desde que $\Delta E = 0$, como é mostrado a seguir.

Supondo $\Delta E = 0$ e $\Delta Q_L \leq 0$ pela definição de estabilidade PV tem-se:

$\Delta Q_G = -SQGQL\ \Delta Q_L \geq 0$, o que requer que a matriz SQGQL só tenha elementos positivos ou nulos.

Supondo agora que $\Delta Q_L = 0$, então existe $\Delta E > 0$, tal que:

$$\sum_{i=1}^{M} \Delta Q_{G\,i} \geq 0$$, pela definição de estabilidade PV.

Como $\Delta Q_G = SQGE \cdot \Delta E$

$$\sum_{i=1}^{M} \Delta Q_{Gi} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} SQGE_{ij} \, \Delta E_j \geq 0$$

Fixando a coluna, obtem-se

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{M} SQGE_{ij} \, \Delta E_j \geq 0$$

Como as ΔE_j's são não-negativas e pelo menos uma é positiva,

$$\sum_{i=1}^{M} SQGE_{ij} \geq 0$$ para pelo menos um j, $1 \leq j \leq M$.

Mais tarde será mostrada que essa última consideração não será inteiramente satisfeita. Antes disso, porém, deve-se observar na demonstração anterior que, ao fixar colunas, procura-se saber qual a variação de geração de potência reativa em todas as barras PV, para uma variação de tensão em uma barra PV qualquer.

Um sistema é PV controlável se e somente se:

- A matriz SQGQL for positiva sem coluna nula e_j;

- A matriz SQGE for tal que:

$$\sum_{i=1}^{M} SQGE_{ij} > 0 \quad \text{para } j = 1, \ldots, M$$

$$SQGE_{ij} \begin{cases} > 0 & i=j \\ \leq 0 & i \neq j \end{cases}$$

A violação das regras acima é que indicará a necessidade de se ajustar o sistema, uma vez que essa violação ocorrerá sempre antes do colapso ocorrer como será mostrado mais tarde pelos testes.

Supondo $\Delta E=0$ e $\Delta Q_L \leq 0$, então pela definição de controlabilidade PV:

$\Delta Q_G = -$ SQGQL $\Delta Q_L \geq 0$, logo a matriz SQGQL deve ter seus elementos positivos ou nulos.

Escolhe-se um ΔQ_L tal que o j-ésimo elemento seja

...

$-e_j$, onde e_j é positivo e todos os outros elementos são zero, então:

$$\Delta Q_G = e_j \cdot S_{QGQL_j} \geq 0$$

onde S_{QGQL_j} é a j-ésima coluna da matriz S_{QGQL}. Então S_{QGQL} é uma matriz com os elementos positivos ou nulos. Desde que j é arbitrário, a matriz S_{QGQL} é uma matriz com os elementos positivos ou nulos sem colunas nulas.

Suponha-se que $\Delta Q_L = 0$ e $\Delta E \geq 0$, então:

$\Delta Q_G = S_{QGE}\, \Delta E$, e pela definição de controlabilidade PV

$$\sum_{i=1}^{M} \Delta Q_{G\,i} > 0. \qquad \text{Então:}$$

$$\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} S_{QGE_{ij}}\, \Delta E_j > 0$$

Se trocar a ordem dos somatórios, mantendo fixa a coluna e variando as linhas:

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{M} S_{QGE_{ij}}\, \Delta E_j > 0$$

Como os ΔE_j's são positivos ou nulos e independentes um do outro:

$$\sum_{i=1}^{M} \text{SQGE}_{ij} > 0 \text{ para todos os } j=1, \ldots, M$$

Pela definição de controlabilidade PV:

$\Delta Q_i > 0 \qquad i=j$

$\Delta Q_j \leq 0 \qquad i \neq j$

quando $\Delta E_i > 0$ e $\Delta E_j = 0$. Então, desde que

$\Delta Q_j = \text{SQGE}_{ij}\ \Delta E_i$

quando $\Delta E_i > 0$ e $\Delta E_j = 0$, então:

$\text{SQGE}_{ij} > 0 \qquad i = j$

$\text{SQGE}_{ij} \leq 0 \qquad i \neq j$

Como visto anteriormente, para um certo $\Delta E_i > 0$ e $\Delta E_j = 0$, a geração de potência reativa em i deve ser maior que zero e, em j, menor ou igual a zero. Logo para uma determinada coluna de SQGE, o elemento da diagonal principal deveria ser maior ou igual a soma de todos os elementos da coluna a ele associada. Isso, entretanto, não ocorre em condições de operação consideradas normais, como será visto mais tarde.

