

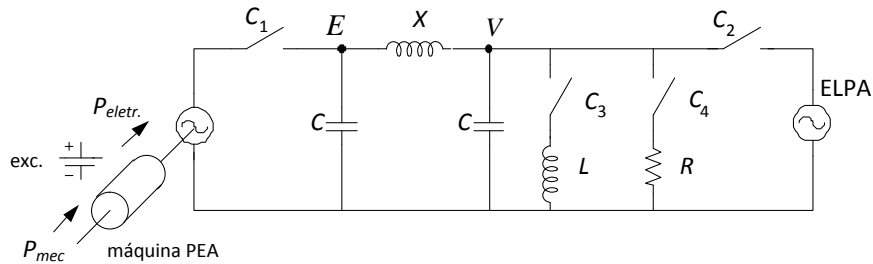
MINI SISTEMAS
PEA 2406

Luiz Cera Zanetta Jr.

(2º semestre - 2015)

EXEMPLO 1

Em um simulador, o gerador tem tensão nominal de linha de 220 V, a reatância do modelo de linha tem $X_m = 10\Omega$ e capacitância do modelo de linha $C_m = 12\mu F$. O sistema real é composto por uma linha de 220 kV com 200 km de comprimento, apresentando uma reatância $x = 0,4\Omega/km$ e uma capacitância $c = 15nF/km$. O sistema real alimenta uma carga resistiva com potência trifásica de 300 MW.



- Descreva o comportamento das tensões no início e final de linha no simulador, quando ocorre uma rejeição de carga (inicialmente C_1 e C_4 fechadas e C_2 e C_3 abertas), assumindo V_g constante. Considere o sistema real operando com tensão fase-terra na carga de 120,7kV (0,95 pu).
- Faça um diagrama fasorial representativo da situação anterior e posterior à abertura de C_4 , com os valores obtidos no simulador.

Resolução:

a) Primeiro, temos que calcular os fatores de escala para darmos início à solução do problema. Convenção: índice m refere-se ao modelo da linha, enquanto que ausência de índice relaciona-se ao valor real.

$$X = x \times l = 0,4 \times 200 = 80\Omega \text{ (Reatância total da linha)}$$

$$C = c \times l = 15 \times 10^{-9} \times 200 = 3\mu F \text{ (Capacitância total da linha)}$$

Obtemos

$$X_m = 10\Omega$$

$$C_m = 3 \times 8 / 2 = 12\mu F$$

$$\lambda_\Omega = \frac{X}{X_m} = \frac{80\Omega}{10\Omega} = 8\Omega / \Omega$$

$$\lambda_v = \frac{V}{V_m} = \frac{220kV}{220V} = 1kV / V$$

$$\text{e, portanto, } \lambda_I = \frac{\lambda_v}{\lambda_\Omega} = \frac{1kV / V}{8\Omega / \Omega} = 0,125kA / A.$$

Agora podemos calcular as correntes que circulam nos ramos capacitivo e resistivo.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(220kV)^2}{300MW} = 161,333\Omega \text{ (usamos a tensão de linha e a potência trifásica)}$$

$$R_m = \frac{R}{\lambda_\Omega} = \frac{161,33\Omega}{8} = 20,167\Omega$$

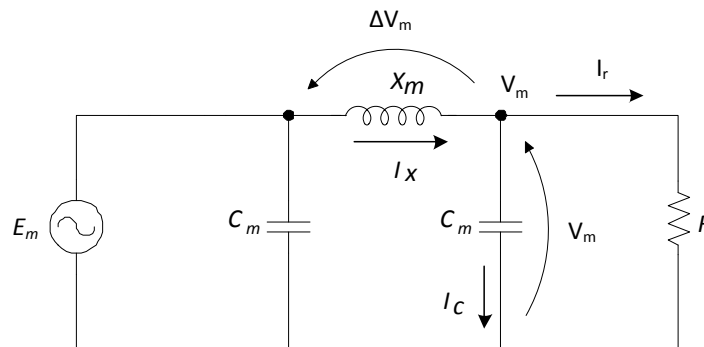
$$V_m = \frac{V}{\lambda_v} = \frac{120,7kV}{1k} = 120,7V \text{ (usamos a tensão fase-terra)}$$

