

No somatório acima $n \neq k$, o que é evidente pois δ_k desaparece da Equação (8.17) quando $n = k$. Formas gerais similares das derivadas parciais podem ser encontradas a partir das Equações (8.18) e (8.19), a fim de se calcular os elementos nas outras submatrizes.

A Equação (8.20) e equações semelhantes que envolvem mais barras são resolvidas invertendo o jacobiano. Os valores encontrados para $\Delta\delta_k$ e $\Delta|V_k|$ são adicionados aos valores anteriores do módulo e ângulo da tensão, de modo a se obter os novos valores para $P_{k,calc}^{(1)}$ e $Q_{k,calc}^{(1)}$ e começar a próxima iteração. O processo é repetido até que a precisão escolhida seja satisfeita quando aplicada a todos os valores de cada matriz coluna. Entretanto, para melhorar a convergência, as estimativas iniciais da tensão devem ser razoáveis, mas isto normalmente não é problema em sistemas de potência.

As barras de tensão controladas são levadas em consideração facilmente. Desde que o módulo da tensão é constante em tais tipos de barra, omitimos no jacobiano a coluna de derivadas parciais com relação ao módulo da tensão da barra. Nesse momento, não estamos interessados no valor de Q na barra, então omitimos a linha das derivadas parciais de Q para a barra de tensão controlada. O valor de Q na barra pode ser determinado após a convergência pela Equação (8.19)*.

O método de Newton-Raphson, como já observado anteriormente, também pode ser usado quando as equações são expressas na forma retangular. Preferimos desenvolver as equações na forma polar porque o jacobiano fornece interessantes informações que são perdidas na forma retangular. Por exemplo, a dependência de P_k sobre δ_k e de Q_k sobre $|V_k|$ é observada

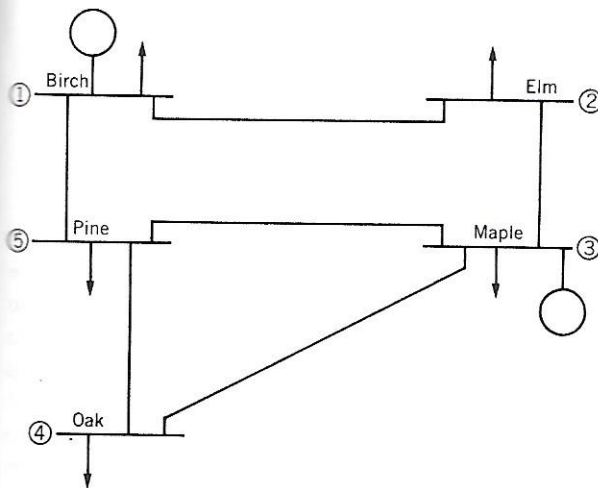


Figura 8.1 Diagrama unifilar para o Exemplo 8.1.

* Para uma explanação mais detalhada do método de Newton-Raphson e para excelentes exemplos numéricos que mostram soluções convergentes para ambos os métodos, Gauss-Seidel e Newton-Raphson, veja G. W. Stagg e A. H. El-Abiad, Métodos computacionais em Sistemas de Potência, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968, Caps. 7 e 8.

imediatamente no jacobiano quando na forma polar. Mais adiante, na Seção 8.10, veremos como os transformadores reguladores de tensão em linhas de transmissão afetam principalmente a transferência de Q em um sistema enquanto os transformadores defasadores afetam principalmente a transferência de P .

Exemplo 8.1 A Figura 8.1 mostra o diagrama unifilar de um sistema de potência muito simples. Os geradores estão conectados às barras 1 e 3. Nas barras 2, 4 e 5 estão indicadas cargas. Os valores das bases para o sistema são 100 MVA, 138 kV nas linhas de alta tensão. A Tabela 8.1 fornece as impedâncias para as seis linhas que são identificadas pelas barras nas quais elas terminam. Os megavars de carregamento listados na tabela levam em conta a capacidade distribuída das linhas e serão ignorados neste exemplo, porém discutidos na Seção 8.4 e incluídos no processamento do computador.

Tabela 8.1

Linhas barra a barra	Comprimento		R Ω	X Ω	R por-unidade	X por-unidade	Mvar† de carrega mento
	km	milha					
1-2	64,4	40	8	32	0,042	0,168	4,1
1-5	48,3	30	6	24	0,031	0,126	3,1
2-3	48,3	30	6	24	0,031	0,126	3,1
3-4	128,7	80	16	64	0,084	0,336	8,2
3-5	80,5	50	10	40	0,053	0,210	5,1
4-5	96,5	60	12	48	0,063	0,252	6,1

† 138 kV.