4.8 - Testes e Resultados

Para ilustrar as definições de estabilidade e controlabilidade PQ e PV, será usado o sistema de três barras da Figura 3.1. Novamente a barra 1 é escolhida como *swing*, a barra 2 é do tipo PV e a barra 3 é a barra de carga.

Na primeira fase dos testes, que consiste nos Testes 4.1 e 4.2, nenhuma providência no sentido de evitar o colapso é tomada, de forma a observar o comportamento das matrizes de sensibilidade durante o fenômeno.

Nos testes da Seção 4.9, o objetivo é a prevenção do colapso como será visto adiante.

Tanto nos testes desta seção, como nos testes da Seção 4.9, anota-se os valores das matrizes S_{QGE}, S_{VE}, S_{QGQL} e S_{QLV}.

Para analisar o comportamento do sistema, varia-se a carga para obter diferentes pontos de operação, mantendo fixo o fator de potência.

Ao contrário dos capítulos anteriores, o nível de tensão deve ficar dentro da faixa normal de operação (0,95 a 1,05 pu). Isto porque será estudada a influência de se compensar a carga para elevar o nível de tensão.

Supôs-se para o Teste 4.1, uma carga com fator de potência de 0,9994 (2° indutivo). A barra 2 gera 1,5 pu de potência ativa.

Neste primeiro teste, a tensão de colapso está bem abaixo do ponto mínimo de operação (0,95 pu), como mostrado na Tabela 4.1, de forma que o sistema de proteção atuaria bem antes disso ocorrer. Deve-se observar que o nível de tensão já encontra-se baixo antes do colapso ocorrer. Por esse motivo o Teste 4.1 será repetido com a mesma potência ativa alocada na barra de carga, mas será feita uma compensação reativa na carga, no sentido de elevar a tensão, passando a carga a ter um fator de potência igual a 0,886 (30° capacitivo). Os resultados estão na Tabela 4.2.

Do Teste 4.2 pode-se tirar alguns pontos importantes para entender o mecanismo de colapso de tensão, com a ajuda das matrizes de sensibilidade. As matrizes S_{VE}, S_{QGQL} e S_{QLV} têm elementos positivos ou nulos enquanto o sistema se encontra na Região A, ficando com os elementos negativos após o cruzamento das fronteiras entre as Regiões A e B. Para provar isso, faz-se uso da Equação 2.5, para determinar a fronteira entre as Regiões A e B.

Teste 4.1 $\longrightarrow$ Fronteira - 36,75°

Teste 4.2 $\longrightarrow$ Fronteira - 52,75°

O ângulo limite do Teste 4.2 determinado pela Equação

2.8, corresponde exatamente ao instante em que as matrizes S_{VE}, S_{QQL} e S_{QLV} tornam-se negativas, como se queria mostrar.

Antes de analisar a violação nas regras da matriz S_{QQE}, deve-se atentar para o fato de que, uma vez que não se faz nenhuma restrição às máquinas, as matrizes de sensibilidade trabalham somente com carregamento das linhas. No caso particular da matriz S_{QQE}, a violação em um elemento da diagonal indica que a linha conectada à barra associada àquele elemento, está muito carregada, de forma que a potência reativa que flui por esta linha, deve ser reduzida.

Na Seção 4.7, afirmou-se que a matriz S_{QQE}, deveria ter cada elemento da diagonal principal, maior do que a soma dos elementos da coluna a ele associada. Isto porém não foi observado nos Testes 4.1 e 4.2, de forma que será feita uma aferição dessas matrizes de sensibilidade, para mostrar se essas matrizes retratam o sistema, exatamente como ele é.

