# Impedância no Ponto de Curto

- A maioria dos curtos se dá através de arcos entre fases.
- Esses arcos podem apresentar elevada resistência.
- Ou, o contato de uma  fase com a terra dá-se através de árvores ou outros objetos que possuem uma certa resistência.
- A inclusão da impedância de falta nas fórmulas é tarefa fácil.

# Impedância no Ponto de Curto

- Resistência do arco elétrico
- Resistência de contato por oxidação
- Resistência da camada superficial do solo
- Resistência de terra do local
- outros

# Resistência do Arco Elétrico

- Fórmula de Warrington

$$R_{arcoelétrico} = \frac{28707 \cdot L}{I^{1,4}} \quad ohm$$

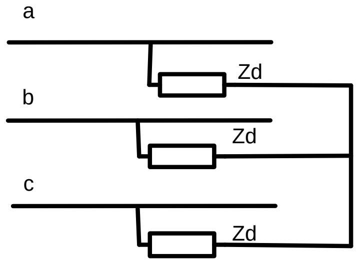
Onde L : comprimento do arco [m]

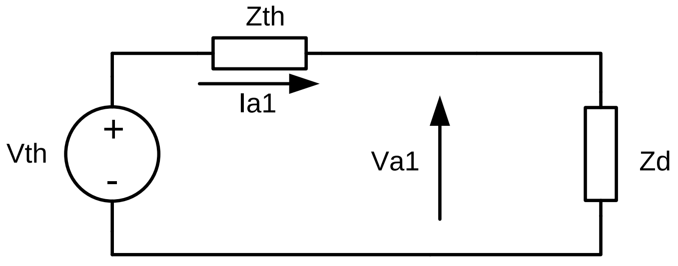
I :ICC<= 1000 A

- Zd: Brasil: Zd=100/3 ohms

  USA: Zd=40/3 ohms

# Incorporação das Impedâncias de Curto- Trifásico




$$\dot{I}a^{1} = \frac{\dot{V}th}{\dot{Z}th + Zd}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}a \\ \dot{I}b \\ \dot{I}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}a^{1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

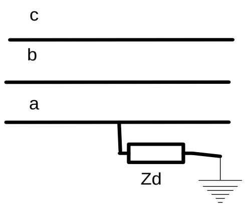
$$\dot{V}a^{1} = \dot{V}th \cdot \frac{\dot{Z}d}{\dot{Z}th^{1} + \dot{Z}d}$$

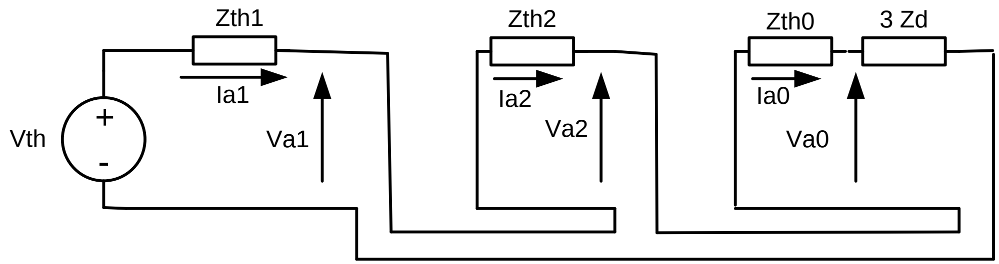
$$\dot{V}a_{k}^{2} = 0$$

$$\dot{V}a^{0} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}a \\ \dot{V}b \\ \dot{V}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{V}a^{1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Fase-terra




$$\dot{I}a^{1} = \dot{I}a^{2} = \dot{I}a^{0} = \frac{\dot{V}th}{\dot{Z}th^{1} + \dot{Z}th^{2} + \dot{Z}th^{0} + 3Zd}$$

$$\dot{I}a = 3 \cdot \frac{\dot{V}th}{\dot{Z}th^{1} + \dot{Z}th^{2} + \dot{Z}th^{0} + 3Zd}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}a \\ \dot{I}b \\ \dot{I}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}a^{0'} \\ \dot{I}a^{1} \\ \dot{I}a^{2} \end{bmatrix}$$

$$\dot{I}b = 0$$

$$\dot{I}c = 0$$

$$\dot{V}a^{1} = Ia^{1} \cdot (\dot{Z}th^{2} + \dot{Z}th^{0} + 3Zd)$$

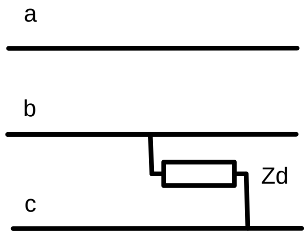
$$\dot{V}a^{2} = -Ia^{1} \cdot \dot{Z}th^{2}$$

