

Curto-circuito simétrico

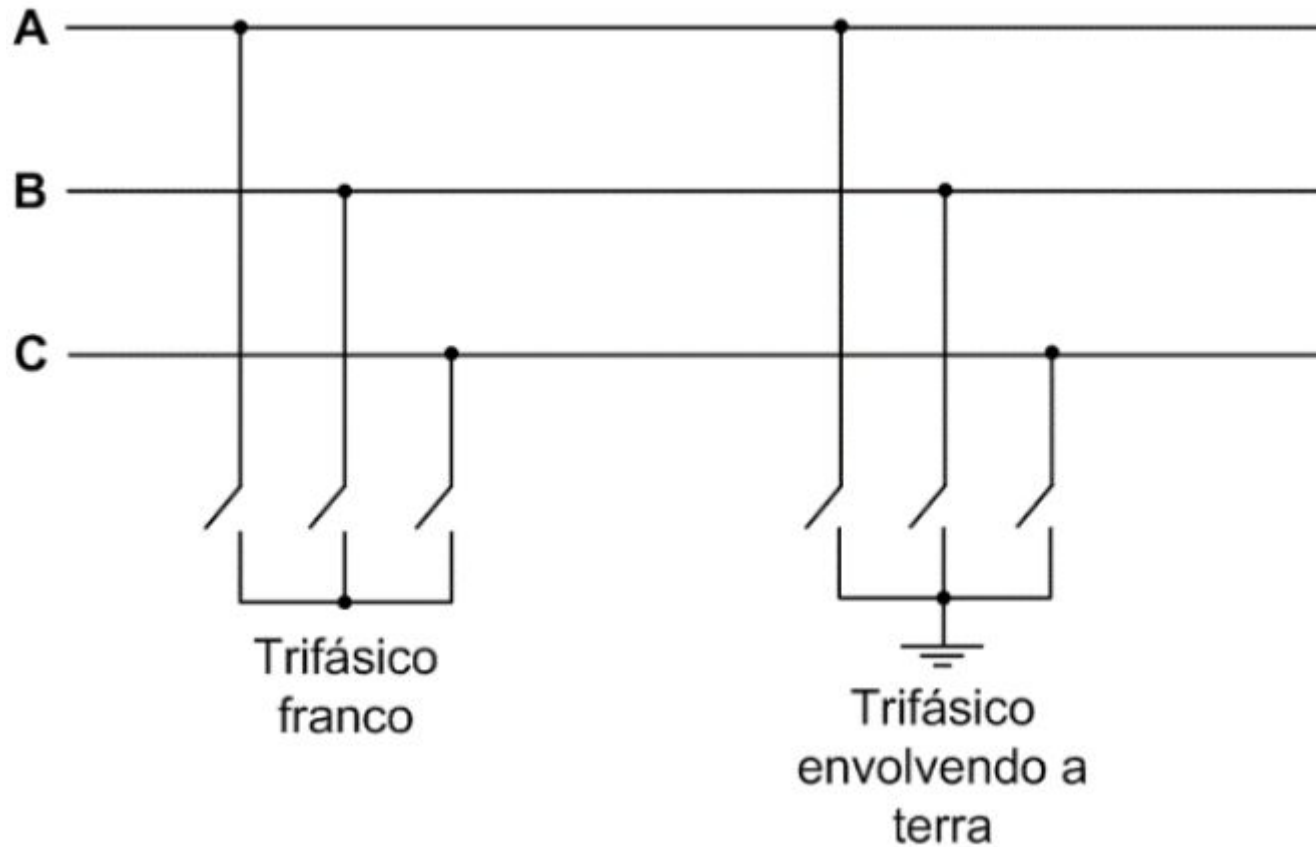
Proteção do Sistema Elétrico de Potência

Prof. Eduardo F. Miranda

2022-11-07

Curto-circuito trifásico (fase-fase-fase)²

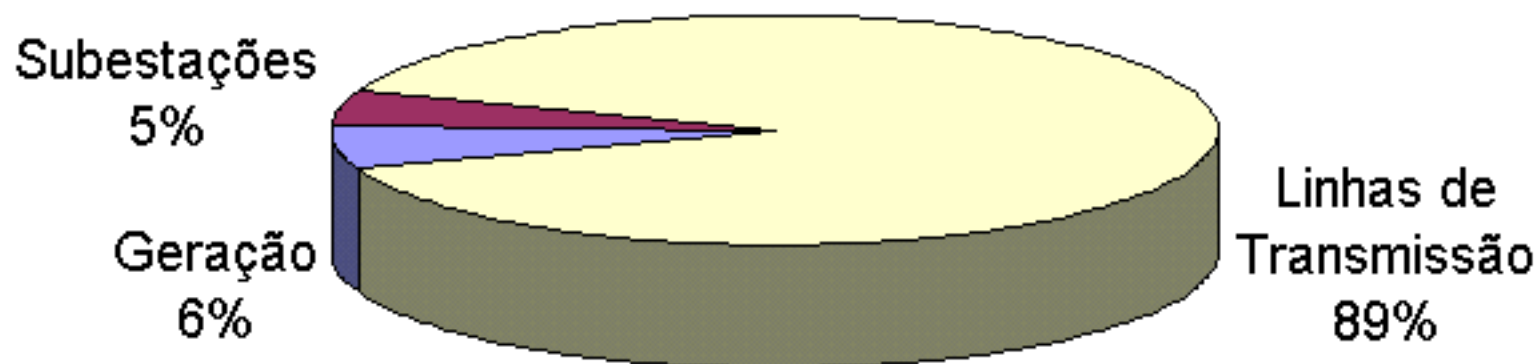
- Sistemas com máquinas síncronas: um dos piores cenários de faltas trifásicas
- Disjuntores são importantes nas especificações dos dispositivos de proteção
- Curto-circuito 3Ø (3ØCC): os 3 condutores de um sistema trifásico estão eletricamente conectados entre si
- O curto-circuito pode ser denominado
 - falta simétrica
 - falta sólida



