

## Medidas Corretivas

Quando os estudos de curto-circuito, para uma dada configuração de sistema mostram que os níveis de defeito, quer sejam valores de sobretensão ou corrente, se situam acima dos valores máximos permissíveis, é necessário realizar medidas corretivas para reconduzir os níveis de defeitos a valores compatíveis com as características dos equipamentos instalados.

As medidas corretivas são:

- (i) para redução da potência de curto circuito trifásico ( $P_{cc3\phi} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{cc3\phi}$ )
- (ii) para redução da potência de curto circuitos fase-terra ( $P_{cc\phi T} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{cc\phi T}$ )
- (iii) para redução de sobretensão nas fases sãs.

### Redução da potência de curto circuito trifásico

Não é tarefa simples, pois qualquer aumento de impedância na sequência positiva, irá refletir como um aumento de impedância também para a corrente de carga, assim opta-se por medidas tais como:

- operação com determinadas linhas abertas (deteriora a confiabilidade, ação restrita a sistemas de subtransmissão e distribuição).
- operação com barramento seccionado, quando for possível (dificulta a distribuição das cargas).

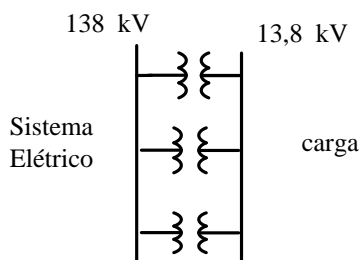
**Exemplo:** Uma subestação de transmissão em 138 kV alimenta um barramento de 13,8 kV através de três transformadores de 50 MVA.

A potência de curto-circuito trifásico no barramento de alta-tensão é de 2500 MVA.

Estudar medidas corretivas de tal forma que se mantenha o nível de defeito trifásico no barramento de distribuição não maior que 700 MVA.

A reatância dos transformadores é de 12 % .

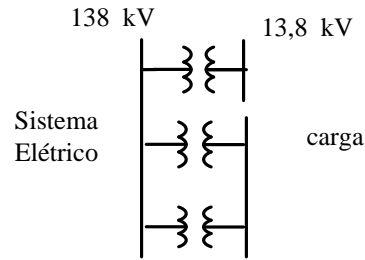
Adotar potência base 100 MVA.



$$P_{cc_{13,8}} = \frac{2500}{100} = 25 pu \quad \Rightarrow \quad P_{cc_{13,8}} = \frac{1}{Z_{eq}} \quad \Rightarrow \quad Z_{eq} = 0,04 pu$$

$$P_{cc_{13,8}} = \frac{1}{Z_{eq} + X_t/3} \cdot 100 = \frac{1}{0,04 + \frac{0,12 \cdot 100}{50} / 3} \cdot 100 = 833 MVA$$

Medidas Corretivas: **Barramento Seccionado**

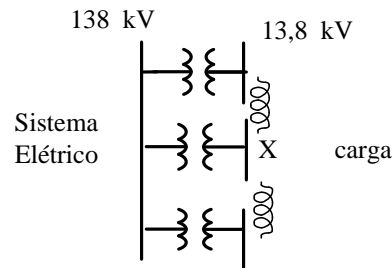


A solicitação mais severa será agora no barramento com os dois transformadores:

$$Pcc_{13,8} = \frac{1}{Z_{eq} + X_t / 2} \cdot 100 = \frac{1}{0,04 + \frac{0,12 \cdot 100}{50} / 2} \cdot 100 = 625 MVA$$

$$Pcc_{13,8} = \frac{1}{Z_{eq} + X_t} \cdot 100 = \frac{1}{0,04 + \frac{0,12 \cdot 100}{50}} \cdot 100 = 357 MVA$$

Medidas Corretivas: **Reator de barramento (caso a)**



Os cálculos serão realizados supondo um curto no barramento central (ponto X) que é o ponto que drenará maior corrente de curto.