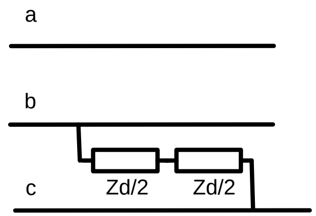
$$\dot{V}a^{0} = -Ia^{1} \cdot \dot{Z}th^{0}$$

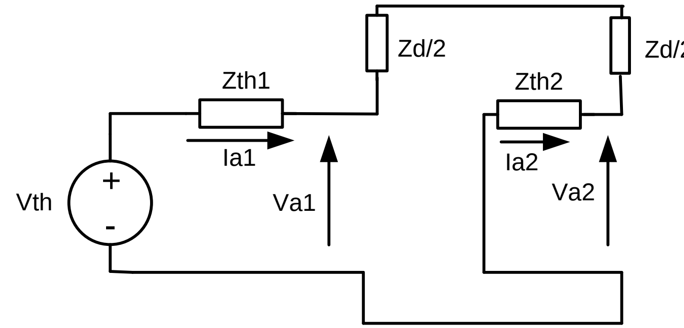
$$\begin{bmatrix} \dot{V}a \\ \dot{V}b \\ \dot{V}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^{2} & a \\ 1 & a & a^{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}a^{0} \\ \dot{V}a^{1} \\ \dot{V}a^{2} \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}a = Vth \cdot \frac{3 \cdot Zd}{\dot{Z}th^{1} + \dot{Z}th^{2} + \dot{Z}th^{0} + 3Zd}$$

# Fase-Fase




$$\dot{I}a^1 = -\dot{I}a^2 = \frac{\dot{V}th}{\dot{Z}th^1 + \dot{Z}th^2 + Zd}$$

$$\dot{I}a^1 = -\dot{I}a^2$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}a \\ \dot{I}b \\ \dot{I}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}a^1 \\ -\dot{I}a^1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{I}a = 0$$

$$\dot{V}a^1 == \dot{I}a^1 \cdot (\dot{Z}th^2 + Zd)$$

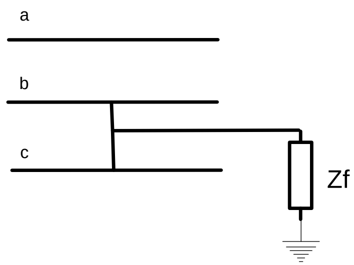
$$\dot{V}a^2 = \dot{I}a^1 \cdot \dot{Z}^2$$

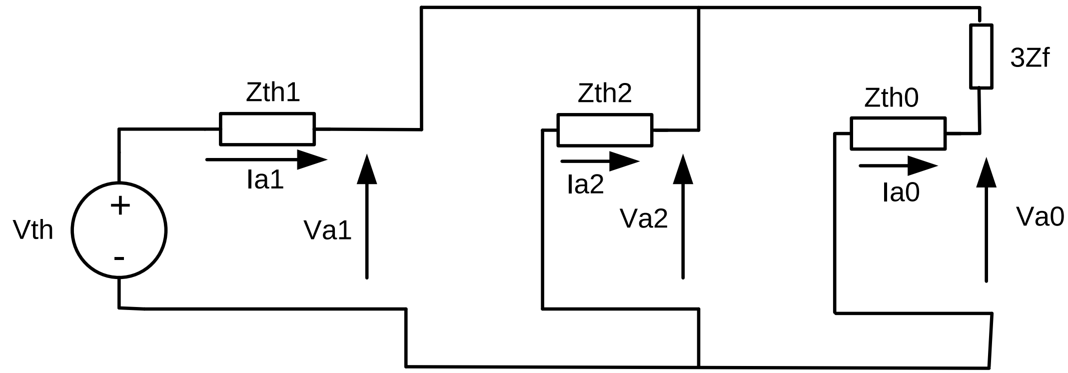
$$\dot{V}a^o = 0$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}a \\ \dot{V}b \\ \dot{V}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{V}a^1 \\ \dot{V}a^2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}a = \frac{\dot{V}th \cdot (2\dot{Z}th^2 + Zd)}{\dot{Z}th^1 + \dot{Z}th^2 + Zd}$$