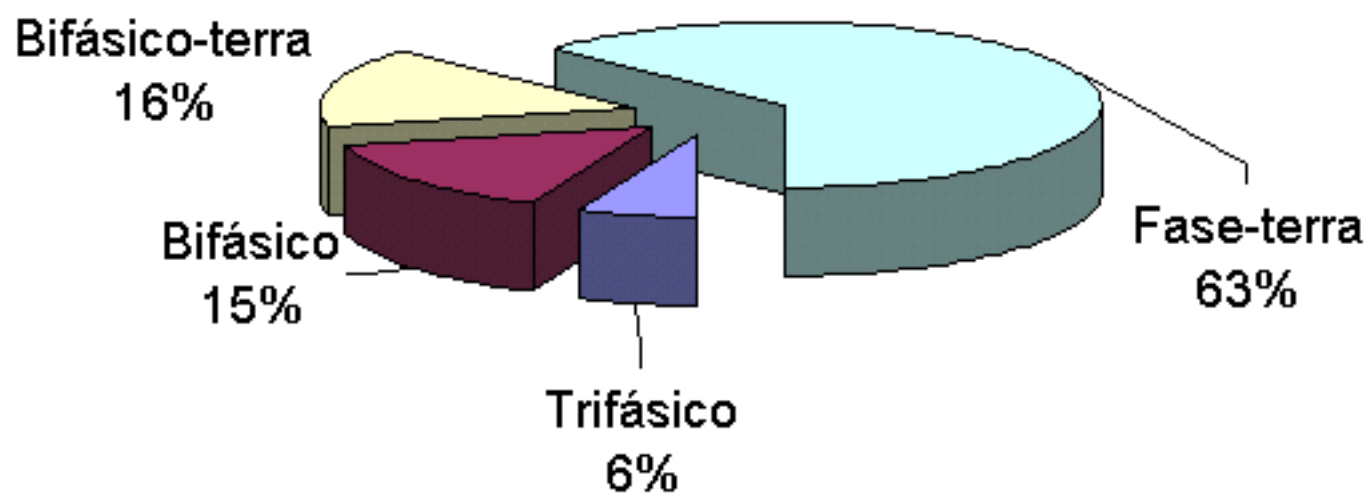
Tipos de
curtos-
circuitos
trifásicos

- Curto-circuito trifásico com ou sem o condutor neutro

Ocorrência de Curto-Circuito

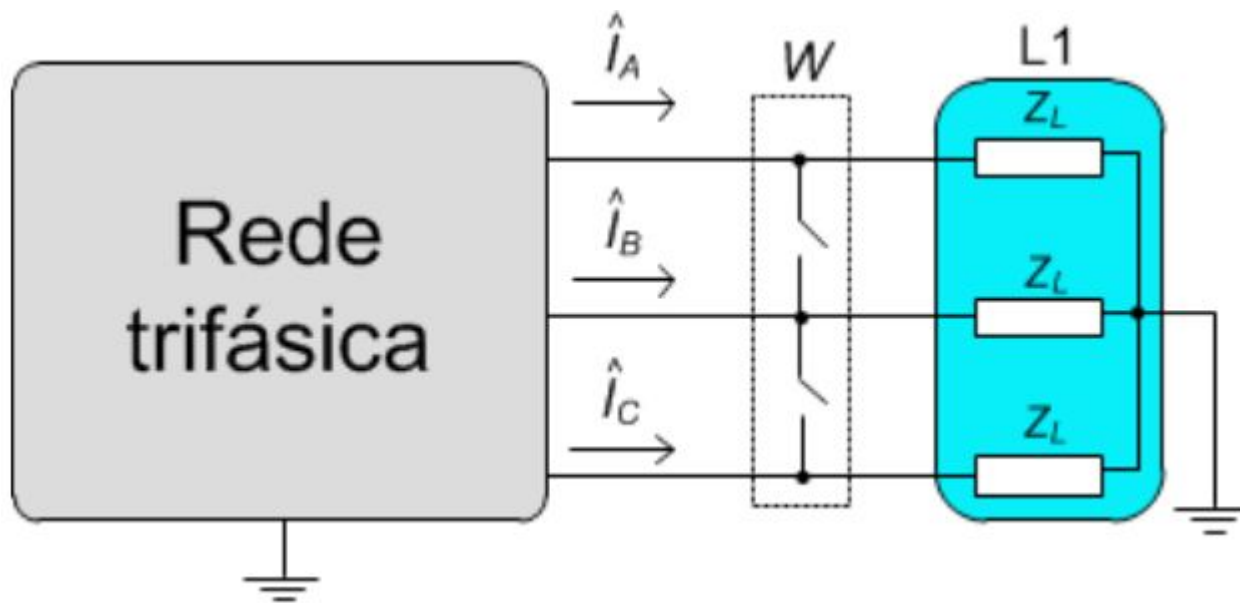


Ocorrência dos Tipos de Curto



- 3ØCC: esse tipo de falta é relativamente **incomum**
 - geralmente tem as menores correntes de curto
 - exceto quando a rede não tem, praticamente, terras
- Ajuste de relés: o cálculo de faltas simétricas é frequentemente empregado
- Um 3ØCC pode ser modelado com base em apenas uma das fases

- Método das componentes simétricas para modelar apenas uma das fases
- Seja uma rede trifásica alimentando uma carga equilibrada L_1 com impedância por fase igual a Z_L



Circuito empregado
para análise
matemática de CC 3Ø

Assumindo uma falta trifásica no ponto W, as
correntes das três fases ainda serão equilibradas

- Cálculo das componentes simétricas das correntes
- A sequência de fases é ABC
- A corrente na fase A é tomada como referência

$$\begin{aligned}
 \check{I}_A &= \check{I}_A \\
 \check{I}_B &= a^2 \times \check{I}_A = \check{I}_A \angle -120^\circ \\
 \check{I}_C &= a \times \check{I}_A = \check{I}_A \angle -240^\circ.
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \check{I}_A \\ \check{I}_B \\ \check{I}_C \end{bmatrix} = \check{I}_A \times \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$

(slide da aula passada)

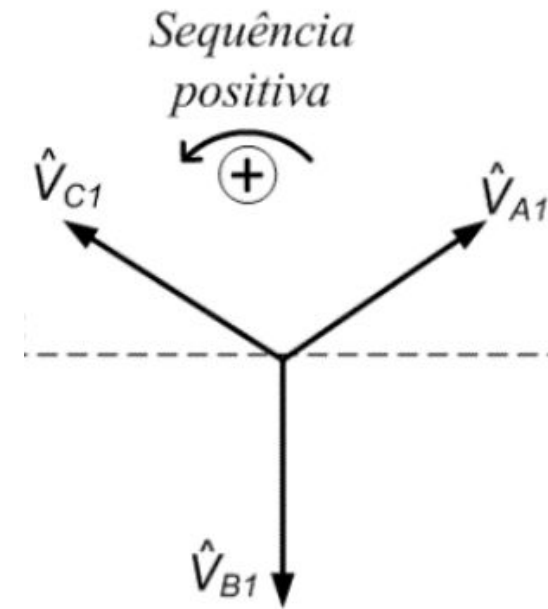
- Caso, por exemplo, \check{V}_{A1} tiver sido determinado, o sistema de sequência positiva pode ser escrito:

$$\check{V}_{A1} = \check{V}_{A1}$$

$$\check{V}_{B1} = a^2 \times \check{V}_{A1} = \check{V}_{A1} \angle -120^\circ$$

$$\check{V}_{C1} = a \times \check{V}_{A1} = \check{V}_{A1} \angle -240^\circ$$

O que é tensão vale para corrente também

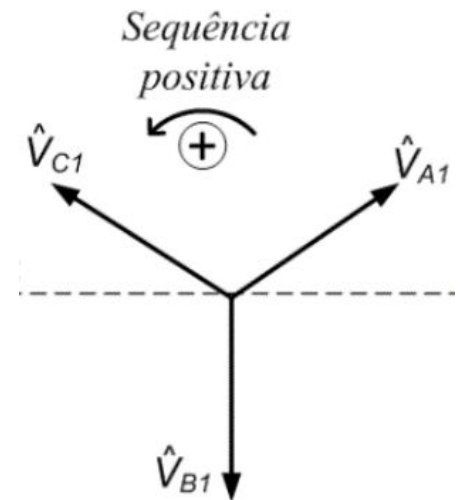


$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ \\ a^3 &= 1 \\ a^4 &= a \\ 1 + a^2 + a &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \check{V}_{A0} \\ \check{V}_{A1} \\ \check{V}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{V}_A \\ \check{V}_B \\ \check{V}_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \check{V}_A &= \check{V}_A \\ \check{V}_B &= a^2 \times \check{V}_A \\ \check{V}_C &= a \times \check{V}_A \end{aligned}$$

Equação vista na aula passada



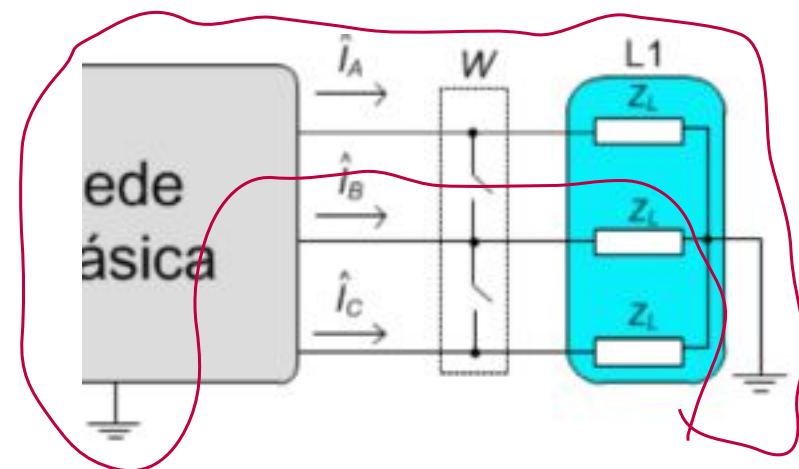
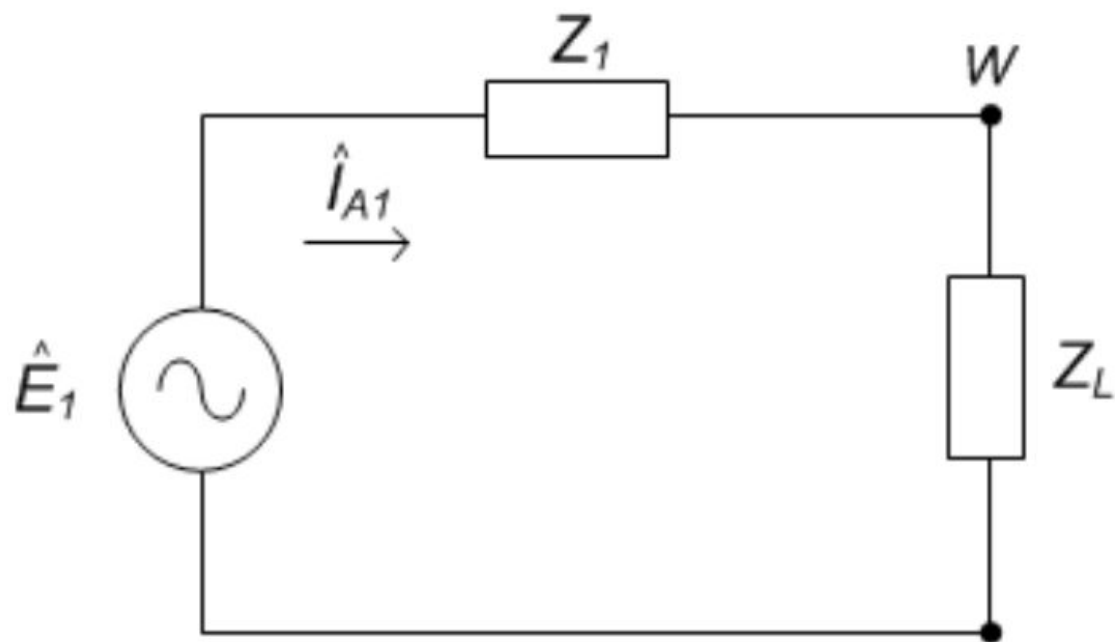
O que é tensão vale para corrente também

