Universidade
Federal do Ceará

Distribuição de Energia Elétrica

Fluxo de Carga

Prof. Lucas S Melo

Junho de 2017

Análise de fluxo de carga

As análises realizadas em sistemas de distribuição consistem em dois tipos:

- análise sob condições normais de operação: esdudo de fluxo de carga;
- análise sob condições anormais de operação: esdudo de curto-circuito;

Com os modelos de cada um dos componentes que constituem o sistema de distribuição essas análises tornam-se possíveis de serem realizadas.

Análise de fluxo de carga

A análise de fluxo de carga de um alimentador de distribuição é bem semelhante aquela de um sistema de transmissão inter-conectado.

Os dados iniciais da análise geralmente são:

- As tensões na barra da subestação;
- A potêcia das cargas conectadas ao sistema e como estas se comportam (potência constante, impedância constante e corrente constante);
- Tipos e comprimento dos condutores.

Análise de fluxo de carga

A saída do fluxo de carga deve determinar:

- Magnitudes e ângulos das tensões em cada um dos nós do sistema;
- Fluxo de corrente em cada trecho;
- Perdas no sistema;
- Potência total de entrada.

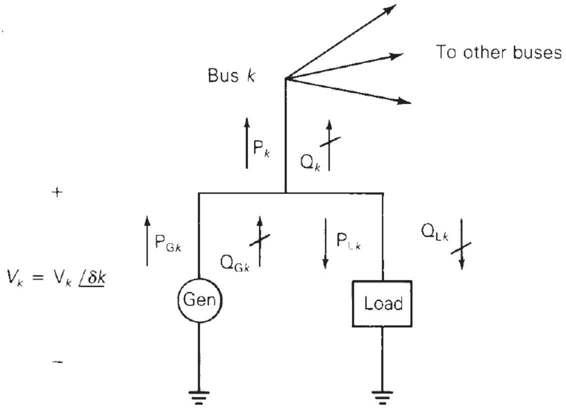
Fluxo de carga geral

Conforme mostrado na figura, para cada barra k teremos as seguintes variáveis:

- tensão na barra V_k;
- ângulo de fase da tensão δ_k;
- potência ativa equivalente da barra P_k;
- potência reativa equivalente da barra Q_k;

No problema do fluxo de carga apenas duas dessas variáveis são especificadas como dados de entrada, as outras duas são desconhecidas e serão determinadas pelo **algoritmo**.

Fluxo de carga geral



Fluxo de carga geral

Para cada uma da barras temos que:

$$P_k = P_{GK} - P_{LK} \tag{1}$$

$$Q_k = Q_{GK} - Q_{LK} \tag{2}$$

Cada barra é classificada de acordo com as variáveis que estão disponíveis como dado de entrada:

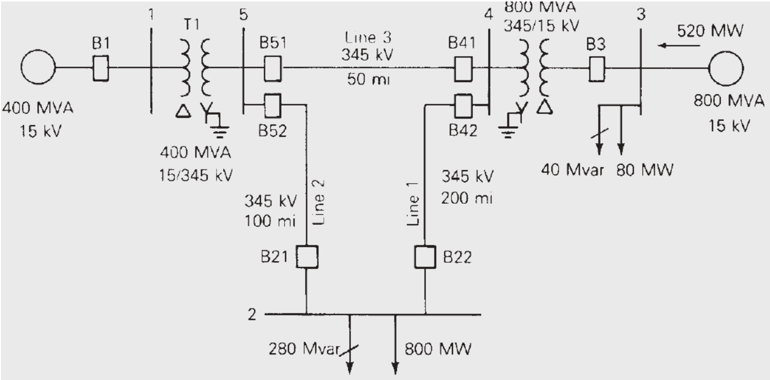
- **Barra de referência (Swing)**: Para essa barra são conhecidos módulo e ângulo da tensão, geralmente $1,0\underline{/0,0^\circ}$;
- **Barra de carga (PQ)**: São conhecidos potência ativa e reativa consumidas/geradas pela barra;
- **Barra de tensão controlada (PV)**: São conhecidos potência ativa e tensão na barra.

Fluxo de carga geral

Com base nos parâmetros das **linhas de transmissão**, ou seja, os parâmetros de impedância série e admitância em paralelo e dos **transformadores** que existem no sistema é possível montar a matriz de admitância Y_{barra}, em que:

y_{kk} = soma das admitâncias conecatdas na barra k;
y_{kn} = soma das admitâncias conectadas entre as barras k e n, em que $k \neq n$

Fluxo de carga geral



Fluxo de carga geral

Um sistema elétrico de potência qualquer pode ser representado por meio da seguinte expressão:

$$I = Y_{barra} \cdot V \tag{3}$$

Em I é o vetor de correntes injetadas em cada uma das barras do sistema, V é o vetor de tensões em cada uma das barras do sistema, e Y_{barra} é a matriz de admitâncias do sistema.
Para uma barra qualquer k:

$$I_k = \sum_{n=1}^{N} Y_{kn} V_n \tag{4}$$

A potência equivalente de cada barra k é dada por:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k \cdot I_k^* \tag{5}$$

Fluxo de carga geral

Substtituindo a equação 4 em 5:

$$P_k + jQ_k = V_k \cdot \left[\sum_{n=1}^{N} Y_{kn} V_n \right]^* \quad k = 1, 2, ..., N \tag{6}$$