O valor de  $X_{reator}$  será calculado com base na Potência de curto admissível.

$$Pcc_{13,8} = \frac{700}{100} = 7 pu = \frac{1}{Z_{eqX}} \Rightarrow Z_{eqX} = 0,143 pu$$

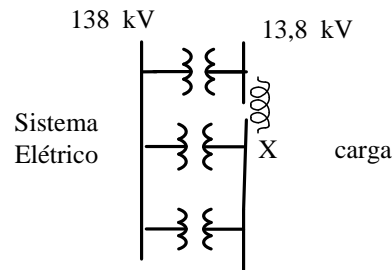
$$Z_{eqX} = (Z_{eq} + X_{eq}) = 0,143 pu$$

$$X_{eq} = 0,103 pu$$

$$X_{eq} = \frac{X_t + X_{reator}}{2} // X_t = 0,103$$

$$\frac{0,24 + X_{reator}}{2} // 0,24 = 0,103 \Rightarrow X_{reator} = 0,1209 pu$$

### Medidas Corretivas: **Reator de barramento (caso b)**



$$P_{cc_{13,8}} = \frac{700}{100} = 7 pu = \frac{1}{Z_{eqX}} \Rightarrow Z_{eqX} = 0,143 pu$$

$$Z_{eqX} = (Z_{eq} + X_{eq}) = 0,143 pu$$

$$X_{eq} = 0,103 pu$$

$$X_{eq} = \frac{X_t}{2} // (X_t + X_{reator}) = 0,103$$

$$\frac{0,24}{2} // (0,24 + X_{reator}) = 0,103 \Rightarrow X_{reator} = 0,4871 pu$$

A reatância é duas vezes superior à impedância de um transformador, o que torna impraticável esta solução, devido à excessiva queda de tensão que resultaria no reator ao ser percorrido pela corrente de carga.

### **Redução da potência de curto circuito fase-terra**

Medidas anteriores podem ser cogitadas, mas existem outras mais eficazes que não afetam a seqüência positiva e portanto não interferem na corrente normal de carga.

Medidas usualmente utilizadas para redução do nível de falta monofásica: **impedância de aterramento e reator no terciário de transformador.**

#### **Impedância de aterramento**

A utilização de impedância de aterramento de neutro diminui os valores de sobretensão oriundos de curto fase-terra.

No aterramento de geradores a resistência empregada é elevada, de modo a se conseguir uma corrente de defeito monofásico da ordem de 1.5 pu da corrente nominal.

Para os transformadores, o aterramento por resistência é utilizado nas indústrias, cujo objetivo é obter uma substancial redução da corrente de defeito por razões de segurança pessoal. O aterramento sólido é o mais difundido para os transformadores.

## Reator no terciário

A interligação entre subsistemas de tensões diferentes é normalmente feita por transformadores cujos enrolamentos estão ligados em estrela com neutro solidamente aterrado. Para evitar a propagação pelo sistema da corrente de terceiro harmônico correspondente ao espectro do fluxo de magnetização, esses transformadores, em geral, possuem um enrolamento terciário ligado em triângulo, com a única finalidade de fornecer um caminho de baixa impedância para a circulação da corrente de terceiro harmônico.

Além disso, o enrolamento em triângulo, inoperante para as correntes de seqüência positiva e negativa, por estar em vazio, é um caminho de baixa impedância para a corrente de seqüência zero, resultando em uma ligação para a terra, cuja consequência é o aumento do nível de defeito fase-terra quer na barra primária quer na barra secundária.