# Fase-Fase-terra




$$\dot{I}a^1 = \frac{\dot{V}th}{\dot{Z}th^1 + \frac{\dot{Z}th^2 \cdot (\dot{Z}th^0 + 3Zf)}{\dot{Z}th^2 + \dot{Z}th^0 + 3Zf}}$$

$$\dot{I}a^2 = -\dot{I}a^1 \cdot \frac{(\dot{Z}^0_{kk} + 3Zf)}{\dot{Z}^2_{kk} + \dot{Z}^0_{kk} + 3Zf}$$

$$\dot{I}a^0_k = -Ia^1_k \cdot \frac{\dot{Z}th^2}{\dot{Z}th^2 + \dot{Z}th^0 + 3Zf}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}a \\ \dot{I}b \\ \dot{I}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}a^0_k \\ \dot{I}a^1_k \\ \dot{I}a^2_k \end{bmatrix}$$

$$\dot{I}a = 0$$

$$\dot{V}a^1 = \dot{I}a^1 \cdot \frac{\dot{Z}th^2 \cdot (\dot{Z}th^0 + 3Zf)}{\dot{Z}th^2 + \dot{Z}th^0 + 3Zf}$$

$$\dot{V}a^2 = \dot{I}a^1 \cdot \frac{\dot{Z}th^2 \cdot (\dot{Z}th^0 + 3Zf)}{\dot{Z}th^2 + \dot{Z}th^0 + 3Zf}$$

$$\dot{V}a^0 = \dot{I}a^1 \cdot \frac{\dot{Z}th^0 \cdot Zth^2}{\dot{Z}th^2 + \dot{Z}th^0 + 3Zf}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}a \\ \dot{V}b \\ \dot{V}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}a^0 \\ \dot{V}a^1 \\ \dot{V}a^2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}a = \dot{V}a^1 + \dot{V}a^2 + \dot{V}a^0 = \frac{3\dot{Z}th^2 \cdot (\dot{Z}th^0 + 2Zf)}{\dot{Z}th^1 \cdot \dot{Z}th^2 + (\dot{Z}th^1 + \dot{Z}th^2)(\dot{Z}th^0 + 3Zf)}$$

# Considerações Finais

- Se $Z_d=0$

$3\phi$ (maior corrente se $Z_1=Z_2<Z_0$)

$\phi T$(maior corrente se $Z_1=Z_2>Z_0$)

Se $Z_1=Z_2=Z_0$ ($I_{cc3\phi} = I_{cc\phi T}$)

- Se $Z_d \neq 0$

Curtos diminuídos($3\phi$ , $\phi\phi$, $\phi T$)

Curto aumentado para $I_{cc\phi\phi T}$ ( $Z_d$ aparece no numerador)

$$I_{cc\phi\phi T} = 1{,}1\ I_{cc3\phi}$$

- Zd: Brasil: $Z_d=100/3$ ohms

  USA: $Z_d=40/3$ ohms

# Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Tipos:

- Sistema de Distribuição Radial Simples

  ( baixa sensibilidade à corrente)

- Sistema Radial Multi-aterrado

  ( a corrente de cc tem vários caminhos de retorno, aumenta-se sensibilidade da proteção)

# Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

- Utilizam-se as resistências
- Considerações:

(i)Trifásico

$$\dot{I}a^1 = \frac{\dot{V}th}{\dot{Z}th}$$

(ii) Fase-terra: o sistema de distribuição está longe da geração: Z1=Z2

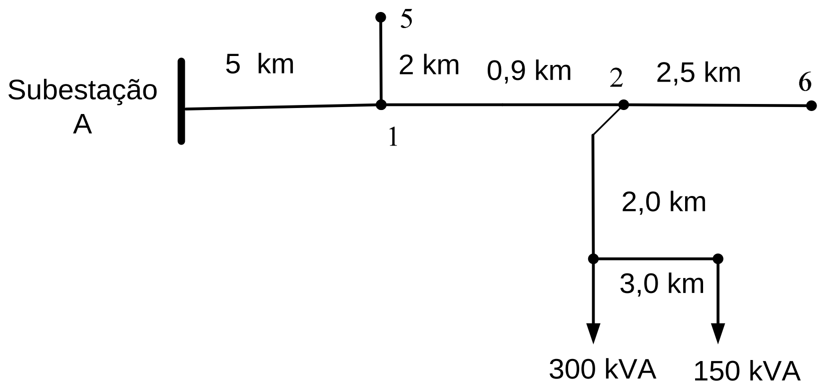
$$\dot{I}a^1 = \frac{\dot{V}th}{2\dot{Z}th^1 + \dot{Z}th^0} \qquad \dot{I}a^1 = \frac{\dot{V}th}{2\dot{Z}th^1 + \dot{Z}th^0 + 3Zd}$$

(iii) Fase-fase: Z1=Z2

$$\dot{I}a^1 = -\dot{I}a^2 = \frac{\dot{V}th}{2\dot{Z}th^1}$$

# Exemplo:

- Impedância equivalente:
  $Z1=Z2=0,3+j0,8$ pu
  $Z0=0,8+j1,2$ pu




- Base: Vbase=13,8 kV
  Sbase=100 MVA
  Zbase=1,90 ohms
  Ibase=4183,69 A

- Curto no ponto 1 (a 5 km da subestação)
  Z1cabo=Z2cabo=0,297+j0,427 ohms/quilômetro
  Z1cabo=(0,297+j0,427)*5/Zbase= 0,77975+j1,1320 pu
  Z0cabo=0,685+j1,323 ohms/quilômetro
  Z0cabo=(0,685+j1,323)*5/Zbase= 1,79845+j3,4735 pu