O Teste da Tabela 4.3 mostra a aferição da estabilidade e controlabilidade PQ e PV pelas matrizes de sensibilidade.

O teste parte de um ponto de operação, onde se calcula a potência reativa gerada nas barras 1 e 2. Supõe-se então, uma pequena variação na tensão de qualquer barra de geração e no fator de potência da carga. Calcula-se novamente os valores de potência reativa gerada nas barras 1 e 2. Após esse cálculo, faz-se uso das matrizes de sensibilidade, para checar os valores calculados com os valores obtidos pelo uso das matrizes de sensibilidade. Deve se observar que para o ponto de operação analisado, conhece-se as matrizes sensibilidade. Este teste encontra-se detalhado nas páginas seguintes à Tabela 4.3.

Através desse teste, pode-se observar que as matrizes de sensibilidade estão corretas em sua concepção e podem ser instrumentos convenientes para análise do fenômeno do colapso de tensão, uma vez que elas retratam inteiramente o comportamento do sistema.

Para explicar o porquê da matriz SQGE ter características diferentes daquelas mostradas na Seção 4.7, faz-se a seguinte suposição para o sistema de 3 barras, utilizado nos testes:

- Ao se elevar a tensão na barra 1 sem que haja alteração na tensão da barra 2, nem alteração de carga na barra 3, a tensão na barra 3 deve-se elevar, uma vez que a barra 1 gera mais potência reativa. O aumento de tensão na barra 3, passa a exigir menos potência reativa da barra 2. Deve-se observar que o aumento de tensão na barra 3 reduz as perdas na transmissão, de forma que torna-se possível que a variação negativa de geração de potência reativa na barra 2, seja maior que a variação positiva de geração de potência reativa na barra 1. Isso invalida a exigência do somatório de cada coluna de SQGE ser maior que zero.

4.9 - Prevenção do Colapso de Tensão

4.9.1 - Algumas Considerações

Nesta seção, o objetivo é a prevenção do colapso, uma vez que já se conhece o comportamento das matrizes de sensibilidade durante o fenômeno.

Dos Testes 4.1 e 4.2, pode-se concluir que antes do colapso de tensão ocorrer, a matriz S_{QQE} teve o(s) elemento(s) da diagonal principal violando a exigência para a estabilidade e controlabilidade PV.

Logo, a matriz S_{QQE} é a ferramenta principal de prevenção de colapso, uma vez que as outras matrizes de sensibilidade indicam o instante em que o colapso ocorre, não oferecendo nenhum indicativo da iminência do fenômeno. Portanto, medidas corretivas devem ser tomadas toda vez que as regras para a matriz S_{QQE} forem violadas.

Para monitorar a matriz S_{QQE}, deve-se observar quando houver violação das regras para o elemento da diagonal principal, ou seja, observar o instante em que ele torna-se negativo, uma vez que a partir daí, qualquer variação positiva de tensão na barra associada ao elemento da diagonal violada, corresponderia a uma variação negativa de geração de potência reativa nesta barra.

Neste caso, as providências são:

- Aumento de tensão em pelo menos uma barra de geração.

- Alocação de capacitores nas barras de carga, visando uma redução na geração de potência reativa nas barras de geração.

- Mudança na distribuição de potência ativa gerada visando uma distribuição mais conveniente nos fluxos de potência ativa e reativa, de forma a aliviar o carreamento nas linhas conectadas à(s) barra(s) associada(s) ao(s) elemento(s) da diagonal violado(s).

Deve-se notar também, que havendo violação em um elemento da diagonal da matriz S_{QGE}, tanto pode-se sanar o problema elevando a tensão em uma outra barra de geração, como pode-se elevar a tensão na própria barra associada ao elemento da diagonal violado.

