UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Distribuição de Energia Elétrica

Modelagem de cargas

Prof. Lucas S Melo

Junho de 2017

O que é carga?

O termo carga pode assumir diferentes significados, dependendo do contexto em que é empregado. Agumas definições são:

- Um equipamento coectado ao sistema de potêcia que consome energia;
- A energia total consumida por todos os equipamentos conectados ao sistema de potência;
- Uma porção do sistema que não é representada detalhadamente, mas é tratada como se fosse um único elemento consumidor de potência, conectado a um barramento.

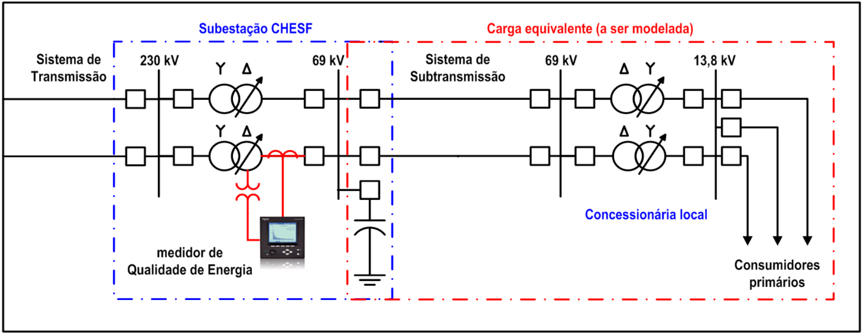
O que é carga?

Em especial, a última definição estabelece que, uma vez escolhido um barramento de carga, **tudo que estiver conectado a jusante deste barramento está agregado num um equivalente, classificado como carga**;

A carga é então medida em termos da potência consumida por este equivalente.

A tensão elétrica medida no barramento de carga é definida como **a variável de perturbação do fenômeno, ou a variável de entrada do modelo**.

O que é carga?



Subestação CHESF
Carga equivalente (a ser modelada)
Sistema de
Transmissão
230 kV
Y Δ
69 kV
Sistema de
Subtransmissão
69 kV
Δ Y
13,8 kV
Y Δ
Δ Y
Concessionária local
medidor de
Qualidade de Energia
Consumidores
primários

O que é carga?

A carga “vista” a jusante do medidor de qualidade de energia inclui:

- os bancos de capacitores para compensação de potência reativa;
- linhas do sistema de subtransmissão;
- alimentadores de distribuição primária e secundária;
- transformadores; e
- qualquer equipamento conectado a esta rede.

Modelos de cargas

Tipicamente as cargas são especificadas pelo seu consumo de:

- Potência ativa e potência reativa;
- Potência ativa e fator de potência;
- Potência aparente e fator de potência.

Modelos de cargas

Para sabermos qual o consumo de potência da carga é necessário sabermos em que tensão a carga está conectada, essa informação geralmente só é conhecida na barra da subestação, e assim não é possível sabermos a corrente solicitada pela carga e portanto a tensão também é desconhecida.

$$S_{3\varphi} = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \tag{1}$$

Por isso é necessário fazer uso de técnicas iterativas para que sejam encontradas as correntes solicitadas e as tensões de conexão das cargas.

Modelos de cargas

As cargas em um alimentador podem ser modeladas, quanto ao tipo de ligação, como:

- Conectadas em Y;
- Conectadas em delta;
- Bifásicas;
- Monofasicas.

Níveis de desbalanceamento também podem ser adotados e podem ser consideradas cargas com as características de:

- Potência constante;
- Corrente constante;
- Impedâcnia constante;
- Combinações de qualquer uma dessas.

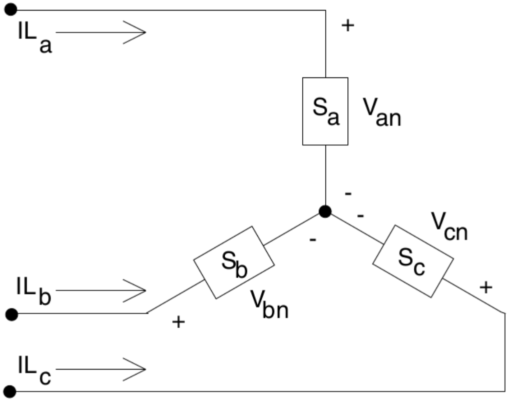
Modelos de cargas

Os modelos de cargas serão utilizados nas análises de fluxo de carga;

Ao realizarmos o estudo de fluxo de carga as tensões em que as cargas estão conectadas ficarão definidas;

Para quaisquer dos tipos de cargas o cálculo das correntes será necessário, o que será feito a partir de agora.