- Impedância acumulada no ponto 1
  Z1acum=0,3+j0,8 +0,77975+j1,1320 = 1,07975+j1,9132 pu
  Z0acum=0,8+j1,2+1,79845+j3,4735= 2,59845+j4,6735 pu

(i)Trifásico

$$\dot{I}a = \frac{\dot{V}th}{\left|\dot{Z}1acum\right|} Ibase = 1904{,}36A$$

(ii) Fase-terra: o sistema de distribuição está longe da geração: Z1=Z2

$$\dot{I}a = \frac{3 \cdot \dot{V}th}{\left|2\dot{Z}1acum + \dot{Z}0acum\right|} Ibase = 1288{,}47A$$

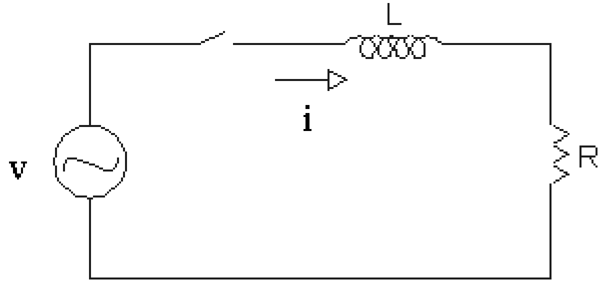
$$\dot{I}a_{mínimo} = \frac{3 \cdot \dot{V}th}{\left|2\dot{Z}1acum + \dot{Z}0acum + 3 \cdot \frac{40}{3Zbase}\right|} Ibase = 462{,}72A$$

(iii) Fase-fase: Z1=Z2 (0.866 Icc3$\phi$ = Icc$\phi\phi$)

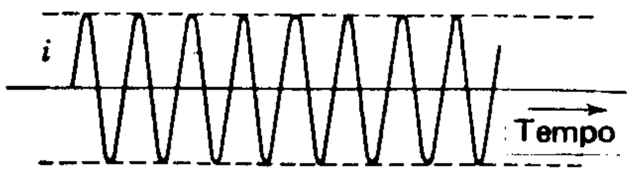
$$\dot{I}afasefase = \frac{\sqrt{3}}{2} Itrifásico = 1649{,}22A$$

# Fator de Assimetria

- Transitórios AC em Circuitos RL série




$$i = \frac{V_m}{Z}\left[\operatorname{sen}.(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-\frac{R}{L}t}\operatorname{sen}(\alpha - \theta)\right]$$



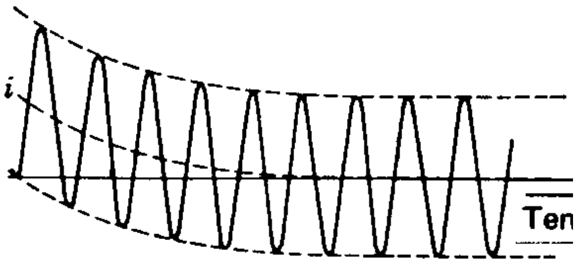




Figura 1

Figura 2

Fig. 1 – Corrente em função do tempo num circuito RL para $\alpha - \Theta = 0$, onde $\Theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$. A tensão é igual a $|V_m| \operatorname{sen}(\omega t + \alpha)$ aplicada no instante t = 0.

Fig. 2 – Corrente em função do tempo num circuito RL para $\alpha - \Theta = -90^o$, onde $\Theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$. A tensão é igual a $|V_m| \operatorname{sen}(\omega t + \alpha)$ aplicada no instante t=0.

# Representação do Gerador

- Nos instantes iniciais haverá a presença de uma componente unidirecional de corrente , que pode dar origem a picos de corrente extremamente elevados.
- O valor da componente unidirecional será levada em conta no dimensionamento dos disjuntores, através de um fator multiplicativo conveniente, que será função da relação X/R no ponto de defeito.

# Fator de Assimetria

F.A= Iassimétrica / I simétrica

O F.A depende da relação X/R, ou seja, do circuito na qual a corrente passa.

# Cálculo da corrente assimétrica

- Z1acum= 1,07975+j1,9132 pu
- X1/R1=1,9132/1,07975=1,7718
- F.A= 1,07

$$\dot{I}assimetrica = 1904{,}36 \cdot 1.07 = 2037.66A$$