É importante atentar para esse detalhe, já que a primeira providência no sentido de reduzir a geração de potência reativa, seria reduzir a tensão nesta barra. Ocorre porém, que o sinal negativo no elemento da diagonal, informa que qualquer variação positiva/negativa na tensão, corresponderá a uma variação negativa/positiva na geração de potência reativa, de forma que para reduzir a geração de potência reativa em uma barra, cujo elemento associado à diagonal principal da matriz SQGE esteja violado, deve-se elevar a tensão nessa barra.

Como a violação da matriz SQGE é que indica a necessidade de se tomar providências, cada teste da próxima seção tem seu carregamento de potência ativa inicial, igual ao carregamento de potência ativa do teste anterior, no instante da violação da matriz SQGE.

4.9.2 - Testes e Resultados de Prevenção

Antes de iniciar os testes, deve-se atentar que qualquer uma das medidas da seção anterior, tem como objetivo a redução do carregamento referente à linha conectada ao gerador associado ao elemento da matriz SQGE violado.

O Teste 4.4 parte do Teste 4.2, uma vez que parte-se sempre da carga responsável pela violação nas regras da matriz SQGE do teste anterior. A primeira constatação ao observar a matriz SQGE no Teste 4.2 (instante da violação), é que a violação ocorre no elemento associado à barra 1. Para o Teste 4.4, aumentou-se então a tensão de geração na barra 2 para 1.03

pu, para que a barra 1 gerasse menos potência reativa para o mesmo nível de tensão, uma vez que a carga não se alterou. Essa medida porém, não foi suficiente para levar a matriz S_{QOE} às condições exigidas. No Teste 4.5, novo aumento na tensão na barra 2 é experimentado, desta vez para 1.05 pu, não sendo ainda suficiente para ajustar a matriz S_{QOE}.

Deve-se observar que nos Testes 4.4 e 4.5 existiram duas violações, a primeira refere-se a matriz S_{QOE}, como já foi observado. A segunda violação refere-se à restrição de tensão, cujo limite superior é 1,05 pu. Por essa razão, não é possível inserir capacitores, já que o nível de tensão encontra-se elevado. A retirada do capacitor reduziria o nível de tensão, mas aumentaria o carregamento na linha conectada à barra associada ao elemento da diagonal violado. Resta portanto, a redistribuição de geração de potência ativa. Reduzindo a tensão na barra 2 ao patamar de 1,0 pu, fixou-se então, a geração de potência ativa na barra 2 em 2,0 pu, obtendo-se os resultados do Teste 4.6.

A medida anterior foi suficiente para manter a matriz S_{QOE} dentro dos padrões exigidos para estabilidade e controlabilidade PQ e PV. Novos aumentos de carga são experimentados, até o instante em que uma nova violação ocorre na matriz S_{QOE}. Como foi feita uma redistribuição de geração, novamente o recurso de elevar a tensão em uma outra barra de geração, é possível. Eleva-se então a tensão na barra 2 para 1,03 pu, como mostrado no Teste 4.7. Essa medida é suficiente para tornar o elemento da diagonal violado, positivo. Deve-se observar porém, que o elemento da diagonal associado à barra 1 tem um valor muito baixo, ou seja, qualquer aumento na carga violará a matriz SQGE. Como o nível de tensão na barra 3 encontra-se no limite superior (1,05 pu), não é possível inserir capacitores. Por essa razão, será feita uma nova redistribuição da potência ativa passando a barra 2 a gerar 2,5 pu de potência ativa e tensão de 1,0 pu, obtendo os resultados do Teste 4.8, mostrados na Tabela 4.8.

Deve-se observar que o elemento da diagonal associado à barra 2 tem um valor muito baixo, a exemplo do que ocorreu no Teste 4.7 com o elemento da diagonal associado à barra 1. Uma medida corretiva deveria ser tomada nesse instante, porém novo acréscimo na carga será experimentado apenas para provar que a violação na matriz SQGE é iminente. Isto ocorre para a carga de 4,3 - j 2,48 pu, como mostrado pela Tabela 4.8.

