

4 Impedância de Transferência entre Geradores e Carga

4.1. Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas

O procedimento nesta seção é baseado no cálculo de correntes de curto-circuito, comumente encontrado em livros de análise de sistemas de potência [4].

Como é mostrado na Figura 4.1, uma rede pode ser representada por uma rede ativa com matriz de impedância Z_N e impedância de carga Z_k quando o sistema é visto desde a barra da carga. Usando o teorema da superposição, o sistema é o resultado de duas combinações: uma sem considerar a corrente de carga I_k e outra considerando o efeito da corrente de carga.

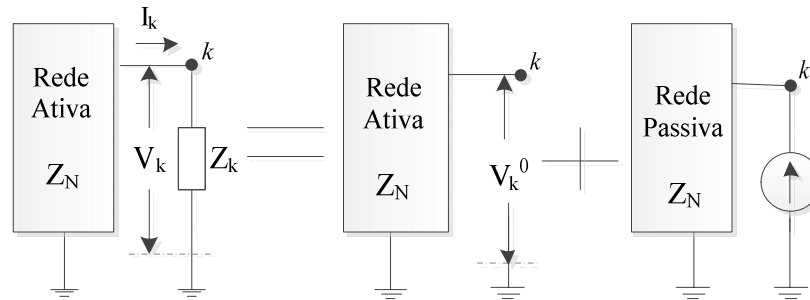


Figura 4.1 - Representação do Sistema

onde,

Z_N é a matriz de impedância do sistema, contendo todas as impedâncias das linhas e todas as impedâncias internas dos geradores.

Z_k é a impedância instantânea da carga da barra k , a qual pode ser obtida por:

$$Z_k = \frac{V_k}{I_k} = \frac{|V_k|^2}{(P_k + jQ_k)^*} \quad (4.1)$$

onde V_k e I_k são a tensão e corrente medida na barra k e, consequentemente, P_k e Q_k são as potências ativa e reativa medidas na barra k (o sobrescrito * denota operação conjugada).

No sistema da Figura 4.1, a tensão numa determinada barra j é dada por:

$$V_j = V_j^0 - Z_{jk}I_k \quad (4.2)$$

onde:

V_j^0 é a tensão na barra j sem Z_k (barra k em circuito aberto);

I_k é a corrente na carga;

Z_{jk} é a impedância de transferência entre as barras j e k;

A equação (4.2) é geral e pode ser usada para a barra k:

$$V_k = V_k^0 - Z_{kk}I_k \quad (4.3)$$

onde,

Z_{kk} é a impedância própria vista desde a barra de carga.

Por outro lado, na barra k tem-se:

$$V_k = Z_k I_k \quad (4.4)$$

Resolvendo (4.3) e (4.4), obtém-se:

$$I_k = \frac{V_k^0}{(Z_{kk} + Z_k)} \quad (4.5)$$

e

$$V_k = \frac{Z_k V_k^0}{(Z_{kk} + Z_k)} \quad (4.6)$$

Substituindo-se (4.5) em (4.2), tem-se:

$$V_j = V_j^0 - Z_{jk} \frac{V_k^0}{(Z_{kk} + Z_k)} \quad (4.7)$$

Uma vez calculadas as tensões em todas as barras é possível calcular as correntes em todas as linhas:

$$I_{jk} = \frac{V_j - V_k}{Z_{jk}} \quad (4.8)$$

Substituindo-se (4.6) e (4.7) em (4.8), obtém-se:

$$I_{jk} = \frac{V_j^0(Z_{kk} + Z_k) - V_k^0(Z_{jk} + Z_k)}{Z_{jk}(Z_{kk} + Z_k)} \quad (4.9)$$

E, então, com (4.9), calcula-se a corrente na barra de carga k , como o somatório de todas as correntes que convergem na barra k .