Cargas conectdas em Y



Cargas conectadas em Y

Para cargas conectadas em Y:

$$\begin{array}{llll} \text{fase a} & |S_a|\underline{/\theta_a} = P_a + jQ_a & |V_{an}|\underline{/\delta_a} \\ \text{fase b} & |S_b|\underline{/\theta_b} = P_b + jQ_b & |V_{bn}|\underline{/\delta_b} \\ \text{fase c} & |S_c|\underline{/\theta_c} = P_c + jQ_c & |V_{cn}|\underline{/\delta_c} \end{array}$$

Cargas conectdas em Y

Para cargas com potência constante:

$$I_a = \left(\frac{S_a}{V_{an}}\right)^* = \frac{|S_a|}{|V_{an}|}\underline{/\delta_a - \theta_a} = |I_a|\underline{/\alpha_a} \tag{2}$$

$$I_b = \left(\frac{S_b}{V_{bn}}\right)^* = \frac{|S_b|}{|V_{bn}|}\underline{/\delta_b - \theta_b} = |I_b|\underline{/\alpha_b} \tag{3}$$

$$I_c = \left(\frac{S_c}{V_{cn}}\right)^* = \frac{|S_c|}{|V_{cn}|}\underline{/\delta_c - \theta_c} = |I_c|\underline{/\alpha_c} \tag{4}$$

Para este modelo **as tensões irão variar** durante cada iteração do algoritmo de fluxo de carga, até que seja alcançada a convergência.

Cargas conectadas em Y

Para cargas consideradas como impedâcia constante:

$$Z_a = \frac{|V_{an}|^2}{S_a^*} = \frac{|V_{an}|^2}{|S_a|}\underline{/\theta_a} = |Z_a|\underline{/\theta_a} \tag{5}$$

$$Z_b = \frac{|V_{bn}|^2}{S_b^*} = \frac{|V_{bn}|^2}{|S_b|}\underline{/\theta_b} = |Z_b|\underline{/\theta_b} \tag{6}$$

$$Z_c = \frac{|V_{cn}|^2}{S_c^*} = \frac{|V_{cn}|^2}{|S_c|}\underline{/\theta_c} = |Z_c|\underline{/\theta_c} \tag{7}$$

Cargas conectadas em Y

Calculando as correntes teremos:

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{|V_{an}|}{|Z_a|}\underline{/\delta_a - \theta_a} = |I_a|\underline{/\alpha_a} \tag{8}$$

$$I_b = \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{|V_{bn}|}{|Z_b|}\underline{/\delta_b - \theta_b} = |I_b|\underline{/\alpha_b} \tag{9}$$

$$I_c = \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{|V_{cn}|}{|Z_c|}\underline{/\delta_c - \theta_c} = |I_c|\underline{/\alpha_c} \tag{10}$$

Para este modelo as **tensões irão variar** durante cada iteração do algoritmo de fluxo de carga, **mas as impedâncias calculadas nas equações 5, 6 e 7 permanecem constantes**.

Cargas conectadas em Y

Para cargas consideradas corrente constante:

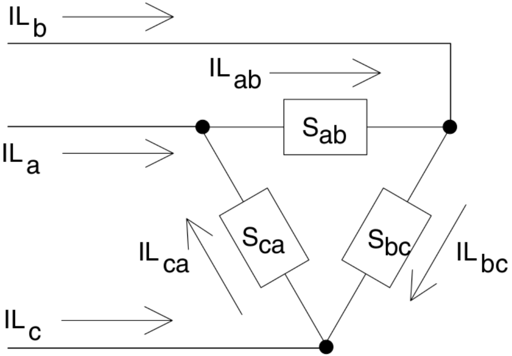
$$I_a = |I_a| \underline{/\delta_a - \theta_a} \tag{11}$$

$$I_b = |I_b| \underline{/\delta_b - \theta_b} \tag{12}$$

$$I_c = |I_c| \underline{/\delta_c - \theta_c} \tag{13}$$

Em que I_{abc} é calculado de acordo com com as equações 2, 3 e 4 e permanece constante durante o cálculo do fluxo de carga, alterando-se somente o ângulo da tensão δ.