Corrente no ramo capacitivo:

$$I_c = Y_c \times V_m = j \times \omega \times C_m \times V_m = j0,546A, \text{ onde } Y_c = \frac{1}{X_c}.$$

$$\text{Corrente no ramo resistivo: } I_r = \frac{V_m}{R_m} = \frac{120,7}{20,167} = 5,985A.$$

A tensão no início da linha (tensão no gerador, E_m) é dada pela soma da queda de tensão na linha e da tensão no final da linha, isto é:



$$E_m = \Delta V_m + V_m$$

$$E_m = [(I_r + I_c) \times jX_m] + V_m$$

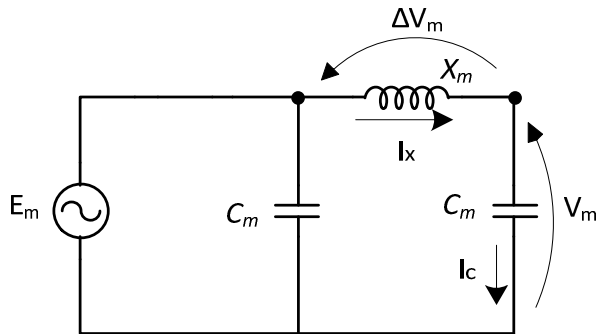
$$E_m = [(5,985 + j0,546) \times j10] + 120,7$$

$$E_m = (115,24 + j59,85) [V]$$

Que, na forma polar, é igual a:

$$E_m = 129,855 \angle 27,45^\circ$$

Análise para rejeição de carga (abrindo a chave C4): supondo que a tensão no gerador é constante e não se altera mesmo quando ocorre a rejeição, podemos obter a nova tensão no final da linha por:



$$V_m = \frac{X_c}{X_c - X_m} \times E_m$$

$$V_m = \frac{221,043}{221,043 - 10} \times 129,855 \angle 27,45^\circ$$

$$V_m = 136 \angle 27,45^\circ [V]$$

Podemos verificar que a tensão no final da linha passa de 0,95 p.u. para:

$$V_m^{p.u.} = \frac{136}{127} p.u. = 1,07 p.u., \text{ o que significa um aumento de } 0,12 p.u \text{ na tensão de saída.}$$

Voltando ao sistema real, teríamos a tensão indo de 120,7 kV para 136 kV, resultando em um aumento de 15,3 kV, ou de 12,68 %.

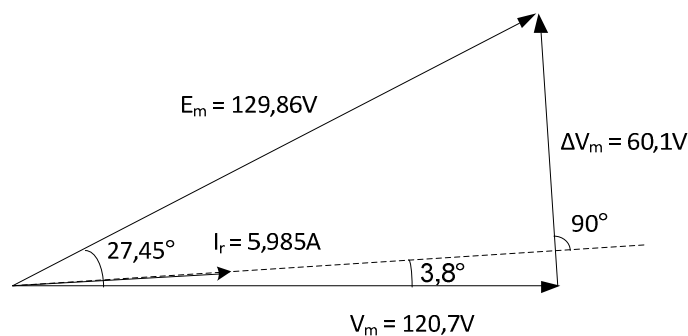
Agora vamos representar os diagramas fasoriais para cada caso utilizando os resultados obtidos:

Antes da abertura ou rejeição de carga:

$$V_m = 120,7 [V] \text{ (adotado como referência)}$$

$$E_m = 129,855 \angle 27,45^\circ [V]$$

$$\Delta V_m = [(I_r + I_c) \times jX_m] = -5,46 + j59,85 = 60,1 \angle 95,21^\circ [V]$$