Pode-se admitir que todos os geradores do sistema estão operando com uma tensão de 1.0 pu atrás de suas reatâncias internas. Logo, pode-se considerar o circuito como sendo alimentado por uma única fonte comum.

Considerando n geradores na rede, e tendo em conta as considerações anteriores, pode ser obtido um circuito baseado nas impedâncias de transferência entre geradores e carga, como é apresentado na Figura 4.2.

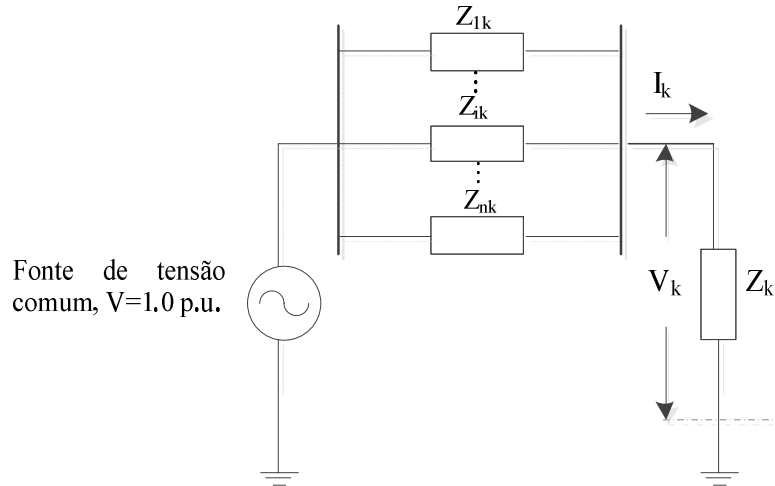


Figura 4.2 - Circuito Equivalente entre Geradores e Carga

Finalmente, com o circuito da Figura 4.2 e usando (4.10), pode ser obtido o circuito equivalente entre geradores e cargas com uma única linha como é mostrado na Figura 4.3.

$$Z_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{ik}} \right)^{-1} \text{ e } E_{eq} = 1.0 \text{ p.u.} \quad (4.10)$$

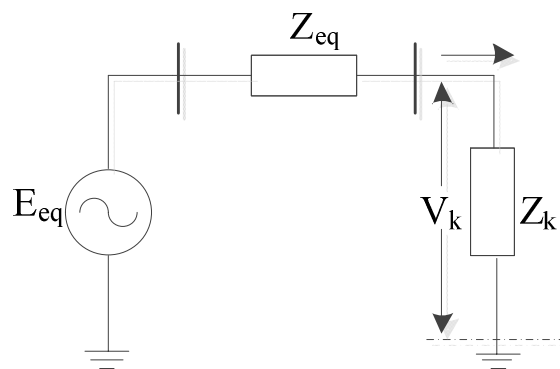


Figura 4.3 - Circuito Equivalente entre Geradores e Carga com Única Linha

4.2.**Aplicação do Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas para Avaliação da Estabilidade de Tensão**

O objetivo é transformar um sistema de n barras no seu circuito equivalente entre geradores e cargas, uma vez por cada barra de carga a ser analisada e, posteriormente, calcular os índices de estabilidade de tensão utilizando a teoria apresentada no Capítulo 2.

O interesse é comparar os resultados obtidos com o sistema completo da Figura 4.4 a) com os obtidos com o circuito equivalente entre geradores e carga da Figura 4.4 b), e com isto, avaliar a possibilidade de usar o equivalente no cálculo de índices de estabilidade de tensão.

Utilizam-se os sistemas mostrados na Figura 4.4. Os dados de barra, linha e resultados do fluxo de potência são mostrados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. A base de potência é de 100 MVA com uma frequência de 60 Hz.