$$\begin{bmatrix} \check{I}_{A0} \\ \check{I}_{A1} \\ \check{I}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \check{I}_A \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \check{I}_{A0} \\ \check{I}_{A1} \\ \check{I}_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \check{I}_A \\ 0 \end{bmatrix}$$

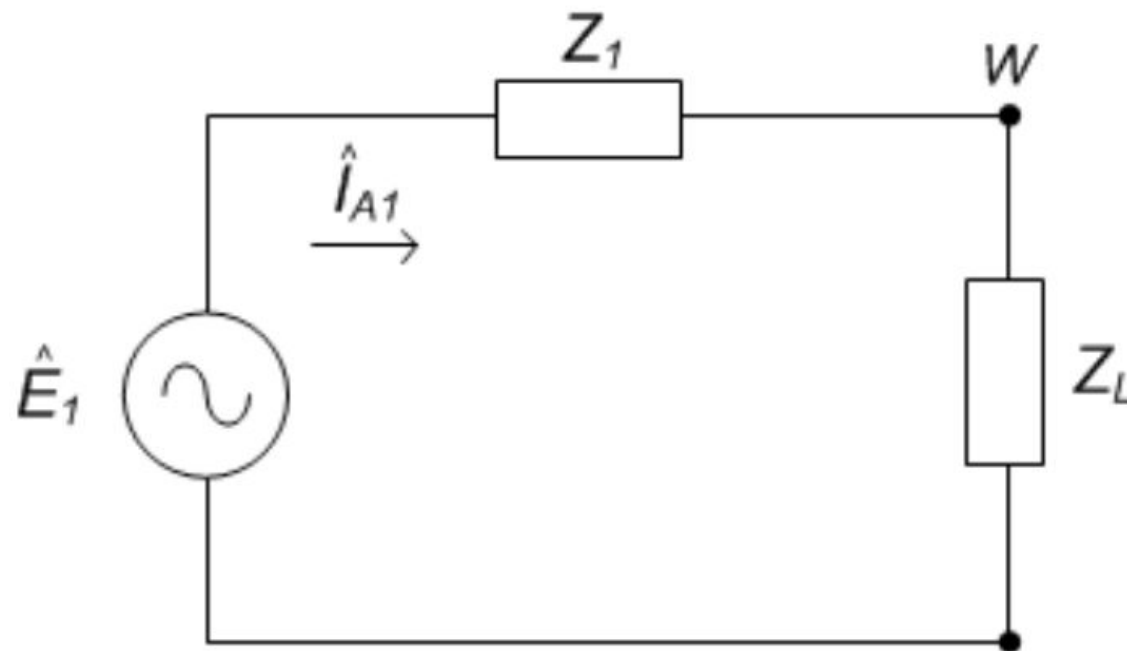
em um curto-circuito trifásico há apenas a corrente de sequência positiva

- Circuito equivalente visto no ponto W :



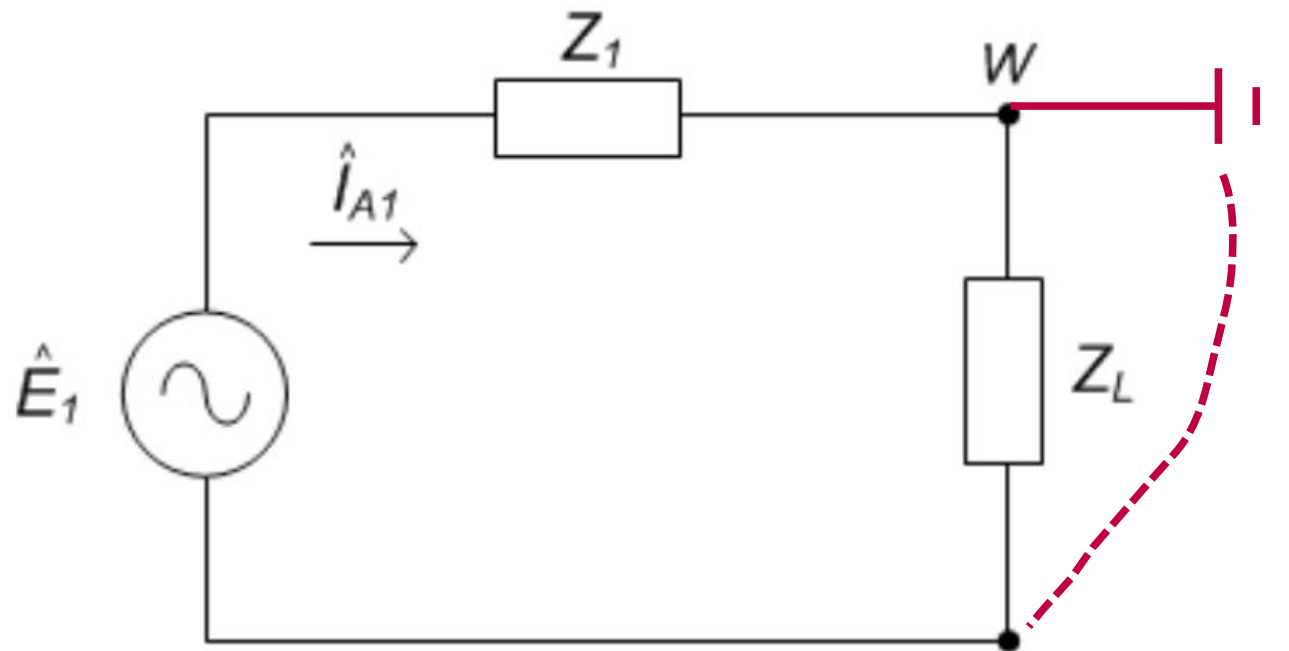
- A corrente de curto-circuito trifásico $\check{I}_{3\phi CC}$ é dada por:

$$\check{I}_{3\phi CC} = \check{I}_A = \check{I}_{A1} = \frac{\check{E}_1}{\check{Z}_1 + \check{Z}_L}$$

