

- 5.1 O condutor de alumínio puro, identificado pelo nome código *Bluebell*, é composto por 37 fios de 0,167" de diâmetro cada um. As tabelas de características de condutores de alumínio puro apresentam uma área de 1.033.500 CM para este condutor. Verificar se estes valores são compatíveis. Determinar a área em milímetros quadrados.
- 5.2 Determinar a resistência c.c. em Ohms por quilômetro para o condutor *Bluebell* a 20°C usando a equação de resistência c.c. dada em aula. Comparar o resultado com o valor tabelado de 0,01678 Ω /1000 pés. Calcular a resistência c.c. em Ohms por quilômetro a 50°C e comparar o resultado com a resistência c.a. a 60 Hz de 0,1024 Ω /milha, apresentado nas tabelas. Explicar as eventuais diferenças entre os valores obtidos. Considerar $\rho_{Al,20^\circ} = 2,83 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e $T = 228^\circ C$.
- 5.3 Dois condutores sólidos de seção circular com diâmetro de 0,412 cm estão afastados de 3 m e constituem uma linha monofásica de 60 Hz. Determine a indutância da linha em mH/milha. Determinar a parcela desta indutância que é devida ao fluxo interno. Considerar desprezível o efeito pelicular.
- 5.4 Determinar o RMG de um condutor de três fios em termos do raio r de cada um dos fios constituintes. Determinar o raio de um único condutor sólido que apresente o mesmo valor de RMG. Verificar qual é a configuração em que se consome mais material condutor. Determinar qual configuração resulta em maiores perdas de potência ativa para um mesmo valor de corrente.
- 5.5 Uma linha trifásica de 60 Hz tem os seus condutores alinhados horizontalmente. Estes condutores possuem um RMG de 0,0133 m com 10 m entre condutores adjacentes. Determinar a reatância indutiva por fase em Ohms/km. Identificar o nome do condutor.
- 5.6 Uma linha trifásica de 60 Hz possui um único condutor CAA tipo *Bluejay* por fase, disposto horizontalmente com espaçamento de 11 m entre condutores adjacentes. Compare a reatância indutiva em Ohms/km por fase desta linha com a de outra, na qual fossem usados dois condutores CAA 26/7 com a mesma seção transversal total de alumínio que a de uma linha de condutor único e 11 m medidos de centro a centro dos cabos duplos. Os condutores de cada fase estão 40 cm afastados.
- 5.7 Uma linha monofásica é composta por dois condutores sólidos com diâmetros iguais a 0,229". Os condutores estão afastados de 10' entre si e 25' acima do solo. Comparar as capacitâncias ao neutro em Farads por metro da linha considerando ou não o efeito da terra.
- 5.8 Calcular a reatância capacitiva em $\Omega \cdot km$ de uma linha trifásica de cabos múltiplos a 60 Hz, com três condutores CAA tipo *Rail* por cabo afastados 45 cm entre si. Os espaçamentos entre cabos são de 9 m, 9 m e 18 m. Por razões de projeto, deseja-se que a capacitância ao neutro seja 10% maior. Calcular a nova distância entre os condutores de cada fase, mantida a distância entre centros das fases.
- 5.9 Uma linha trifásica com um condutor CAA tipo *Linnnet* por fase em configuração horizontal deve ter uma reatância capacitiva máxima de 0,21 M Ω ·mi. Calcular a distância entre fases.
- 5.10 Uma linha trifásica de circuito simples a 60 Hz, com 18 km é composta de condutores *Partridge* com espaçamento equilátero. A distância entre os centros das fases é 1,6 m. A linha fornece 2500 kW a 11 kV para uma carga equilibrada. Calcular a tensão na barra transmissora quando o fator de potência for de (a) 80% atrasado, (b) unitário e (c) 90% adiantado. Comparar os resultados obtidos. Admitir uma temperatura de 50°C nos condutores.
- 5.11 Uma linha de transmissão trifásica, 345 kV, 60 Hz, transposta, 200 km, tem dois condutores do tipo 795 MCM, 26/2 ACSR, por fase. Seus parâmetros são:

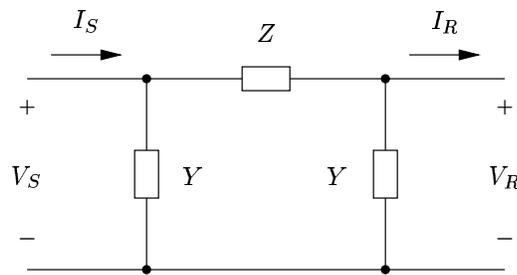
$$z = 0,032 + j 0,35 \Omega/\text{km}$$

$$y = j 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}$$

No final da linha está conectada uma carga de 700 MW, fator de potência 99% adiantado, que é alimentada com 95% da tensão nominal. Para essa linha tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

em que V_S e I_S referem-se ao início da linha (*sending end*), e V_R e I_R ao final da linha (*receiving end*). A linha pode também ser representada pelo modelo π :