Cargas conectdas em delta



Cargas conectadas em delta

Para cargas conectadas em delta, tem-se:

$$
\begin{array}{lll}
\text{fase ab} & |S_{ab}|\underline{/\theta_{ab}} = P_{ab} + jQ_{ab} & |V_{ab}|\underline{/\delta_{a}} \\
\text{fase bc} & |S_{bc}|\underline{/\theta_{bc}} = P_{bc} + jQ_{bc} & |V_{bc}|\underline{/\delta_{bc}} \\
\text{fase ca} & |S_{ca}|\underline{/\theta_{ca}} = P_{ca} + jQ_{ca} & |V_{ca}|\underline{/\delta_{ca}}
\end{array}
$$

Cargas conectadas em delta

Para cargas com potência constante:

$$I_{ab} = \left(\frac{S_{ab}}{V_{ab}}\right)^* = \frac{|S_{ab}|}{|V_{ab}|}\underline{/\delta_{ab} - \theta_{ab}} = |I_{ab}|\underline{/\alpha_{ab}} \tag{14}$$

$$I_{bc} = \left(\frac{S_{bc}}{V_{bc}}\right)^* = \frac{|S_{bc}|}{|V_{bc}|}\underline{/\delta_{bc} - \theta_{bc}} = |I_{bc}|\underline{/\alpha_{bc}} \tag{15}$$

$$I_{ca} = \left(\frac{S_{ca}}{V_{ca}}\right)^* = \frac{|S_{ca}|}{|V_{ca}|}\underline{/\delta_{ca} - \theta_{ca}} = |I_{ca}|\underline{/\alpha_{ca}} \tag{16}$$

Para este modelo **as tensões irão variar** durante cada iteração do algoritmo de fluxo de carga, até que seja alcançada a convergência.

Cargas conectadas em delta

Para cargas consideradas como impedâcia constante:

$$Z_{ab} = \frac{|V_{ab}|^2}{S_{ab}^*} = \frac{|V_{ab}|^2}{|S_{ab}|}\underline{/\theta_{ab}} = |Z_{ab}|\underline{/\theta_{ab}} \tag{17}$$

$$Z_{bc} = \frac{|V_{bc}|^2}{S_{bc}^*} = \frac{|V_{bc}|^2}{|S_{bc}|}\underline{/\theta_{bc}} = |Z_{bc}|\underline{/\theta_{bc}} \tag{18}$$

$$Z_{ca} = \frac{|V_{ca}|^2}{S_{ca}^*} = \frac{|V_{ca}|^2}{|S_{ca}|}\underline{/\theta_{ca}} = |Z_{ca}|\underline{/\theta_{ca}} \tag{19}$$

Cargas conectadas em delta

Calculando as correntes teremos:

$$I_{ab} = \frac{V_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{|V_{ab}|}{|Z_{ab}|}\underline{/\delta_{ab} - \theta_{ab}} = |I_{ab}|\underline{/\alpha_{ab}} \tag{20}$$

$$I_{bc} = \frac{V_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{|V_{bc}|}{|Z_{bc}|}\underline{/\delta_{bc} - \theta_{bc}} = |I_{bc}|\underline{/\alpha_{bc}} \tag{21}$$

$$I_{ca} = \frac{V_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{|V_{ca}|}{|Z_{ca}|}\underline{/\delta_{ca} - \theta_{ca}} = |I_{ca}|\underline{/\alpha_{ca}} \tag{22}$$

Para este modelo as **tensões irão variar** durante cada iteração do algoritmo de fluxo de carga, **mas as impedâncias calculadas nas equações 17, 18 e 19 permanecem constantes**.

Cargas conectadas em delta

Para cargas consideradas corrente constante:

$$I_{ab} = |I_{ab}| \underline{/\delta_{ab} - \theta_{ab}} \tag{23}$$

$$I_{bc} = |I_{bc}| \underline{/\delta_{bc} - \theta_{bc}} \tag{24}$$

$$I_{ca} = |I_{ca}| \underline{/\delta_{ca} - \theta_{ca}} \tag{25}$$

Em que I_{abc} é calculado de acordo com com as equações 14, 15 e 16 e permanece constante durante o cálculo do fluxo de carga, alterando-se somente o ângulo da tensão δ.

Cargas conectadas em delta

Como deve ter ficado claro nas equações desenvolvidas anteriormente, as correntes encontradas são correntes de fase.
Para os cálculos de solicitação elétrica da subestação e perdas e queda de tensão nas linhas é preciso encontrar as conrrentes de linha do sistema.
Isso é feito por meio da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \tag{26}$$

Cargas monofásicas

Cargas bifásicas ou monofásicas são representadas considerando as **correntes das fases que não estão conectadas como *zero***.