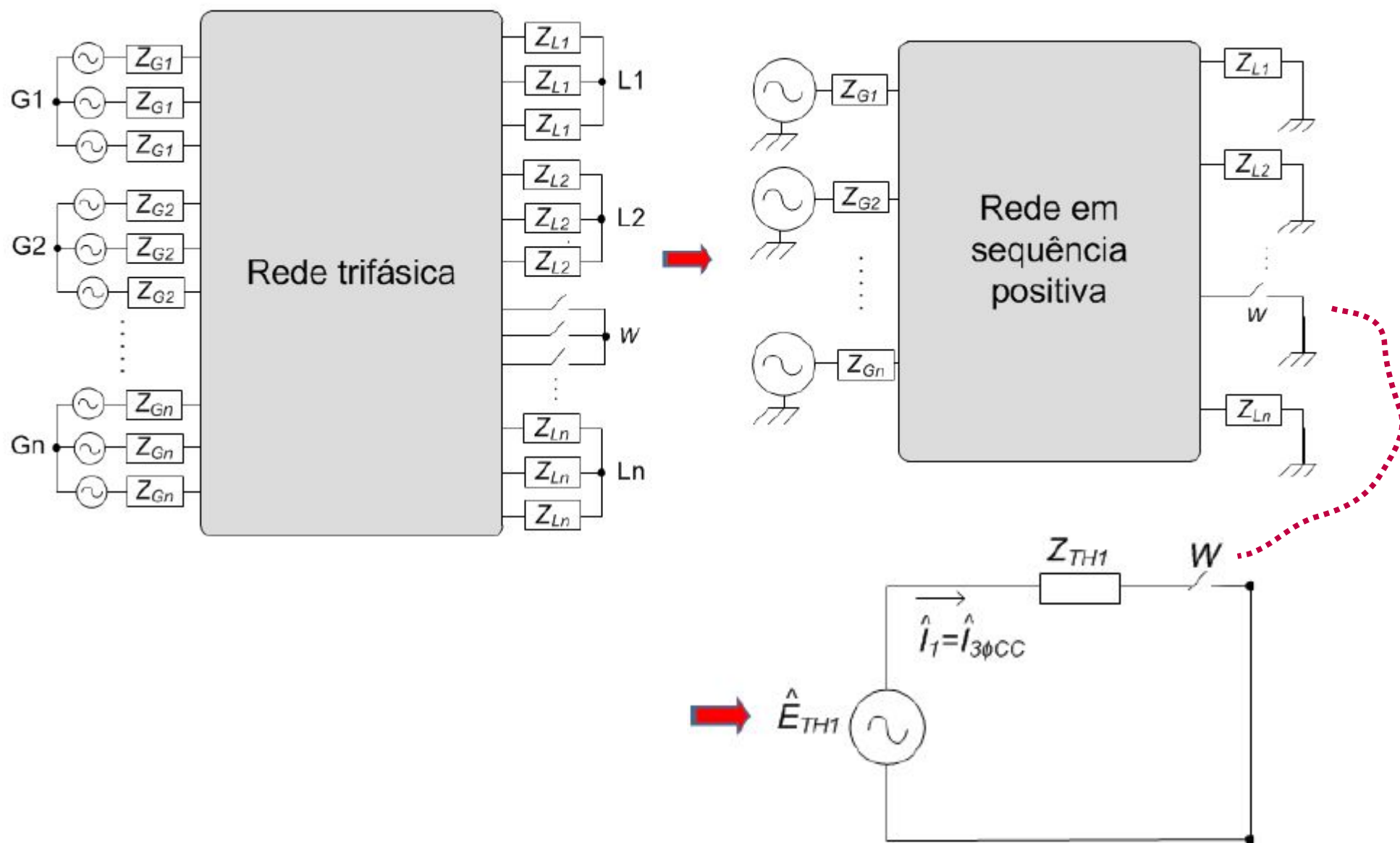


- Caso o curto-circuito no ponto W envolva a terra, a impedância Z_L pode ser desconsiderada:

$$\check{I}_{3\phi CC} = \check{I}_A = \check{I}_{A1} = \frac{\check{E}_1}{\check{Z}_1}$$



- Os mesmos cálculos podem ser aplicados a uma rede elétrica trifásica contendo múltiplos geradores e cargas



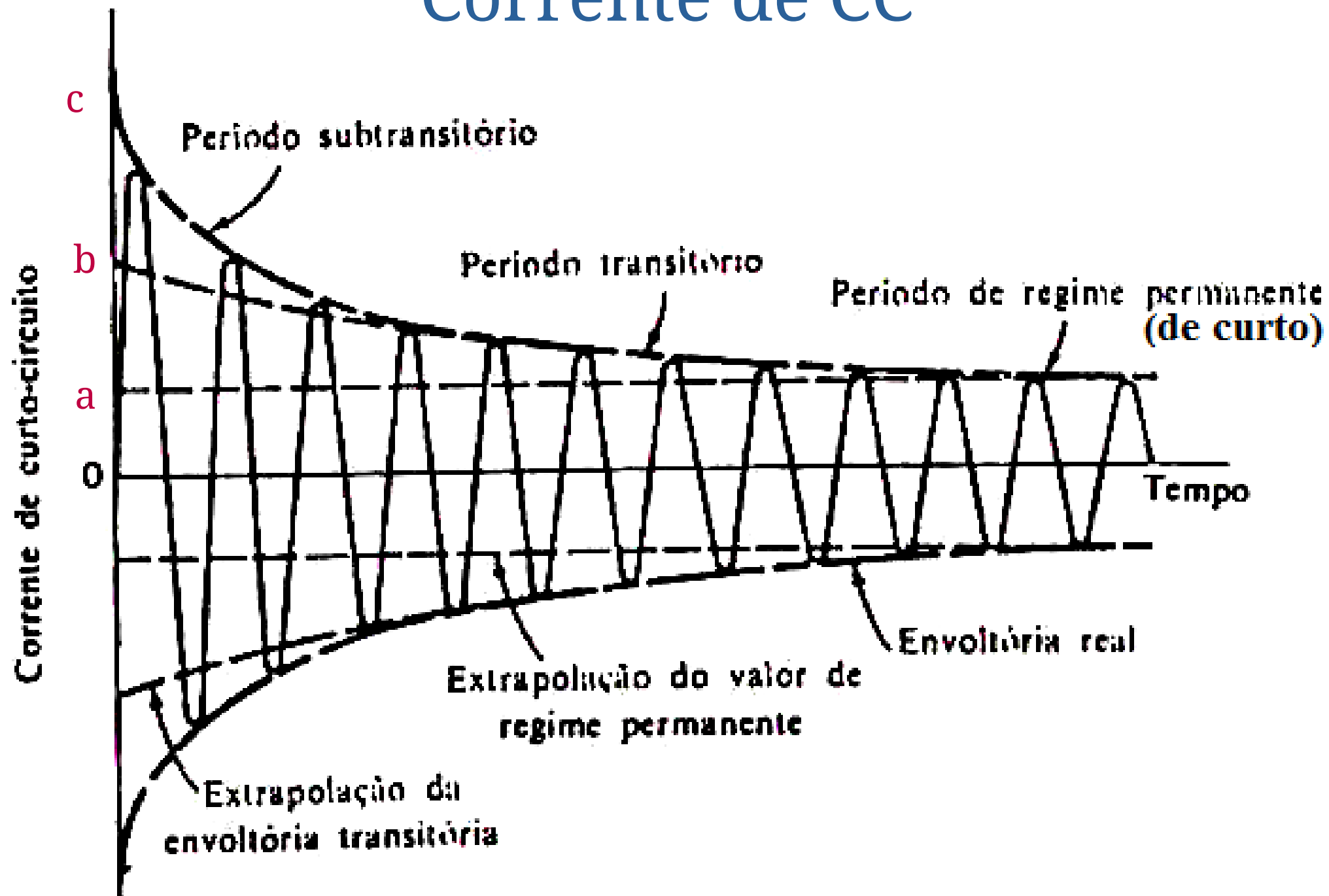
Correntes de curto-circuito e reatância de máquinas síncronas

- A corrente de falta que circula é determinada
 - pelas forças eletromotrizes internas dos geradores
 - por suas impedâncias
 - pelas impedâncias entre os geradores e a falta

Gerador síncrono

- Correntes diferem entre si por causa do efeito da corrente de armadura no fluxo que gera a tensão na máquina:
 - que circula imediatamente após a ocorrência de uma falta
 - que circula após alguns poucos ciclos
 - que persiste, ou de regime permanente
- A corrente varia de maneira relativamente lenta desde seu valor inicial até o valor em regime permanente