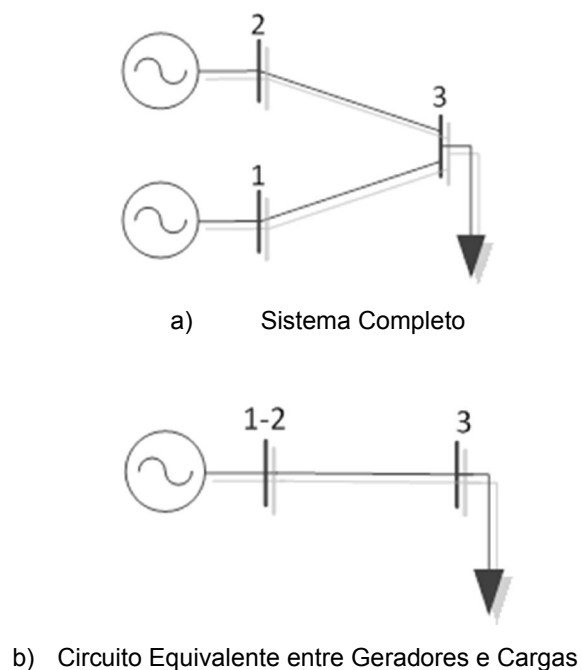


Figura 4.4 - Sistema–Teste de 3 Barras

Tabela 4.1 - Dados de Barra dos Sistemas–Teste de 3 Barras

Sistema Completo							
Barra		Tensão		Geração		Carga	
No.	Tipo	V (pu)	Θ (°)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	PV	1.050	0.000	15.000	0.000	0.000	0.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	30.000	10.000

Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas							
1-2	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	30.000	10.000

Tabela 4.2 - Dados de Linha dos Sistemas–Teste de 3 Barras

Sistema Completo			
De	Para	R(pu)	X(pu)
1	3	0.100	0.500
2	3	0.100	0.500

Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas			
1-2	3	0.050	0.250

Tabela 4.3 - Resultados do Fluxo de Potência dos Sistemas–Teste de 3 Barras

Sistema Completo						
Barra	Tensão		Geração		Carga	
	V (pu)	Θ (°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.000	0.000	15.573	1.139	0.000	0.000
2	1.050	-0.963	15.000	11.724	0.000	0.000
3	0.982	-4.482	0.000	0.000	30.000	10.000

Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas						
1-2	1.000	0.000	30.548	12.739	0.000	0.000
3	0.955	-4.202	0.000	0.000	30.000	10.000

4.2.1. Caso-Base

São calculados os índices de estabilidade de tensão na barra de carga 3 nos dois sistemas, obtendo os resultados mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão

Sistema	Si(MVA)	Sm(MVA)	$\beta(^{\circ})$	$M_s(\%)$
Completo	31.623	264.672	92.4961	88.0533
Equivalente	31.623	358.061	99.0312	91.1683

Observando os resultados, pode-se ver que os obtidos com o sistema equivalente diferem dos resultados do sistema completo. No sistema completo, variações infinitesimais de potência ativa são supridas pelo gerador da barra 1 e variações infinitesimais de potência reativa pelos geradores das barras 1 e 2. No entanto, no sistema equivalente não é considerada a influência de cada gerador para variações de potência na barra 3, ou seja, é perdida a individualidade de cada gerador.

4.2.2. Teste 1

- **Modificação da Impedância da Linha 2**

Para confirmar os resultados, é modificada a impedância da linha 2, fazendo-a dez vezes maior do que a impedância da linha 1 e, em seguida, são calculados os índices de estabilidade de tensão, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Linha 2 Modificada

Sistema	Si(MVA)	Sm(MVA)	$\beta(^{\circ})$	$M_s(\%)$
Completo	31.623	161.100	102.270	80.371
Equivalente	31.623	178.787	107.990	82.310

Sabendo-se que no sistema completo, o gerador 1 é o que supre as variações infinitesimais de potência ativa na carga da barra 3 e, considerando-se que o gerador 1 tem maior facilidade do que o gerador 2 para suprir as variações infinitesimais de potência reativa, já que a impedância da linha 1 é bem menor do que a da linha 2, o sistema completo fica similar ao sistema equivalente.