Após a rejeição de carga:

$$V_m = 136 \angle 27,45^\circ [V]$$

$$E_m = 129,855 \angle 27,45^\circ [V]$$

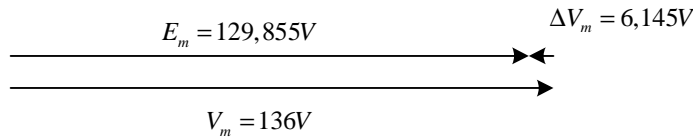
$$\Delta V_m = E_m - V_m = 6,145 \angle -152,44^\circ [V]$$

Adotando-se um referencial mais conveniente, com fase zero para a tensão:

$$V_m = 136 \angle 0^\circ [V]$$

$$E_m = 129,855 \angle 0^\circ [V]$$

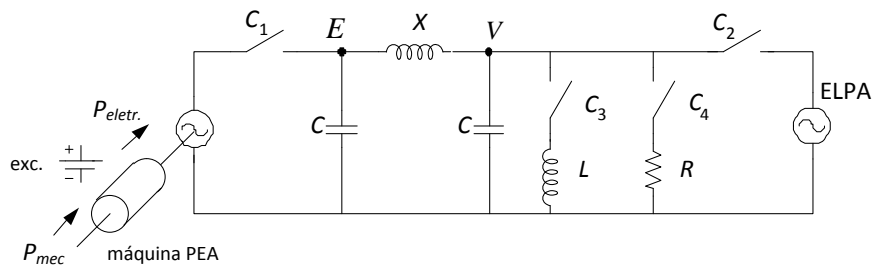
$$\Delta V_m = E_m - V_m = 6,145 \angle -180^\circ [V]$$



Isso ocorre porque a corrente que passa pelo indutor está adiantada em 90° em relação à tensão do capacitor, e a tensão no indutor está adiantada em 90° em relação à corrente no capacitor, gerando 180° de defasagem entre as tensões no indutor e no capacitor.

EXEMPLO 2

Em um simulador, o gerador tem tensão nominal de linha de 220 V, a reatância do modelo de linha tem $X_m = 10\Omega$ e capacitância do modelo de linha $C_m = 12\mu F$. O sistema real é composto por uma linha de 220 kV com 200 km de comprimento, apresentando uma reatância específica $x = 0,4\Omega/km$ e uma capacitância específica $c = 15nF/km$. O sistema real alimenta uma carga com potência trifásica de 300 MW e fator de potência $f.p. = 0,85$ atrasado.



- Descreva o comportamento das tensões no início e final de linha no simulador, quando ocorre uma rejeição de carga (inicialmente C_1 , C_2 e C_3 fechadas e C_4 aberta), assumindo V_g constante. Considere o sistema real operando com tensão fase-terra na carga de 120,7kV (0,95 pu).
- Faça um diagrama fasorial representativo da situação anterior e posterior à abertura de C_3 e C_4 , com os valores obtidos no simulador.

Resolução:

a) Primeiro, temos que calcular os fatores de escala para darmos início à solução do problema. Convenção: índice m refere-se ao modelo da linha, enquanto que ausência de índice relaciona-se ao valor real.

$$X = x \times l = 0,4 \times 200 = 80\Omega \text{ (Reatância total da linha)}$$

$$C = c \times l = 15 \times 10^{-9} \times 200 = 3\mu F \text{ (Capacitância total da linha)}$$

$$\lambda_{\Omega} = \frac{X}{X_m} = \frac{80\Omega}{10\Omega} = 8\Omega / \Omega$$

$$\lambda_v = \frac{V}{V_m} = \frac{220kV}{220V} = 1kV / V$$

$$\text{e, portanto, } \lambda_I = \frac{\lambda_v}{\lambda_{\Omega}} = \frac{1kV / V}{8\Omega / \Omega} = 0,125kA / A.$$