- Obter relações entre os parâmetros $ABCD$ e os do modelo π .
- Obter os parâmetros $ABCD$ e os parâmetros do modelo π considerando o modelo de linha longa.
- Obter os parâmetros $ABCD$ e os parâmetros do modelo π considerando o modelo de linha média. Neste caso, considerar que as seguintes aproximações podem ser feitas em relação à linha longa:

$$\sinh \gamma l \approx \gamma l$$

$$\cosh \gamma l \approx 1 + (\gamma l)^2 / 2$$

$$\text{tgh } \gamma l / 2 \approx \gamma l / 2$$

- Obter os parâmetros $ABCD$ e os parâmetros do modelo π considerando o modelo de linha curta. Neste caso, considerar $y \rightarrow 0$ nas equações de linha média.
- Considerar o modelo de linha média obtido no item (c) e calcular a tensão, corrente e potência no início da linha para as condições de carga especificadas.
- A *regulação de tensão* de uma linha de transmissão é definida como a variação de tensão no final da linha variando-se a carga desde circuito aberto até plena carga, mantendo-se constante a tensão no início da linha, ou seja:

$$\text{RT}\% = \frac{|V_R^{\text{ca}}| - |V_R^{\text{pc}}|}{|V_R^{\text{pc}}|} \cdot 100\%$$

em que ca refere-se a *circuito aberto* e pc a *plena carga*. Calcular a regulação de tensão para as condições do problema.

- A *eficiência da transmissão* é definida como:

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \cdot 100\%$$

Calcular a eficiência da transmissão para as condições do problema.

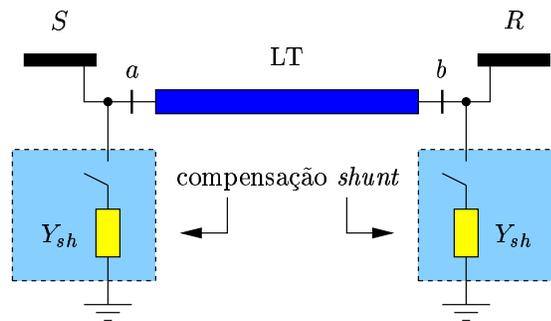
5.12 Considerar uma linha de transmissão trifásica, 765 kV, 60 Hz, 300 km, transposta, com os seguintes parâmetros:

$$z = 0,0165 + j 0,3306 \Omega/\text{km}$$

$$y = j 4,674 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}$$

- Calcular os parâmetros $ABCD$ da linha considerando o modelo de linha longa.
- Calcular os parâmetros do modelo π .
- Conecta-se no final da linha uma carga de 1,9 kA, fator de potência unitário, a 730 kV. Calcular a regulação de tensão da linha.
- Com o objetivo de controlar os níveis de tensão, utiliza-se uma técnica chamada de *compensação reativa* de linhas, que consiste na conexão apropriada de bancos de indutores e/ou capacitores junto a elas. Estes equipamentos são conectados em paralelo (conexão *shunt*) com a linha.

Considerar que indutores sejam conectados à linha conforme mostra a figura a seguir.



Cada um deles tem uma capacidade de compensação de 75%, ou seja:

$$Y_{sh} = -0,75 Y_1$$

em que Y_1 é a admitância *shunt* do modelo π da linha, calculada no item (b). Considerando ainda que os bancos de indutores somente entram em operação quando a linha estiver em vazio¹, calcular a regulação de tensão da linha compensada.

- Com o objetivo de aumentar a capacidade de carregamento da linha, utiliza-se também a compensação reativa de linhas, que consiste na conexão apropriada de bancos de capacitores junto a elas. Estes equipamentos são conectados em série com a linha.

Considerar agora que capacitores sejam conectados à linha conforme mostra a figura a seguir.



¹Em geral, indutores *shunt* entram em operação em situações de *carga leve*, enquanto capacitores *shunt* são apropriados para situações de *carga pesada*.

Cada um deles tem uma capacidade de compensação de 15%, ou seja:

$$Z_c = -j X_c = -j 0,15 \cdot \Im\{Z\}$$

em que Z é a impedância série do modelo π da linha, calculada no item (b). O objetivo dos itens a seguir é mostrar que a linha compensada possui uma maior capacidade de transmissão.

(e.1) Determinar a impedância de cada capacitor.

(e.2) Verificar que, considerando o capacitor série como um elemento de 4 terminais, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} V_b \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

(e.3) Calcular os parâmetros $A'B'C'D'$ da linha compensada, que são dados por:

$$\begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(e.4) Pode-se mostrar que a máxima potência que pode ser transmitida por uma linha de transmissão é dada por:

$$P^{\max} = \frac{|V_R| |V_S|}{|B|} - \frac{|A| |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha)$$

em que $A = |A| \angle \alpha$ e $B = |B| \angle \beta$. Considerando um perfil plano de tensão de 765 kV, calcular o ganho em capacidade de transmissão obtido com a compensação série.

(e.5) Calcular a potência máxima de transmissão usando o modelo de linha curta, sem compensação, e comparar com o valor obtido em (e.4).