As correntes das demais fases são calculadas levando em consideração o mesmo equacionamento apresentado anterirormente.

Modelo ZIP de cargas

No modelo ZIP, para uma carga modelada como impedância constante:

$$P(t) = P_0 \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^2 \tag{27}$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^2 \tag{28}$$

Modelo ZIP de cargas

No modelo ZIP, para uma carga modelada como corrente constante:

$$P(t) = P_0 \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right) \tag{29}$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right) \tag{30}$$

Modelo ZIP de cargas

No modelo ZIP, para uma carga modelada como potência constante:

$$P(t) = P_0 \tag{31}$$

$$Q(t) = Q_0 \tag{32}$$

Modelo ZIP de cargas

Dessa forma uma carga pode ser modelada como parcelas de cada uma das características de cargas:

$$P(t) = P_0 \cdot \left[\alpha \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right) + \gamma \right] \tag{33}$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot \left[\alpha \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{V(t)}{V_0} \right) + \gamma \right] \tag{34}$$

Com $\alpha + \beta + \gamma = 1$

Modelo ZIP de cargas

As tabela abaixo mostra algumas aproximações de cargas a serem adotadas:

Componentes de Carga	**Comportamento x Variações na Tensão**
Lâmpadas Incandescentes, Aquecedores e Resistores	Potência ativa varia somente com a tensão
Motores de Indução	As potências ativa e reativa variam com a tensão
Lâmpadas de Descarga	Ambas as potências não variam com tensão
Conversores	Apenas a potência reativa varia com a tensão
Fornos Elétricos	Somente a potência ativa varia com a tensão

Tipo de alimentador	**Potência Const. %**	**Impedância Const. %**
Residencial e comercial (pico do verão)	67	33
Residencial e comercial (pico do inverno)	40	60
Urbano	50	50
Industrial	100	0

Bancos de capacitores

Bancos de capacitores em derivação são comumente utilizados em sistemas de distribuição como recurso para regulação de tensão e correção de fator de potência e são modelados como susceptâncias constantes conectadas ou em estrela ou delta.

Capacitores conectados em estrela

Para o cálculo da corrente consumida pelos bancos de capacitores:

$$I_a = j \cdot B_a \cdot V_{an} \tag{35}$$

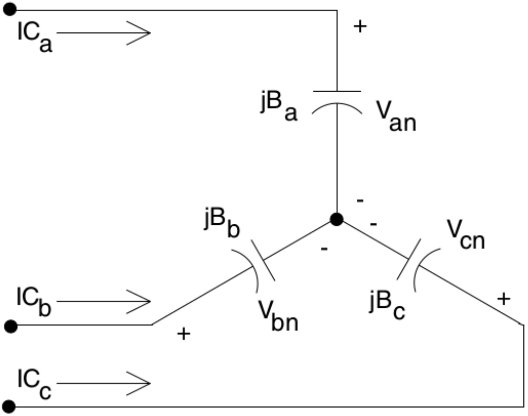
$$I_b = j \cdot B_b \cdot V_{bn} \tag{36}$$

$$I_c = j \cdot B_c \cdot V_{cn} \tag{37}$$

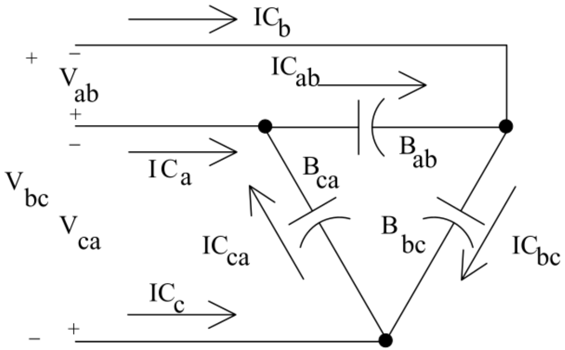
Em que:

$$B_c = \frac{Q_c}{V_{fase}^2} \tag{38}$$

Capacitores conectados em estrela



Capacitores conectados em delta



Capacitores conectados em delta

Neste caso teremos:

$$I_{ab} = j \cdot B_a \cdot V_{ab} \tag{39}$$

$$I_{ab} = j \cdot B_b \cdot V_{bc} \tag{40}$$

$$I_{ca} = j \cdot B_c \cdot V_{ca} \tag{41}$$

Em que:

$$B_c = \frac{Q_c}{V_{linha}^2} \tag{42}$$

Capacitores conectados em delta

Novamente, para obter as correntes de linha em função das correntes de fase, aplica-se:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \tag{43}$$