Agora podemos calcular as correntes que circulam nos ramos capacitivo e resistivo.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(220kV)^2}{300MW} = 161,333\Omega \text{ (usamos a tensão entre fases e a potência trifásica)}$$

$$R_m = \frac{R}{\lambda_{\Omega}} = \frac{161,33\Omega}{8} = 20,167\Omega$$

$$V_m = \frac{V}{\lambda_v} = \frac{120,7kV}{1k} = 120,7V \text{ (usamos a tensão fase-terra)}$$

Analisando a potência da carga, usamos a relação $S = P + jQ$, de onde vem $Q = P \times \tan \varphi$, com $\varphi = \arccos(f.p.)$ o ângulo de defasagem entre a tensão e corrente no indutor. Essas equações nos levam a:

$$\cos(\varphi) = 0,85 \Rightarrow \tan(\varphi) = 0,6197$$

$$Q = 300MW \times 0,6197 = 185,923MW$$

Utilizando o modelo R/L paralelo, obtemos a parcela reativa:

$$X_L = \frac{V^2}{Q} = \frac{(220kV)^2}{185,923MW} = 260,322\Omega$$

$$X_{L,m} = \frac{X_L}{\lambda_{\Omega}} = \frac{260,322\Omega}{8} = 32,540\Omega$$

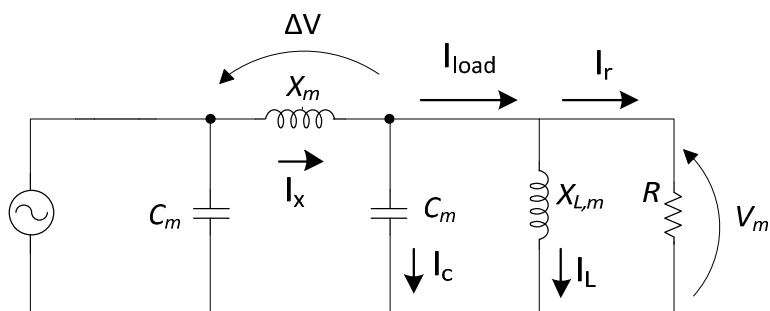
Corrente no ramo capacitivo:

$$I_c = Y_c \times V_m = j \times \omega \times C_m \times V_m = j0,546A, \text{ onde } Y_c = \frac{1}{X_c}.$$

Corrente de carga:

$$I_{load,m} = I_{r,m} + I_{l,m} = \frac{V_m}{R_m} - \frac{jV_m}{X_m} = 5,985 - j3,709A.$$

A tensão no início da linha (tensão no gerador, E_m) é dada pela soma da queda de tensão na linha e da tensão no final da linha, isto é:



$$E_m = \Delta V_m + V_m$$

$$E_m = [(I_{load} + I_c) \times jX_m] + V_m$$

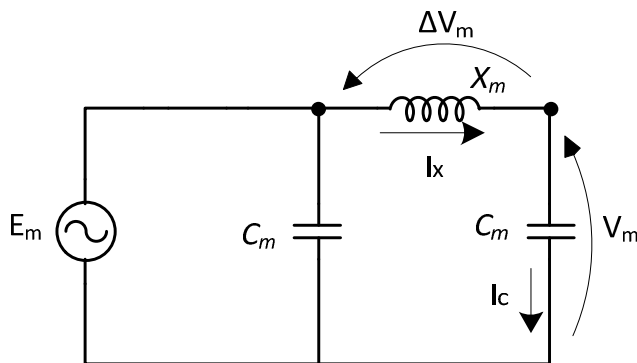
$$E_m = [(5,985 - j3,709 + j0,546) \times j10] + 120,7$$

$$E_m = (152,33 + j59,85) [V]$$

Que, na forma polar, é igual a:

$$E_m = 163,667 \angle 21,45^\circ$$

Análise para rejeição de carga: supondo que no primeiro instante a tensão no gerador permaneça constante, não se alterando, podemos obter a nova tensão no final da linha por:



$$V_m = \frac{X_c}{X_c - X_m} \times E_m$$

$$V_m = \frac{221,043}{221,043 - 10} \times 163,667 \angle 21,45^\circ$$

$$V_m = 171,43 \angle 21,45^\circ [V]$$

Podemos verificar que a tensão no final da linha passa de 0,95 p.u. para:

$$V_m^{p.u.} = \frac{171,43}{120,7} \cdot 0,95 p.u. = \frac{171,43}{127} p.u. = 1,35 p.u.,$$

o que significa um aumento de 0,4 p.u na tensão de saída. Voltando ao sistema real, teríamos a tensão indo de 120,7 kV para 171,43 kV, resultando em um aumento de 50,7 kV, ou de 42,03 %.

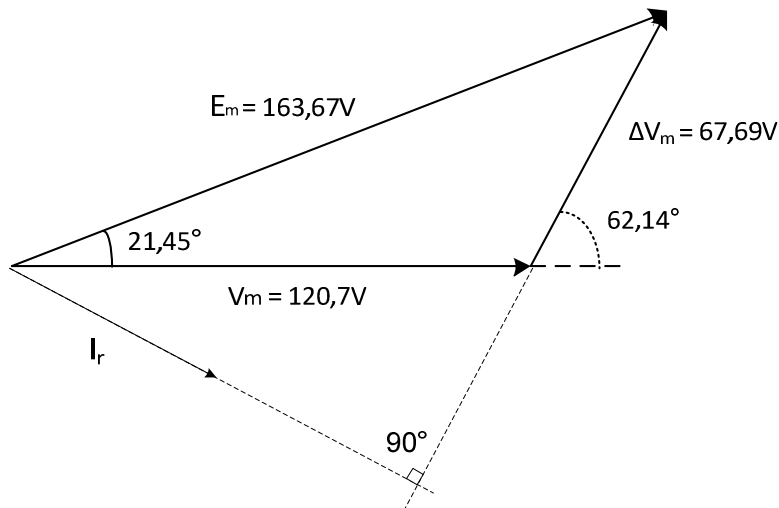
Agora vamos representar os diagramas fasoriais para cada caso utilizando os resultados obtidos:

Antes da abertura ou rejeição de carga:

$$V_m = 120,7 [V] \text{ (adotado como referência)}$$

$$E_m = 163,667 \angle 21,45^\circ [V]$$

$$\Delta V_m = [(I_{load} + I_c) \times jX_m] = 31,63 + j59,85 = 67,694 \angle 62,14^\circ [V]$$



Após a rejeição de carga:

$$V_m = 171,43 \angle 21,45^\circ [V] \text{ (adotado como referência)}$$

$$E_m = 163,667 \angle 21,45^\circ [V]$$

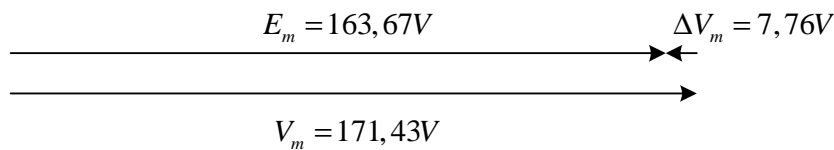
$$\Delta V_m = E_m - V_m = 7,76 \angle -158,55^\circ [V]$$

Adotando-se V_m como referencial:

$$V_m = 171,43 \angle 0^\circ [V] \text{ (adotado como referência)}$$

$$E_m = 163,667 \angle 0^\circ [V]$$

$$\Delta V_m = E_m - V_m = 7,76 \angle -180^\circ [V]$$



Isso ocorre porque a corrente que passa pelo indutor está adiantada em 90° em relação à tensão do capacitor, e a tensão no indutor está adiantada em 90° em relação à corrente no capacitor, gerando 180° de defasagem entre as tensões no indutor e no capacitor.

Com a colaboração dos alunos: Marcos Bassini, Danilo Bortholin Lopes e Gabriel Lopes de Souza