É importante notar que os dois sistemas tem o gerador 1 com possibilidade para suprir variações infinitesimais de potência ativa e reativa e a impedância do circuito equivalente é similar à impedância da linha 1, como é ilustrado na Figura 4.5. Dito isso, são obtidos índices muito similares.

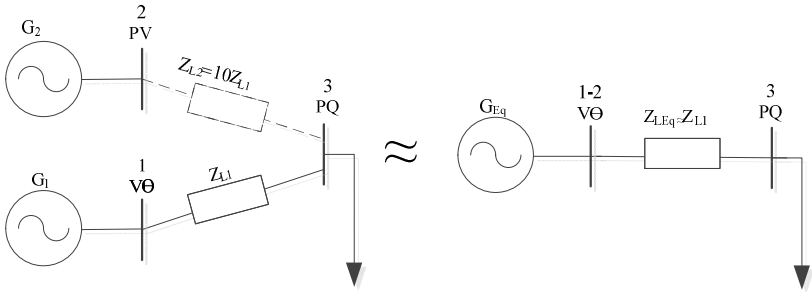


Figura 4.5 - Sistemas Modificados Teste 1–Linha 2 Modificada

- **Modificação da Impedância da Linha 1**

De maneira similar ao caso anterior, é modificada a impedância da linha 1, fazendo-a oito vezes maior que a impedância da linha 2, em seguida, são calculados os índices para avaliação das condições de segurança de tensão, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Linha 1 Modificada

Sistema	Si(MVA)	Sm(MVA)	$\beta(^{\circ})$	$M_s(\%)$
Completo	31.623	51.525	157.900	38.626
Equivalente	31.623	183.831	107.503	82.798

Na Tabela 4.6, é observado que os resultados obtidos com o sistema completo são muito diferentes dos resultados com o circuito equivalente.

No sistema completo, ao modificar a impedância da linha 1, o gerador 2 fica com maior facilidade para suprir variações infinitesimais de potência reativa na carga da barra 3 do que o gerador 1 e, as variações infinitesimais de potência ativa são supridas pelo gerador 1 com maior dificuldade em comparação ao caso_base.

No sistema equivalente, é desconsiderada a dificuldade do gerador 1 para transmitir potência para a carga da barra 3, pois a impedância equivalente é muito menor do que a impedância da linha 1 do sistema completo.

Os sistemas modificados podem ser ilustrados na Figura 4.6.

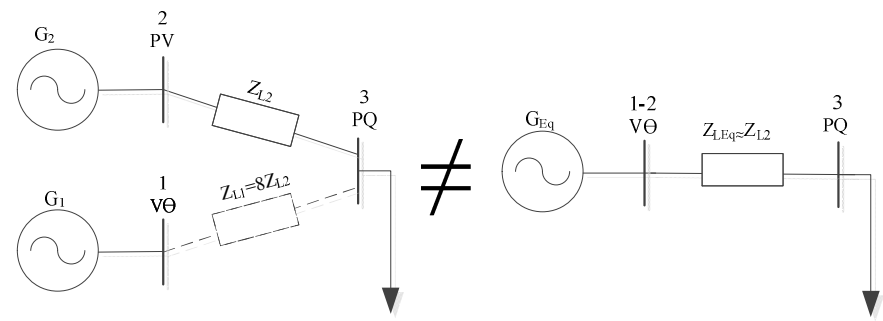


Figura 4.6 - Sistemas Modificados Teste 1 – Linha 1 Modificada

4.2.3.
Teste 2

Neste teste é modificada a distribuição de potência ativa entre os geradores e a impedância da linha 2. Nas Tabelas 4.7 e 4.8 e 4.9 são apresentados os dados

de barra, linha e resultados do fluxo de potência. O gerador 2 atende a 10% da carga e a linha 2 tem sua impedância multiplicada por 15.