Corrente de CC



- Valor eficaz da corrente de curto-circuito em regime permanente

$$I = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

- Reatância síncrona (X_d) do gerador = tensão em vazio do gerador (E_g) dividida pela corrente de regime I

$$X_d = \frac{E_g}{I}$$

- Nesse caso, a resistência da armadura, relativamente pequena, é desprezada

- Corrente transitória

$$I' = \frac{b}{\sqrt{2}}$$

- Reatância transitória para um gerador em vazio

$$X' = \frac{E_g}{I'}$$

- A corrente subtransitória I'' é o valor eficaz da intersecção da envoltória da corrente com $t = 0$

$$I'' = \frac{C}{\sqrt{2}}$$

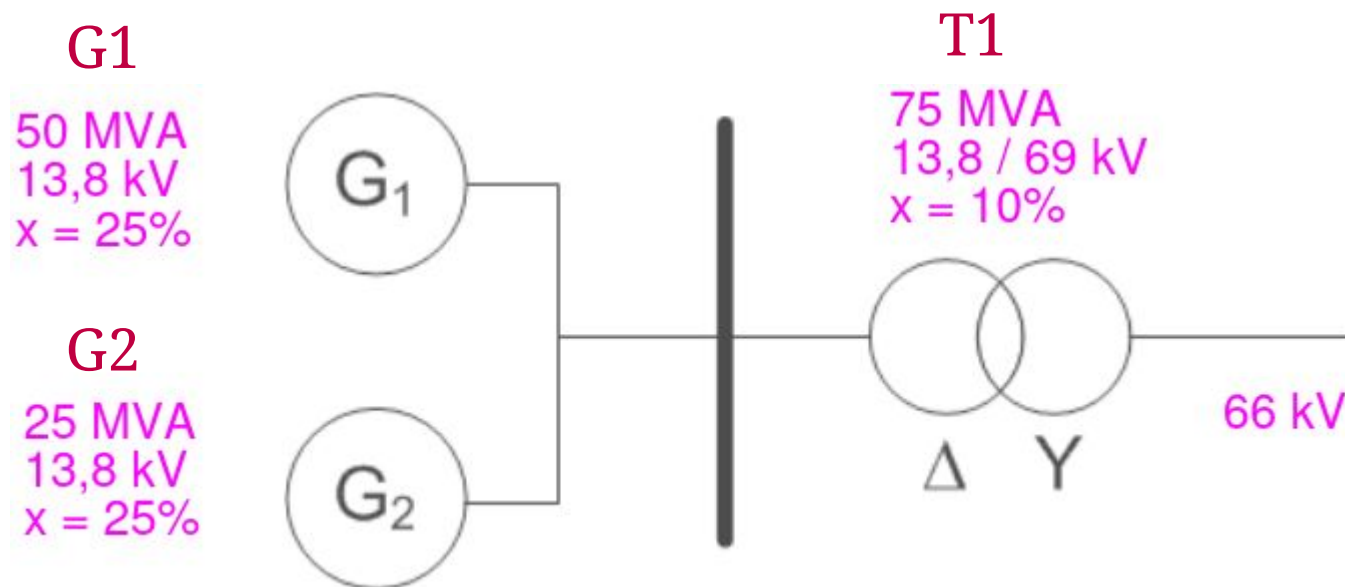
- Também chamada de corrente eficaz simétrica inicial
 - denominação mais apropriada porque contém a ideia de desprezar a componente CC e tomar o valor eficaz da componente alternada da corrente imediatamente após a ocorrência da falta

- Reatância subtransitória de um gerador em vazio

$$X''_d = \frac{E_g}{I''}$$

- como a corrente subtransitória está associada com o valor eficaz da componente alternada da corrente imediatamente após a ocorrência da falta, a reatância subtransitória obtida a partir dessa corrente é usualmente utilizada no cálculo do curto-circuito trifásico

Exemplo (p. 166)

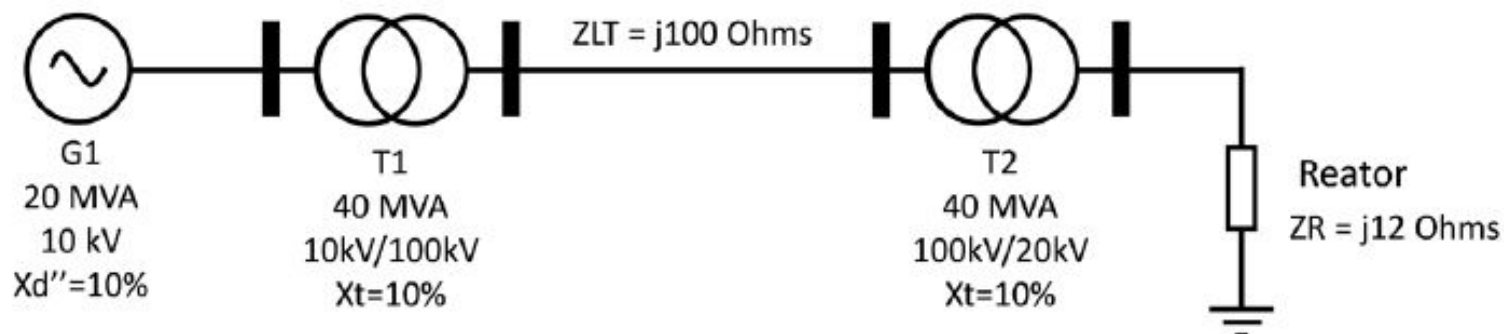


- Dois geradores são ligados em paralelo no lado de baixa tensão de um transformador trifásico Δ -Y
- G1 possui valores nominais de 50 MVA e 13, 8 kV
- G2 tem valores de 25 MVA e 13, 8 kV

- Cada um deles apresenta uma reatância subtransitória de 25%
- O transformador tem valores nominais de 75 MVA , 13,8 kV (Δ) , 69 kV (Y), com reatância de dispersão de 10%
- Antes da ocorrência da falta, a tensão no lado de alta do transformador é 66 kV
- O transformador está sem carga e não existe corrente circulando entre os geradores
- Determine a corrente subtransitória em cada gerador quando ocorre um curto-circuito trifásico no lado de alta tensão do transformador

Sistema por unidade (pu)

Figura 2.1 | Sistema elétrico alimentando um reator



Adotados:

S_{base}

V_{base}

$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{(V_{base} [kV]_{LL})^2}{S_{base} [MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

Y

$$S_{base_{3\phi}} = 3 \cdot S_{base_{1\phi}}$$

$$V_{base_{3\phi}} = \sqrt{3} \cdot V_{base_{1\phi}}$$

LL = fase-fase, LN = fase-neutro

Resolução

- Tomando como **base** no circuito de alta tensão 69 kV e 75 MVA, a tensão **base** no lado de baixa será 13,8 kV

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

G1:

$$X''_d = 0,25 \times \frac{75 \text{ MVA}}{50 \text{ MVA}} = 0,375 \text{ p.u.}$$

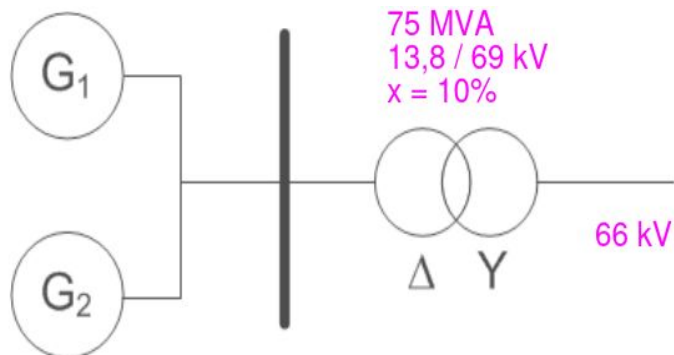
$$E_{g1} = \frac{66 \text{ kV}}{69 \text{ kV}} = 0,957 \text{ p.u.}$$