A Tabela 8.2 lista os valores de P , Q e V para cada barra. Como os valores de P , Q e V nas Equações (8.18) e (8.19) são positivos para as entradas ao sistema de potência ativa e de potência reativa indutiva em cada barra, os valores líquidos de P e Q por essas equações são negativos para as barras 2, 4 e 5. A potência de geração Q não é especificada onde o módulo da tensão é constante. Na coluna das tensões, os valores para as barras de carga são as estimativas originais. Os valores listados de módulo e ângulo da tensão são mantidos constantes na barra de oscilação, e o módulo de tensão listado deve ser mantido constante na barra 3. Deve ser feito um estudo de fluxo de carga pelo método de Newton-Raphson usando a forma polar das equações para P e Q . Determine o número de linhas e colunas no jacobiano. Calcule $\Delta P_2^{(0)}$ e o valor do segundo elemento da primeira linha do jacobiano, usando os valores especificados ou estimativas originais das tensões.

Solução Como a barra de oscilação não requer uma linha e coluna do jacobiano, seria necessária uma matriz 8×8 se P e Q fossem especificados para as quatro barras restantes. Entretanto, o módulo da tensão é especificado (mantido constante) para a barra 3, e o jacobiano será uma matriz 7×7 .

Tabela 8.2

Barra	Geração		Carga		V, por-unidade	Observações
	P, MW	Q, Mvar	P, MW	Q, Mvar		
1	.....	.....	65	30	1,04/0°	Barra de oscilação
2	0	0	115	60	1,00/0°	Barra de carga (indutiva)
3	180	.....	70	40	1,02/0°	Módulo de tensão constante
4	0	0	70	30	1,00/0°	Barra de carga (indutiva)
5	0	0	85	40	1,00/0°	Barra de carga (indutiva)

A fim de calcular $P_2^{(0)}$ para os valores de tensão estimada e de tensão fixada da Tabela 8.2, necessitamos apenas das admitâncias

$$Y_{21} = -\frac{1}{0,042 + j0,168} = 5,7747/104,04^\circ$$

$$Y_{23} = -\frac{1}{0,031 + j0,126} = 7,7067/103,82^\circ$$

e Y_{22} , que (desde que nenhuma outra admitância esteja ligada à barra 2) é expressa por

$$Y_{22} = -Y_{21} - Y_{23} = -|Y_{21}|/\theta_{21} - |Y_{23}|/\theta_{23}$$

Da Equação (8.18), como Y_{24} e Y_{25} são nulos e como os valores iniciais $\delta_1^{(0)} = \delta_2^{(0)} = \delta_3^{(0)} = 0$

$$\begin{aligned} P_{2,\text{calc}}^{(0)} &= |V_2 V_1 Y_{21}| \cos \theta_{21} - |V_2 V_2 Y_{21}| \cos \theta_{21} \\ &\quad - |V_2 V_2 Y_{23}| \cos \theta_{23} + |V_2 V_3 Y_{23}| \cos \theta_{23} \\ &= (1,0 \times 1,04 - 1,0 \times 1,0) |Y_{21}| \cos \theta_{21} \\ &\quad - (1,0 \times 1,0 - 1,0 \times 1,02) |Y_{23}| \cos \theta_{23} \\ &= 0,04 \times 5,7747 \cos 104,04^\circ + 0,02 \times 7,7067 \cos 103,82^\circ \\ &= -0,0560 - 0,0368 = -0,0928 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

A potência programada para a barra 2 é

$$-\frac{115}{100} = -1,15 \text{ p.u.}$$

SAVE THE TREES POWER COMPANY - ESTUDO DE FLUXO DE CARGA
 RELATÓRIO DE CÁLCULOS DE FLUXO DE CARGA PARA A ÁREA 1.

BARRA	NOME	VOLTS	ANGULO	MW	GERAÇÃO	MVAR	MVA	MW	MVAR	CAP/REAT	MVAR	PARA A BARRA	NOME	MW	MVAR	TAP
1	BIRCH	1.040	0.0	234.7	100.1	65.0	30.0									
2	ELM	0.961	-6.3	0.0	0.0	115.0	60.0									
3	MAPLE	1.020	-3.7	180.0	110.3R	70.0	40.0									
4	OAK	0.920	-10.9	0.0	0.0	70.0	30.0									
5	PINE	0.968	-6.2	0.0	0.0	85.0	40.0									
TOTAIS NA AREA				414.7	210.4	405.0	200.0									

DATA	26/04/79	TEMPO	00.00.12
3 ITERATIONS, A BARRA DE OSCILAÇÃO É 1.			
PARA A BARRA LIN E - F L U M			
3	ELM	73.98	31.55
5	PINE	63.68	38.52
1	BIRCH	-71.41	-25.39
3	MAPLE	-43.56	-34.60
2	ELM	44.59	35.65
4	OAK	40.46	18.06
5	PINE	24.95	16.58
3	MAPLE	-38.74	-10.90
5	PINE	-31.25	-11.00
1	BIRCH	-92.59	-29.14
4	OAK	-24.74	-8.77
4	OAK	32.03	

TEMPO DE SOLUÇÃO	0.10	SEGUNDOS
TEMPO TOTAL	0.54	SEGUNDOS

Figura 8.2 Solução por computador de fluxo de carga para o sistema do Exemplo 8.1. A base é 100 MVA.

valores especificados pelas Equações (10.15). Portanto, se interpretarmos as impedâncias de transferência indicadas nesse circuito como foi descrito anteriormente, o circuito é o equivalente ao da Figura 10.11 com S aberta e da Figura 10.12 com S fechada, sendo que ainda estamos desprezando a corrente anterior à falta.