Portanto, eleva-se a tensão na barra 2 para 1.03 pu, obtendo os resultados do Teste 4.9, mostrados na Tabela 4.9. Para a carga violada no Teste 4.8, a medida corretiva obteve sucesso, pois os elementos da diagonal estão todos positivos. Ao se aumentar a carga no Teste 4.9, a violação ocorre, o que já era esperado, uma vez que os elementos da diagonal tinham um valor muito baixo. Para o Teste 4.10, eleva-se novamente a tensão, dessa vez para 1,04 pu obtendo-se os resultados da Tabela 4.10. A medida corretiva foi satisfatória. Novo aumento de carga é experimentado, causando nova violação. Como o nível de tensão na barra de carga encontra-se elevado, para o Teste 4.11, nova redistribuição de potência ativa é feita, passando a barra 2 a gerar 3 pu de potência ativa, obtendo os resultados da Tabela 4.11. Supõe-se que essa seja a capacidade máxima de geração da barra 2, ou seja, todos os recursos de monitoração da matriz S_{QGE} encontram-se esgotados, de forma que não é possível suprir a carga do Teste 4.11 e, ao mesmo tempo atender às restrições da matriz S_{QGE}. Deve-se notar entretanto, que o sistema encontra-se numa região de operação onde as ações de controle têm o efeito esperado, como mostrado pelas matrizes S_{QGQL}, S_{VE} e S_{QLV}.

Os testes realizados mostram que a matriz S_{QGE} é muito importante para a prevenção do colapso de tensão permitindo ajustar o sistema para operar dentro das regras de estabilidade e controlabilidade PQ e PV.

4.10 - Considerações Finais sobre os Testes

Os testes mostraram que existe um determinado instante onde todos os recursos necessários para que o sistema obedeça a formulação de S_{QGE} são esgotados. Isto não quer dizer, entretanto, que o sistema esteja na Região B, uma vez que as matrizes de sensibilidade S_{QGQL}, S_{VE} e S_{QLV} asseguram o contrário, e sim que, se os recursos necessários para evitar a violação da matriz S_{QGE} estão esgotados, o carregamento associado a esse instante deve ser considerado como a carga máxima conservativa do sistema, uma vez que qualquer incremento na carga violará a matriz S_{QOE}, aproximando o sistema da Região B.

TABELA 4.1
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.1 - FATOR DE POTÊNCIA : 2° INDUTIVO

BARRA 2 GERA =>1.5 pu   TENSÃO BARRA 2 =>1.0 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgq	Sve	Sqlv
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle 12.70^\circ$ $V_3=0.93\angle -6.56^\circ$ CAGA => 1.98 + +j0.07 pu	$\begin{bmatrix} 2.51 & -2.98 \\ -2.62 & 1.52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.60 \\ 0.58 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.57 & 0.62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.98 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -0.87^\circ$ $V_3=0.86\angle -20.52^\circ$ CAGA => 2.86 + +j0.10 pu	$\begin{bmatrix} 1.39 & -3.60 \\ -3.42 & 1.27 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.76 \\ 0.71 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.74 & 0.74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6.46 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -19.66^\circ$ $V_3=0.72\angle -40.34^\circ$ CAGA => 3.50 + +j0.12 pu	$\begin{bmatrix} -18.94 & -19.46 \\ -16.30 & -8.26 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.07 \\ 2.87 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.45 & 2.94 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.62 \end{bmatrix}$

TABELA 4.2

ANALISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.2 - FATOR DE POTENCIA: 30° CAPACITIVO

BARRA 2 GERA => 1.5 pu TENSAO BARRA 2 =>1.0 pu

TENSAO	$S_{Q\theta Z}$	$S_{Q\theta QL}$	S_{VZ}	S_{QLV}
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -0.29^\circ$ $V_3=1.06\angle -18.94^\circ$ CARGA => 2.86 - - j1.65 pu	$\begin{bmatrix} 1.52 & -2.62 \\ -2.50 & 1.29 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.44 \\ 0.43 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.54 & 0.56 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.71 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -9.53^\circ$ $V_3=1.05\angle -28.23^\circ$ CARGA => 3.50 - - j2.02 pu	$\begin{bmatrix} 0.41 & -3.09 \\ -2.91 & 1.12 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 \\ 0.45 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.63 & 0.59 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.31 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -28.5^\circ$ $V_3=0.83\angle -56^\circ$ CARGA => 5.95 - - j3.43	$\begin{bmatrix} 178.6 & 140.7 \\ 81.84 & 69.9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -15.74 \\ -7.18 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -17.39 & -13.9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.67 \end{bmatrix}$