G2:

$$X''_d = 0,25 \times \frac{75 \text{ MVA}}{25 \text{ MVA}} = 0,750 \text{ p.u.}$$

$$E_{g2} = \frac{66 \text{ kV}}{69 \text{ kV}} = 0,957 \text{ p.u.}$$

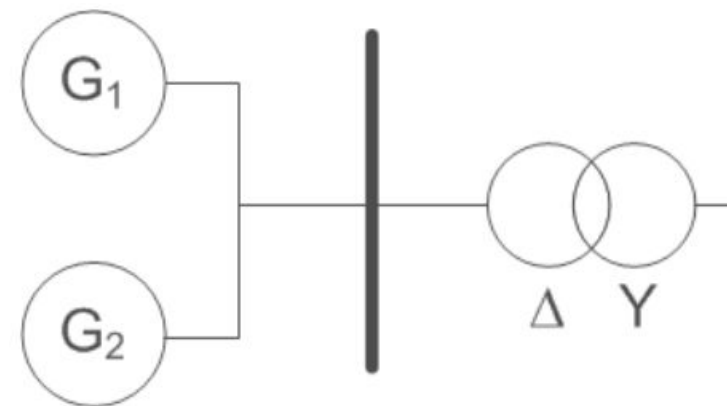
50 MVA
13,8 kV
x = 25%



25 MVA
13,8 kV
x = 25%

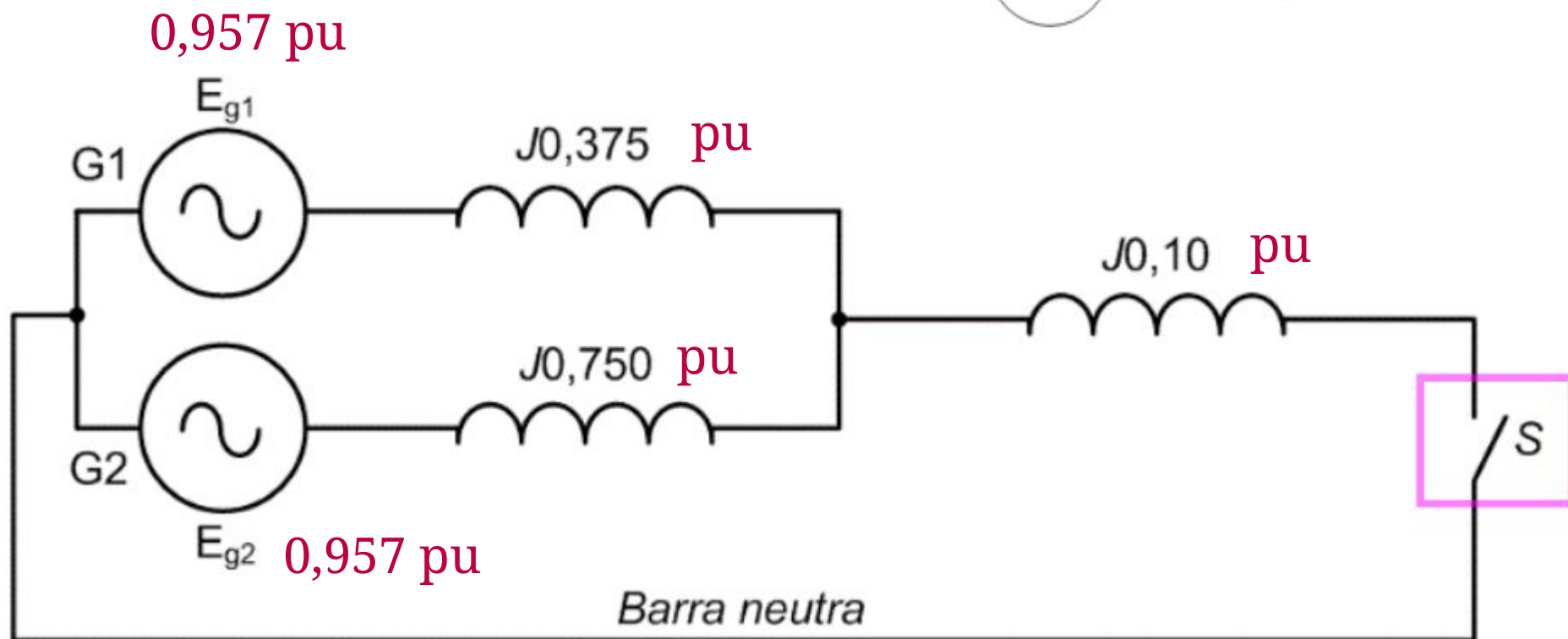
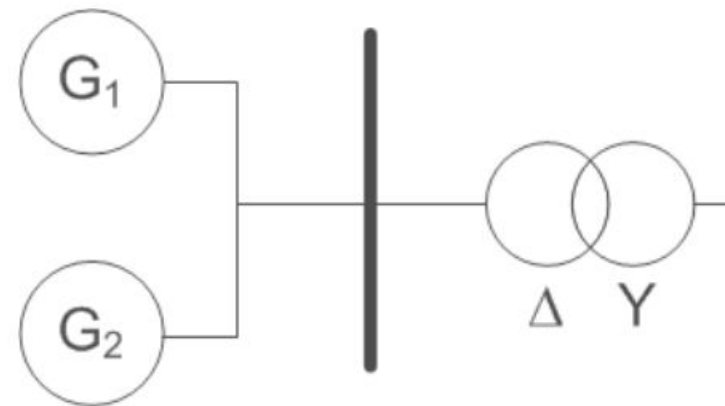
- Transformador

$$X = 0,10 \text{ p.u.}$$



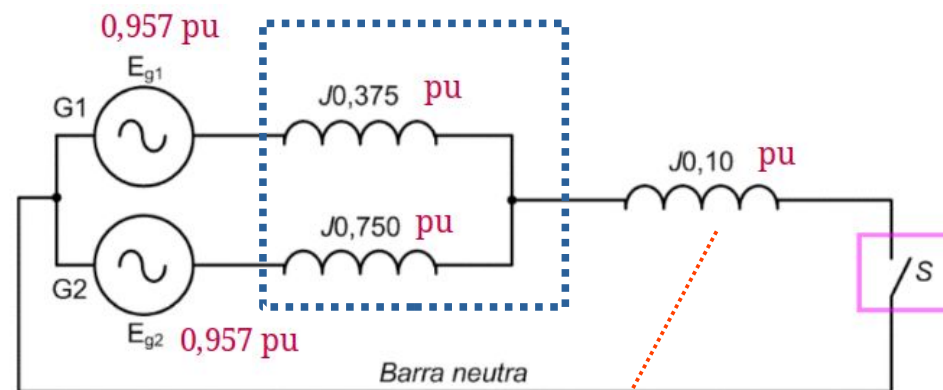
- As tensões internas das duas máquinas (G_1 e G_2) podem ser consideradas em paralelo
- Elas devem ser idênticas em módulo e ângulo de fase para não circular corrente entre as máquinas

- Diagrama de impedância (reatâncias) antes da ocorrência da falta trifásica



- Reatância subtransitória equivalente à associação paralelo

$$X'' = \frac{0,375 \times 0,750}{0,375 + 0,750} = 0,25 \text{ p.u.}$$



- O fasor da corrente subtransitória poderá ser escrito, tomando E_g como referência:

do slide 24

$$X''_d = \frac{E_g}{I''}$$

$$\check{I}'' = \frac{0,957 \angle 0^\circ}{j0,25 + j0,10} = -j2,735 \text{ p.u.}$$

- A corrente divide-se entre os dois geradores de maneira inversamente proporcional às respectivas impedâncias

- Gerador 1

$$\check{I}'' = -j2,735 \times \frac{0,750}{1,125} = -j1,823 \text{ p.u.}$$

(0,750+1,125)

- Gerador 2

$$\check{I}'' = -j2,735 \times \frac{0,375}{1,125} = -j0,912 \text{ p.u.}$$

- Para determinar a corrente em ampères, os valores por unidade são multiplicados pela corrente de base do circuito

- Gerador 1

$$\left| \check{I}'' \right| = \underset{\text{pu}}{1,823} \times \frac{\underset{\text{base}}{75 \text{ MVA}}}{\sqrt{3} \times \underset{\text{base}}{13,8 \text{ kV}}} = 5,720 \text{ kA}$$

- Gerador 2

$$\left| \check{I}'' \right| = 0,912 \times \frac{75 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 13,8 \text{ kV}} = 2,860 \text{ kA}$$