Naturalmente, podemos simular curto-circuitos nas outras barras de uma maneira semelhante e podemos estender este procedimento a uma rede generalizada tendo um número qualquer de nós. Poderíamos indicar as outras impedâncias de transferência do circuito equivalente por meio de colchetes adicionais e só não o fizemos porque ficaria muito confuso com tantos colchetes para indicar as impedâncias de transferência. De fato, geralmente omitimos os colchetes quando traçamos este equivalente da rede para a matriz de impedância de barra, porém devemos ter em mente que as impedâncias de transferência existem e devem ser consideradas na interpretação da rede.

Exemplo 10.4 Determinar a matriz-impedância de barra para a rede do Exemplo 8.1, para a qual os resultados do estudo de fluxo de potência são mostrados na Figura 8.2. Os geradores nas barras 1 e 3 possuem valores nominais de 270 e 225 MVA, respectivamente. As reatâncias subtransitórias dos geradores mais as reatâncias dos transformadores que os conecta às barras são iguais a 0,30 p.u. cada um, tomando como base os valores nominais dos geradores. As relações de transformação dos transformadores são tais que a tensão-base em cada circuito de gerador é igual à tensão nominal do gerador. Incluir as reatâncias dos geradores e transformadores na matriz. Achar a corrente subtransitória numa falta trifásica na barra 4 e a corrente que chega à barra em falta através de cada linha. A corrente antes da falta pode ser desprezada e todas as tensões são consideradas iguais a 1,0 p.u. antes da ocorrência da falta. A base do sistema é 100 MVA. Desprezar todas as resistências.

Solução Convertidas para a base de 100 MVA, as reatâncias combinadas dos geradores e transformadores são

$$\text{Gerador na barra 1: } X = 0,30 \times \frac{100}{270} = 0,1111 \text{ p.u.}$$

$$\text{Gerador na barra 3: } X = 0,30 \times \frac{100}{225} = 0,1333 \text{ p.u.}$$

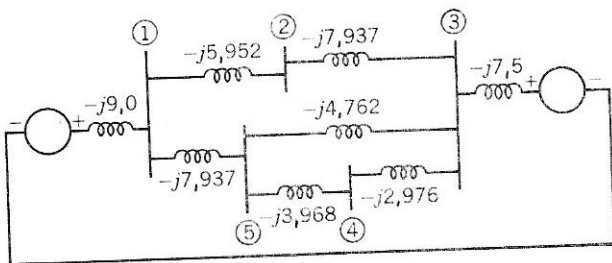


Figura 10.14 Diagrama de reatâncias para o Exemplo 10.4.

A rede com admitâncias representadas em p.u. é mostrada na Figura 10.14 da qual obtemos a matriz admitância dos nós:

$$Y_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} -22,889 & 5,952 & 0,0 & 0,0 & 7,937 \\ 5,952 & -13,889 & 7,937 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 7,937 & -23,175 & 2,976 & 4,762 \\ 0,0 & 0,0 & 2,976 & -6,944 & 3,968 \\ 7,937 & 0,0 & 4,762 & 3,968 & -16,667 \end{bmatrix}$$

Esta matriz 5×5 é invertida num computador digital, dando a matriz de curto-circuito

$$Z_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} 0,0793 & 0,0558 & 0,0382 & 0,0511 & 0,0608 \\ 0,0558 & 0,1338 & 0,0664 & 0,0630 & 0,0605 \\ 0,0382 & 0,0664 & 0,0875 & 0,0720 & 0,0603 \\ 0,0511 & 0,0630 & 0,0720 & 0,2321 & 0,1002 \\ 0,0608 & 0,0605 & 0,0603 & 0,1002 & 0,1301 \end{bmatrix}$$

Visualizando a rede de forma semelhante à da Figura 10.13, será mais fácil encontrarmos as correntes e tensões desejadas.

A corrente subtransitória numa falta trifásica na barra 4 é

$$I'' = \frac{1,0}{j0,2321} = -j4,308 \text{ p.u.}$$

Nas barras 3 e 5 as tensões são

$$V_3 = 1,0 - (-j4,308)(j0,0720) = 0,6898 \text{ p.u.}$$

$$V_5 = 1,0 - (-j4,308)(j0,1002) = 0,5683 \text{ p.u.}$$

As correntes para a falta são

$$\text{Da barra 3: } 0,6898(-j2,976) = -j2,053$$

$$\text{Da barra 4: } 0,5683(-j3,968) = -j2,255 \\ -j4,308 \text{ p.u.}$$

Da mesma matriz de curto-circuito, podemos obter informações semelhantes para faltas em quaisquer outras barras.