TABELA 4.3
AFERICAO DE ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE PQ E PV

TESTE 4.3

TENSAO	ΔQ_{G1} CALCULADO	ΔQ_{G2} CALCULADO	ΔQ_{G1} PELA MATRIZ SENSIBILIDADE	ΔQ_{G2} PELA MATRIZ SENSIBILIDADE
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.00\angle 12.69^\circ$ $V_3=0.931\angle -6.57^\circ$ CARGA => 1.98 + + J0.06 pu	[-0.0054]	[-0.0052]	[-0.0054]	[-0.0052]
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.01\angle 12.31^\circ$ $V_3=0.93\angle -6.57^\circ$ CARGA => 1.98 + + J0.069 PU	[-0.0298]	[-0.0153]	[-0.0298]	[-0.0152]

NAS PAGINAS SEGUINTES ENCONTRA-SE A DESCRICAO DESTE TESTE

TABELA 4.4
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.4 - FATOR DE POTÊNCIA :30° CAPACITIVO

BARRA 2 GERA =>1.5 pu - TENSÃO BARRA 2 => 1.03 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgql	Sve	Sqlv
$V_1=1.04\angle 0^\circ$	$\begin{bmatrix}-0.19 & -3.31\\ -3.19 & 1.21\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.48\\ 0.46\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.68 & 0.61\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10.26\end{bmatrix}$
$V_2=1.03\angle -13.38^\circ$				
$V_3=1.06\angle -31.13^\circ$				
CARGA => 3.70 - - j2.14 pu				

TABELA 4.5
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.5 - FATOR DE POTÊNCIA : 30 CAPACITIVO
BARRA 2 GERA =>1.5 pu - TENSÃO BARRA 2 =>1.05 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgql	Sve	Sqlv
$V_1=1.04\angle 0^\circ$	$\begin{bmatrix}-0.19 & -3.26\\ -3.23 & 1.34\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.47\\ 0.46\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.67 & 0.60\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10.44\end{bmatrix}$
$V_2=1.05\angle -13.75^\circ$				
$V_3=1.06\angle -30.10^\circ$				
CARGA => 3.70 - - j2.14				

TABELA 4.6
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.6 - FATOR DE POTÊNCIA : 30° CAPACITIVO
BARRA 2 GERA => 2.0 pu - TENSÃO BARRA 2 =>1.0 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgql	Sve	Sqlv
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -0.36^\circ$ $V_3=1.05\angle -25.10^\circ$ CARGA => 3.70 - - j2.14 pu	$\begin{bmatrix} 0.85 & -3.03 \\ -2.81 & 0.72 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 \\ 0.45 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.60 & 0.60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.69 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -5.01^\circ$ $V_3=1.04\angle -29.90^\circ$ CARGA => 4.00 - - j2.31 pu	$\begin{bmatrix} 0.10 & -3.44 \\ -3.11 & 0.56 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 \\ 0.47 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.67 & 0.64 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.96 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.0\angle -6.70^\circ$ $V_3=1.03\angle -31.50^\circ$ CARGA => 4.10 + + j2.37 pu	$\begin{bmatrix} -0.24 & -3.64 \\ -3.25 & 0.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.51 \\ 0.48 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0.66 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.78 \end{bmatrix}$

TABELA 4.7
ANALISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.7 FATOR DE POTENCIA : 30° CAPACITIVO
BARRA 2 GERA => 2.0 pu - TENSAO BARRA 2 => 1.03 pu