Se por necessidade ditada pelas características dos equipamentos, impuser-se a redução dos níveis de defeito fase-terra em algum dos barramentos da interligação, uma possível alternativa é a utilização de um reator em série com o enrolamento terciário de forma a reduzir a contribuição deste enrolamento na corrente de seqüência zero de defeito. **Para tanto, o reator de terciário entra em série com o enrolamento terciário no diagrama de seqüência zero.**

No sistema abaixo, quer-se verificar se a potência de curto-circuito fase-terra ( $S_{ft} = S_{base} \times I_{ccft}$ ) no barramento de 34,5 kV não ultrapassa o valor de 1000 MVA. Em caso afirmativo, dimensionar a impedância de um reator de terciário que permita obter-se a redução citada, ou seja, uma potência de curto-circuito fase-terra igual a 1000 MVA.

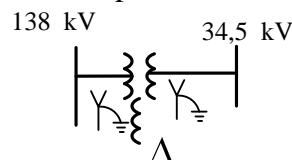
Dados:  $S_{base_{MVA}} = 100$  MVA

- Potência de curto-circuito trifásico em 34,5 kV igual a 950 MVA. ( $S_{cc_{trifásico_{MVA}}} = S_{base_{MVA}} / Z_{th_{pu}}$ ).

- impedância equivalente de seqüência zero igual a  $j 0,15$  pu (base 100 MVA) do sistema 34,5 kV.

- impedância equivalente de seqüência zero igual a  $j 0,60$  pu (base 100 MVA) do sistema 138 kV.

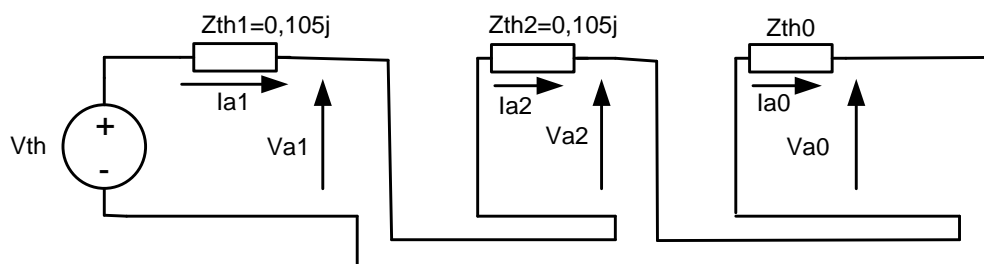
- e transformadores em paralelo com  $x_{ps} = 9\%$ ,  $x_{st} = -7\%$  e  $x_{pt} = 20\%$  (base 50 MVA)



Solução:

A potência de curto trifásico da barra 34,5 kV já fornece a impedância de Thevenin equivalente vista desta barra, levando em conta a presença tanto dos transformadores quanto dos dois subsistemas.

$$Z_{th1} = Z_{th2} = \frac{j}{950/100} j0,105 pu$$



O equivalente em estrela de cada unidade transformadora, já na base 100 MVA é:

$$x_p = \frac{1}{2}(x_{ps} + x_{pt} - x_{st}) \cdot \frac{100}{50} = 22\%$$

$$x_s = \frac{1}{2}(x_{ps} + x_{st} - x_{pt}) \cdot \frac{100}{50} = -4\%$$

$$x_t = \frac{1}{2}(x_{pt} + x_{st} - x_{ps}) \cdot \frac{100}{50} = 18\%$$

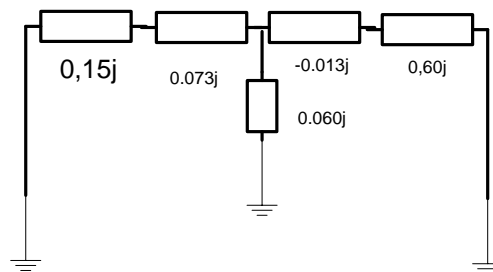
Levando m conta que são três unidades em paralelo:

$$x_{p_{eq}} = 0.073 pu$$

$$x_{s_{eq}} = -0.013 pu$$

$$x_{t_{eq}} = 0.060 pu$$

Seqüência Zero



$$Z_{th0} = \{[(j0.073 + j0.15) // j0.06] - 0.013j\} // (0.60j) = j0.032 pu$$

$$Z_{th0} = j0.032$$

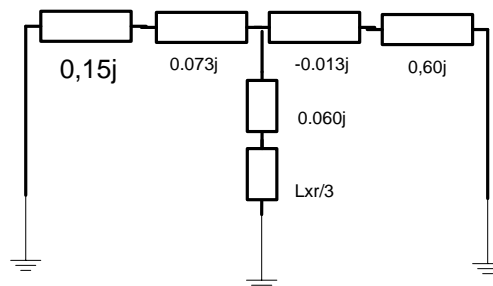
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{(0.21 + 0.032)j} = -4.13 pu$$

$$I_{af} = 3I_{a1} = -j12.39 pu$$

$$P_{cc_{1\phi}} = P_{base} \cdot I_{cc_{1\phi}} = 100 \cdot 12.39 = 1239 MVA$$

Valor de potência é maior que a admissível: 1000 MVA.

O reator terciário entra em série com o enrolamento de mesmo nome:



Impondo uma potência de 1000MVA:

$$P_{cc_{1\phi}} = 1000 = P_{base} \cdot I_{cc_{1\phi}}$$

$$I_{cc_{1\phi}} = 10 \text{ jpu}$$

$$I_{a0} = \frac{10}{3} = 3.33 \text{ jpu}$$

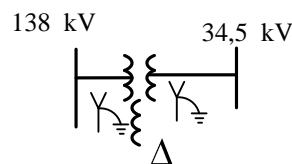
$$I_{a0} = \frac{1}{(0.21 + Z_{th0}')j} = 3.33 \text{ jpu}$$

$$Z_{th0}' = -j0.09 \text{ pu}$$

Para esse valor de  $Z_{th}'$  o valor de  $X_r$  dever ser:  $X_r=0.924 \text{ pu}$ . O valor de reatância é muito elevado, impondo o estudo de outra alternativa como por exemplo, o aterramento dos centro-estrela dos enrolamentos principais.

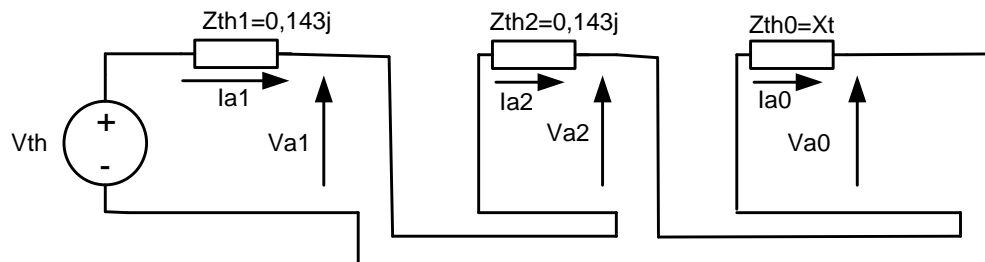
### Redução de Sobretensões Sustentadas em Sistemas Mal-Aterrados

A potência de curto-circuito trifásico no enrolamento terciário é 700 MVA. Dimensionar a impedância de um transformador de aterramento a ser conectado na barra terciária de modo a limitar o fator de sobretensão nesta barra ao valor máximo aceito para sistema aterrados que é de 1,38.



A impedância de seqüência positiva vista pelo terciário vale:

$$X_{th1} = \frac{1}{P_{cc}} = \frac{1}{700/100} = 0.143 \text{ pu}$$



$$FSTb = \left| \frac{\dot{V}b}{V_{th}} \right| = \left| a^2 + \frac{(\dot{Z}_{th}^1 - \dot{Z}_{th}^0)}{\sum_j \dot{Z}_{th}^j} \right| = 1.38$$

$$X_t = 0.721 \text{ pu}$$

$$\text{Rearranjando: } X_t = 0.721 \cdot \frac{13.8^2}{100} = 1.37 \text{ ohms}$$