Tabela 4.7 - Dados de Barra do Sistema–Teste 2

Sistema Completo							
Barra		Tensão		Geração		Carga	
No.	Tipo	V (pu)	Θ (°)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	PV	1.050	0.000	3.000	0.000	0.000	0.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	30.000	10.000

Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas							
1-2	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	30.000	10.000

Tabela 4.8 - Dados de Linha do Sistema–Teste 2

Sistema Completo			
De	Para	R(pu)	X(pu)
1	3	0.100	0.500
2	3	1.500	7.500

Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas			
1-2	3	0.094	0.467

Tabela 4.9 - Resultado do Fluxo de Potência–Teste 2

Sistema Completo						
Barra	Tensão		Geração		Carga	
	V (pu)	Θ (°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.000	0.000	28.151	14.112	0.000	0.000
2	1.050	4.105	3.000	1.641	0.000	0.000
3	0.982	-7.998	0.000	0.000	30.000	10.000

Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas						
1-2	1.000	0.000	31.134	15.702	0.000	0.000
3	0.907	-8.324	0.000	0.000	30.000	10.000

Com as mudanças do sistema, são calculados os índices para avaliação de estabilidade de tensão, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Teste 2

Sistema	Si(MVA)	Sm(MVA)	$\beta(^{\circ})$	$M_S(\%)$
Completo	31.6228	167.845	107.026	81.1596
Equivalente	31.6228	171.987	108.087	81.6133

Como é observado na Tabela 4.10, os resultados são muito próximos. Como já foi observado no Teste 1, a mudança da linha 2 faz que o gerador 2 fique com maior dificuldade para suprir a potência da barra 3, obtendo com isto, que os sistemas sejam muitos similares, com gerador para suprir variações infinitesimais de potência ativa e reativa e a impedância do circuito equivalente similar à impedância da linha 1.

Agora, com a modificação na distribuição de potência, a contribuição do gerador 2 para a potência ativa da carga da barra 3, resulta sendo pouco significativa ao estar transmitindo 10% da potência ativa total da barra 3.

Com estas mudanças, é conseguido que os sistemas fiquem similares como é ilustrado na Figura 4.7 e, conseqüentemente os resultados dos índices sejam quase iguais.

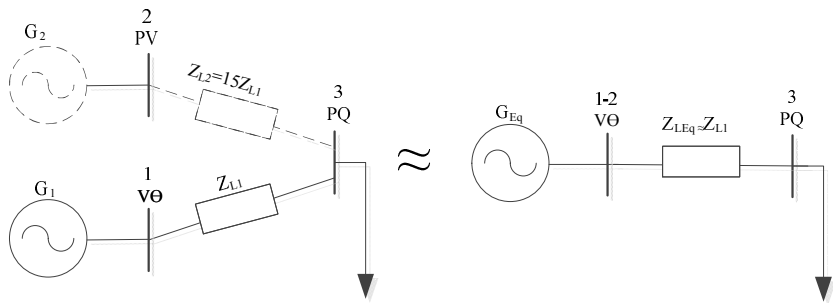


Figura 4.7 - Sistemas Modificados-Teste 2

4.3. Conclusões

Neste capítulo, inicialmente foi apresentada a formulação matemática para transformar um circuito de n barras no circuito equivalente entre geradores e cargas.

Em seguida, usando o sistema-teste de 3 barras foi calculado o circuito entre geradores e cargas. Posteriormente, para verificar a possibilidade do seu uso na avaliação das condições de segurança de tensão foram calculadas margens de potência e comparadas com as margens obtidas com o método da matriz $[D']$ que usa o sistema completo.

Através de diferentes testes realizados, pode-se afirmar que o circuito equivalente entre geradores e cargas não pode ser usado para avaliar as condições de estabilidade de tensão, pois são obtidos resultados diferentes aos conseguidos quando é considerado o sistema inteiro.