TENSAO	$S_{Q\theta I}$	$S_{Q\theta QL}$	S_{VI}	S_{QLV}
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.03\angle -7.45^\circ$ $V_3=1.05\angle -31.01^\circ$ CARGA => 4.15 - j2.37 pu	$\begin{bmatrix} 0.07 & -1.50 \\ -2.85 & 3.72 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.41 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.74 & 0.27 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.22 \end{bmatrix}$

TABELA 4.8
ANALISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.8 - FATOR DE POTENCIA : 30° CAPACITIVO
BARRA 2 GERA => 2.5 pu - TENSAO BARRA 2 => 1.0 pu

TENSAO	$S_{Q\theta I}$	$S_{Q\theta QL}$	S_{VI}	S_{QLV}
$V_1=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.00\angle 4.05^\circ$ $V_3=1.03\angle -27.07^\circ$ CARGA => 4.20 - j2.42 pu	$\begin{bmatrix} 0.56 & -3.36 \\ -3.07 & 0.04 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 \\ 0.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.64 & 0.66 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.81 \end{bmatrix}$
$V_3=1.04\angle 0^\circ$ $V_2=1.00\angle 2.48^\circ$ $V_1=1.03\angle -28.69^\circ$ CARGA => 4.3 - j2.48 pu	$\begin{bmatrix} 0.28 & -3.52 \\ -3.19 & -0.03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 \\ 0.05 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.64 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.70 \end{bmatrix}$

TABELA 4.9
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.9 - FATOR DE POTÊNCIA : 30° CAPACITIVO
BARRA 2 GERA => 2.5 pu - TENSÃO BARRA 2 => 1.03 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgql	Sve	Sqlv
$V_1=1.04\angle 0°$ $V_2=1.03\angle 1.41°$ $V_3=1.05\angle -28.10°$ CARGA => 4.30 - - j2.48 pu	$\begin{bmatrix} 0.31 & -3.40 \\ -3.19 & 0.25 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 \\ 0.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.66 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.23 \end{bmatrix}$
$V_1=1.04\angle 0°$ $V_2=1.03\angle -1.80°$ $V_3=1.05\angle -31.40°$ CARGA => 4.50 - + j2.60 pu	$\begin{bmatrix} -0.34 & -3.81 \\ -3.47 & 0.08 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.52 \\ 0.51 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.71 & 0.70 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.89 \end{bmatrix}$

TABELA 4.18
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.18 - FATOR DE POTÊNCIA : 30 CAPACITIVO
BARRA 2 GERA => 2.5 pu - TENSÃO BARRA 2 => 1.04 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgql	Sve	Sqlv
$V_1 = 1.04 \angle 0°$ $V_2 = 1.04 \angle -2.12°$ $V_3 = 1.05 \angle -31.22°$ CARGA => 4.50 - - j2.60 pu	$\begin{bmatrix} 0.20 & -1.01 \\ -2.57 & 4.85 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.43 \\ 0.37 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.60 & 0.14 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.78 \end{bmatrix}$
$V_1 = 1.04 \angle 0°$ $V_2 = 1.04 \angle -3.81°$ $V_3 = 1.04 \angle -33°$ CARGA => 4.60 - + j2.66 pu	$\begin{bmatrix} -0.16 & -1.15 \\ -2.69 & 4.83 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.39 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.63 & 0.16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.56 \end{bmatrix}$

TABELA 4.11
ANÁLISE DAS MATRIZES DE SENSIBILIDADE

TESTE 4.11 - FATOR DE POTÊNCIA : 30° CAPACITIVO
BARRA 2 GERA => 3.0 pu - TENSÃO BARRA 2 => 1.04 pu

TENSÃO	Sqge	Sqgql	Sve	Sqlv
$V_1 = 1.04 \angle 0°$ $V_2 = 1.04 \angle 8.10°$ $V_3 = 1.04 \angle -27.20°$ CARGA => 4.60 - j2.66 pu	$\begin{bmatrix} 0.23 & -3.49 \\ -3.36 & -0.38 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 \\ 0.53 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.66 & 0.70 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.69 \end{bmatrix}$