Como $V_n = V_n e^{j\delta_n}$ e $Y_{kn} = Y_{kn} e^{j\theta_{kn}}$, então:

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^{N} Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})} \tag{7}$$

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^{N} Y_{kn} V_n cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \tag{8}$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^{N} Y_{kn} V_n sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \tag{9}$$

Fluxo de carga geral

As equações dadas por $I = Y_{barra} \cdot V$ são um sistema de equações lineares da forma:

$$y = A \cdot x \tag{10}$$

Considerando uma linha da equação matricial $Ax = y$, temos:

$$y_k = a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + ... + a_{kk}x_k + ... + a_{kn}x_n \tag{11}$$

Isolando x_k:

$$x_k = \frac{1}{a_{kk}}\left[y_k - (a_{k1}x_1 + ... + a_{k,k-1}x_{k-1} + a_{k,k+1}x_{k_1} + ... + a_{kn}x_n)\right]$$

Fluxo de carga geral

Em notação simplificada teremos:

$$x_k = \frac{1}{a_{kk}} \left[y_k - \sum_{1}^{k-1} a_{kn} x_n - \sum_{k+1}^{n} a_{kn} x_n \right] \tag{12}$$

No problema de fluxo de carga ($I = Y_{barra} \cdot V$) o vetor de tensões deve ser calculado.

Do mesmo modo para resolvermos $Ax = y$ dados os valores de A e de y, o método de Gauss-Seidel resolve que:

$$x_k(i+1) = \frac{1}{a_{kk}} \left[y_k - \sum_{n=1}^{k-1} a_{kn} x_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^{N} a_{kn} x_n(i) \right] \tag{13}$$

Fluxo de carga geral

Como o problema de fluxo de carga trata-se de um problema não-linear para resolvermos $I = Y_{barra} \cdot V$ utilizaremos as técnicas de resolção de um sistema linear em um sistema não linear, pois o que ocorre é que **as cargas do sistema elétrico são especificadas em termos de potências ativas e reativas (PQ) ou tem termos de tensão e potência ativa (PV)**.

Dessa forma **as equações do problema de fluxo de carga são não lineares**.

Fluxo de carga geral

Resolvendo então $I = Y_{barra} \cdot V$ para V considera-se para uma barra de carga k:

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \tag{14}$$

Aplicando um dos métodos iterativos (Gauss-Seidel) para resolução desse problema teremos:

$$V_k(i+1) = \frac{1}{y_{kk}} \cdot \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*(i)} - \sum_{n=1}^{k-1} y_{kn} V_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^{N} y_{kn} V_n(i) \right] \tag{15}$$

Fluxo de carga geral

Comparando as expressões do método de Gauss-Seidel para $Ax = y$ e para o caso elétrico $I = Y_{barra} \cdot V$, temos:

$$x_k(i+1) = \frac{1}{a_{kk}}\left[y_k - \sum_{n=1}^{k-1} a_{kn}x_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^{N} a_{kn}x_n(i)\right] \tag{16}$$

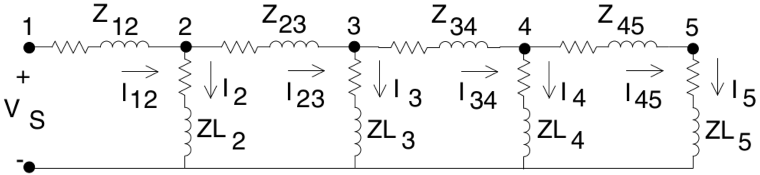
$$V_k(i+1) = \frac{1}{y_{kk}} \cdot \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*(i)} - \sum_{n=1}^{k-1} y_{kn}V_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^{N} y_{kn}V_n(i)\right] \tag{17}$$

Fluxo de carga radial

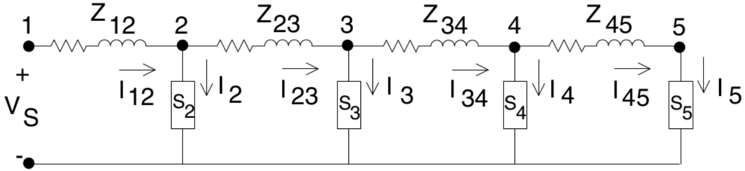
- Em sistemas de distribuição, como **prevalece alimentadores radiais**, as técnicas iterativas utilizadas na transmissão não são utilizadas, até mesmo por questões de convergência.
- É comum a utilização de técnicas iterativas especiais, como por exemplo a **varredura direta-inversa** ou **foward-backward sweep**.

Fluxo de carga radial

Fluxo de carga linear:



Fluxo de carga não linear:



Fluxo de carga radial

No fluxo de carga linear as correntes nas cargas são calculadas como:

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \tag{18}$$

No caso mais comum temos o fluxo de carga não linear em que as cargas são especificadas como potências e não como impedâncias:

$$I_n = \left(\frac{S_n}{V_n}\right)^* \tag{19}$$

Fluxo de carga radial

Na **varredura direta**, ou seja, da barra da subestação para os nós de cargas mais distantes, as tensões em cada um dos nós é calculada, sendo que na primeira iteração a tensão da barra da subestação é atribuída a todos os nós.

Na varredura inversa, ou seja, dos nós mais distantes para a barra da subestação, os fluxos de corrente em cada um dos trechos de linha são calculados.

Esse é processo é repetido até que se alcance a precisão desejada de uma iteração para outra, ou seja:

$$max(|V_i - V_{i-1}|) < \epsilon \tag{20}$$