$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

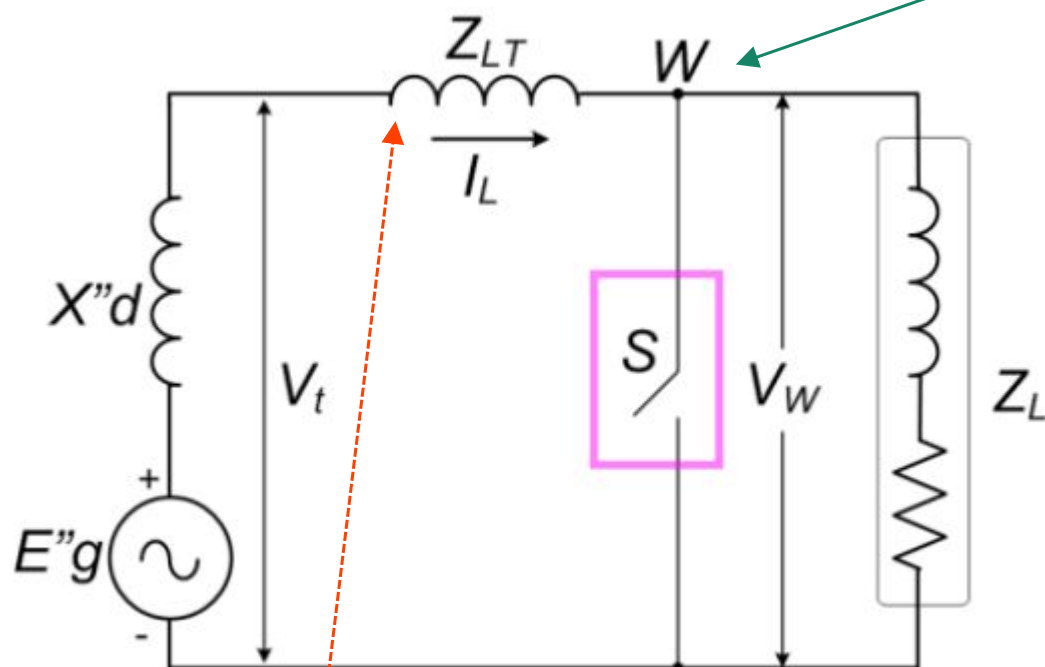
$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

- Reatância do gerador: pode ser determinado a partir de um oscilograma da corrente que circula quando um gerador é curto-circuitado em vazio
- Embora as reatâncias dos geradores não sejam constantes verdadeiras, pois dependem do grau de saturação do circuito magnético, seus valores permanecem geralmente dentro de certos limites aceitáveis para fins de teste e validação

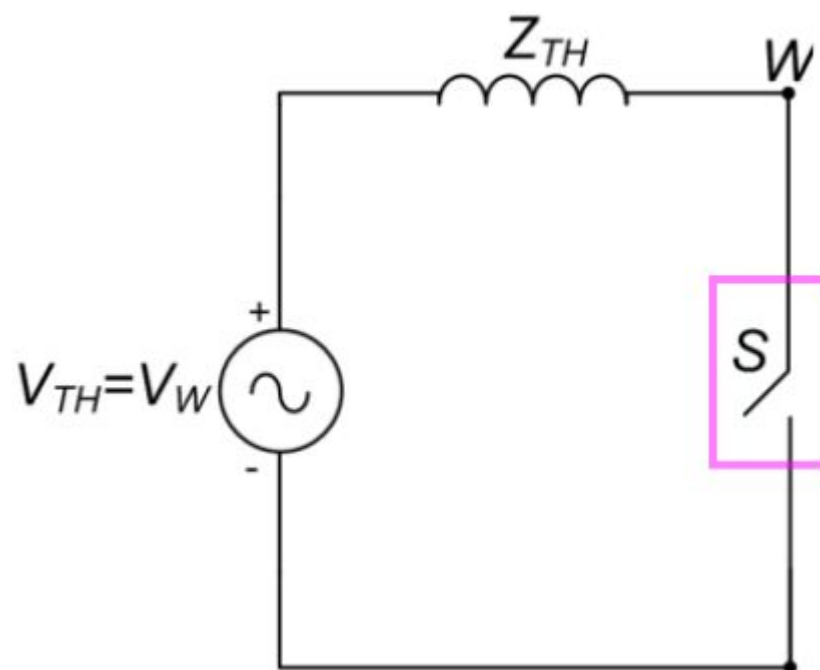
Curto-circuito trifásico em gerador com carga

circuito de um gerador conectado a uma carga trifásica equilibrada

falta trifásica simulada pelo fechamento da chave S



linha de transmissão



Circuito equivalente de Thévenin visto no ponto da falta

- Antes do fechamento da chave S:
 - a corrente que circula é I_L
 - a tensão em W é assumida ser V_W
 - a tensão nos terminais do gerador, considerando a queda de tensão imposta pela reatância subtransitória, é V_t
- O gerador equivalente possui uma tensão interna igual a V_W , que consiste na tensão no ponto W antes da falta
- A impedância é aquela vista a partir do ponto de aplicação da falta
- Se for desejada a corrente inicial, as reatâncias subtransitórias devem ser empregadas

Dimensionamento de disjuntores

- A corrente subtransitória é a corrente eficaz simétrica inicial e não inclui a componente contínua da corrente de falta transitória
- No cálculo do valor eficaz da corrente de falta, são empregados métodos aproximados com precisão aceitável
- O método recomendado pelo IEEE Switchgear Committee leva em consideração a componente CC pela aplicação de um fator de multiplicação à corrente eficaz simétrica calculada

- Determinação da corrente que o disjuntor deve suportar imediatamente após a ocorrência de uma falta, chamada carga instantânea do disjuntor:
 - a corrente eficaz inicial simétrica é calculada com base no teorema de Thévenin
 - considerando as reatâncias subtransitórias de
 - geradores
 - motores (síncronos e de indução)

- Para tanto, a corrente que circula antes da falta deve ser desprezada
- Na prática, o fator de multiplicação recomendado é 1,6 , todavia, para tensões até 5kV emprega-se 1,5
- Para disjuntores a ar comprimido com valor nominal de 600V ou menos, recomenda-se 1,25

- Em essência o valor nominal do disjuntor é baseado na média de todas as três fases
- No cálculo da corrente à qual é aplicado o fator de multiplicação, a fim de determinar a corrente nominal de interrupção, recomenda-se desprezar:
 - a reatância subtransitória, que é utilizada para os geradores
 - a reatância transitória para os motores síncronos e de indução

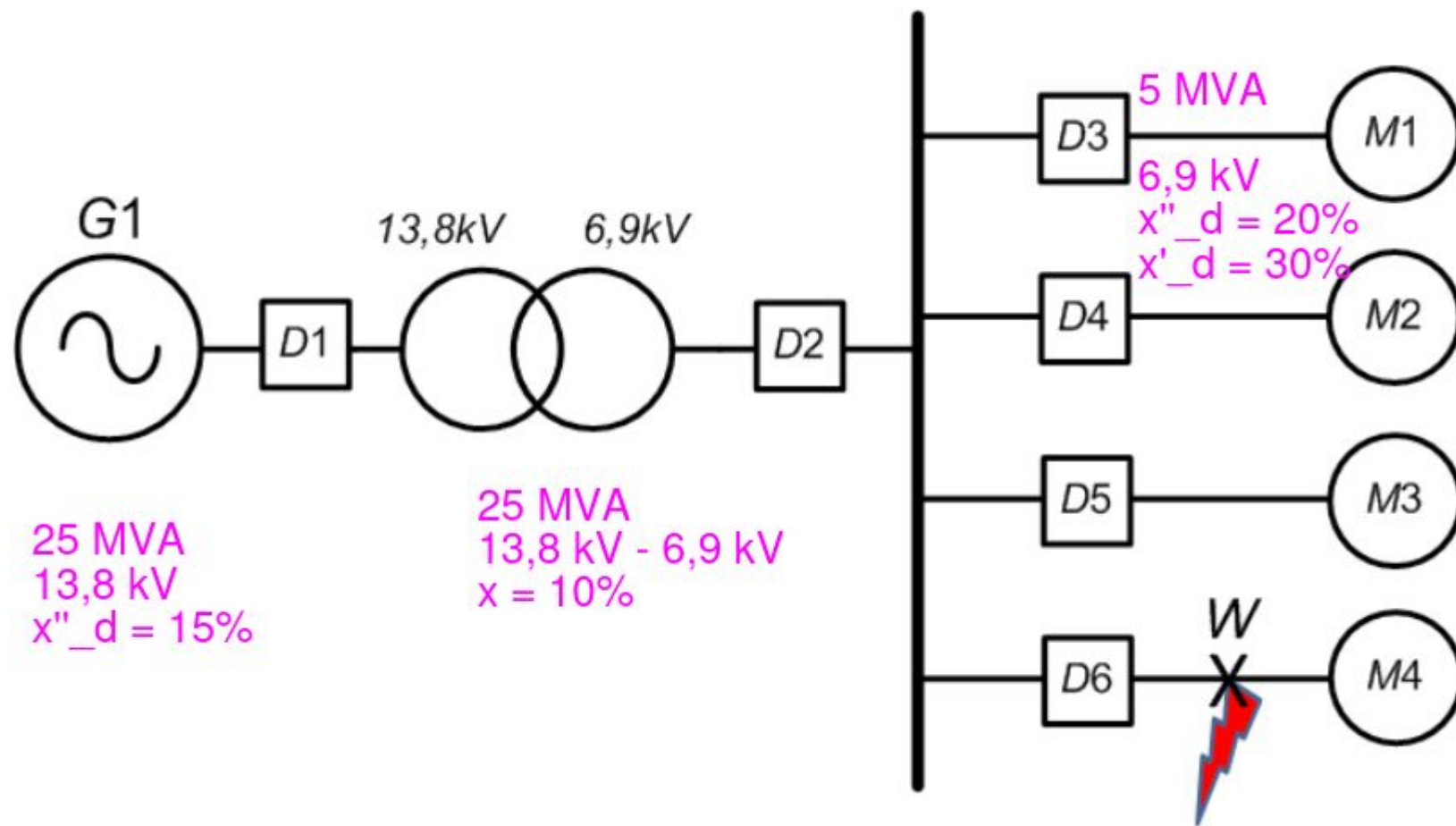
- Os fatores de multiplicação sugeridos para obter o valor nominal de interrupção dependem da velocidade do disjuntor
- Para o caso geral, os fatores recomendados são:

Disjuntores de 8 ciclos ou mais lentos	1,0
Disjuntores de 5 ciclos	1,1
Disjuntores de 3 ciclos	1,2
Disjuntores de 2 ciclos	1,4

- Caso os disjuntores estejam no barramento do gerador e a potência trifásica for superior a 500 MVA antes da aplicação de qualquer fator de multiplicação, para cada fator dado anteriormente deve ser acrescido o valor de 0,1

- Por motivos de simplicidade, o disjuntor também pode ser dimensionado com base na sua margem de segurança
- A margem é o valor percentual que extrapola a corrente de curto-circuito
- Por exemplo, um disjuntor com margem de 20% significa que a corrente mínima que ele deve suportar, sem se danificar, é 20% maior do que o valor da corrente de falta previamente calculado

Exemplo da p. 170



- Realizar o estudo de curto-circuito de um sistema elétrico formado por um gerador de 25 MVA , 13,8 kV, com reatância subtransitória $X''_d = 15\%$, ligado por meio de um transformador a uma barra que alimenta quatro motores idênticos
- Cada motor tem reatância subtransitória e transitórias iguais a $X''_d = 20\%$ e $X'_d = 30\%$, respectivamente, numa base de 5 MVA e 6,9 kV
- Os valores nominais do transformador trifásico são de 25 MVA , 13,8 kV - 6,9 kV , com reatância de dispersão de 10%

- A tensão na barra dos motores é 6,9 kV, quando ocorre uma falta no ponto W
- Determinar:
 - a corrente subtransitória na falta
 - a corrente subtransitória no disjuntor D6
 - a corrente instantânea no disjuntor D6
 - o dimensionamento do disjuntor D6 para que a corrente seja interrompida em 5 ciclos

Resolução

- Gerador: base de 25 MVA , 13,8 kV; motores: base de 25 MVA , 6,9 kV

subtransitória

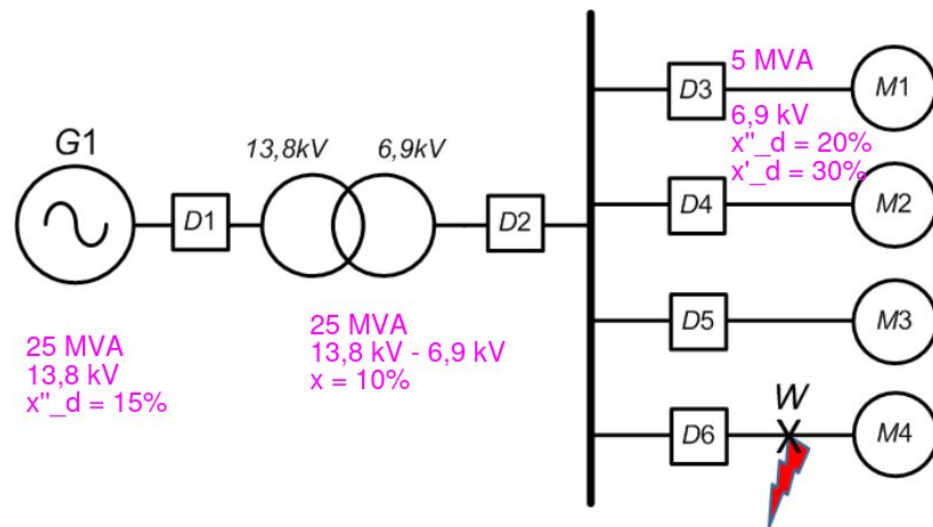
$$X''_d = j0,20 \times \frac{25 \text{ MVA}}{5 \text{ MVA}} = j1,0 \text{ p.u.}$$

motores

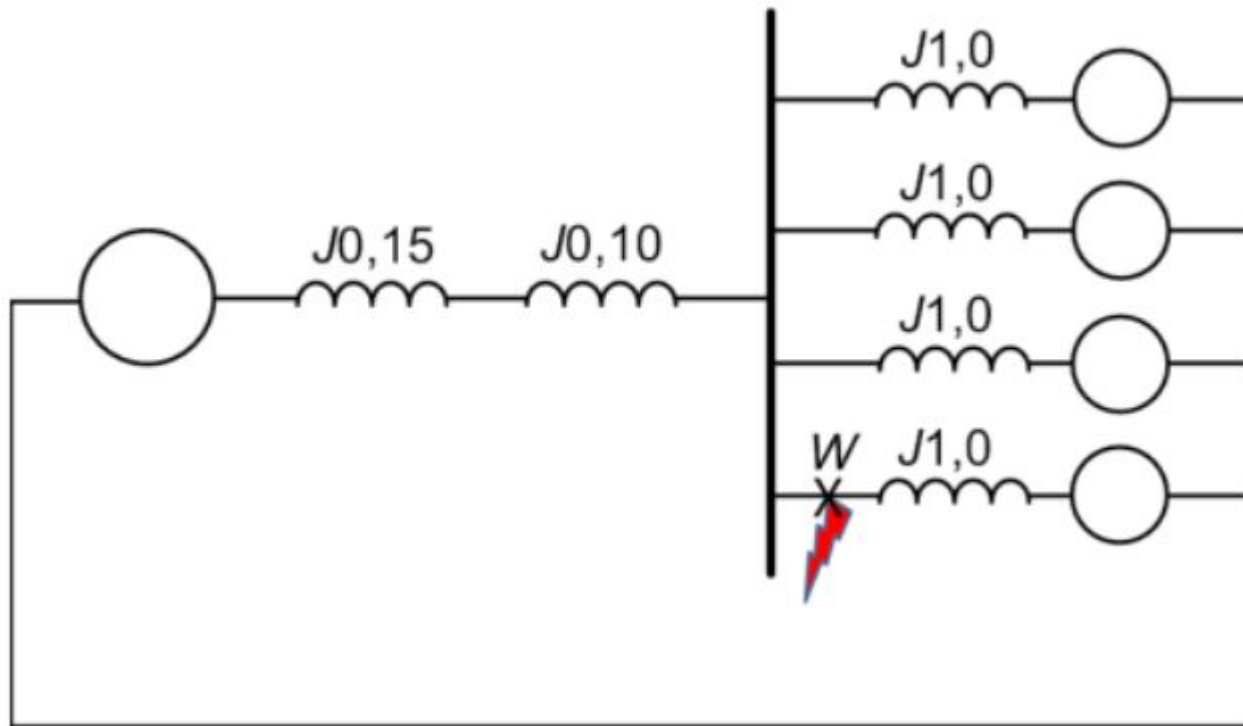
$$X'_d = j0,30 \times \frac{25 \text{ MVA}}{5 \text{ MVA}} = j1,5 \text{ p.u.}$$

transitória

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$



- Reatâncias subtransitórias



- Para uma falta em W, a tensão e a impedância equivalente são dadas por:

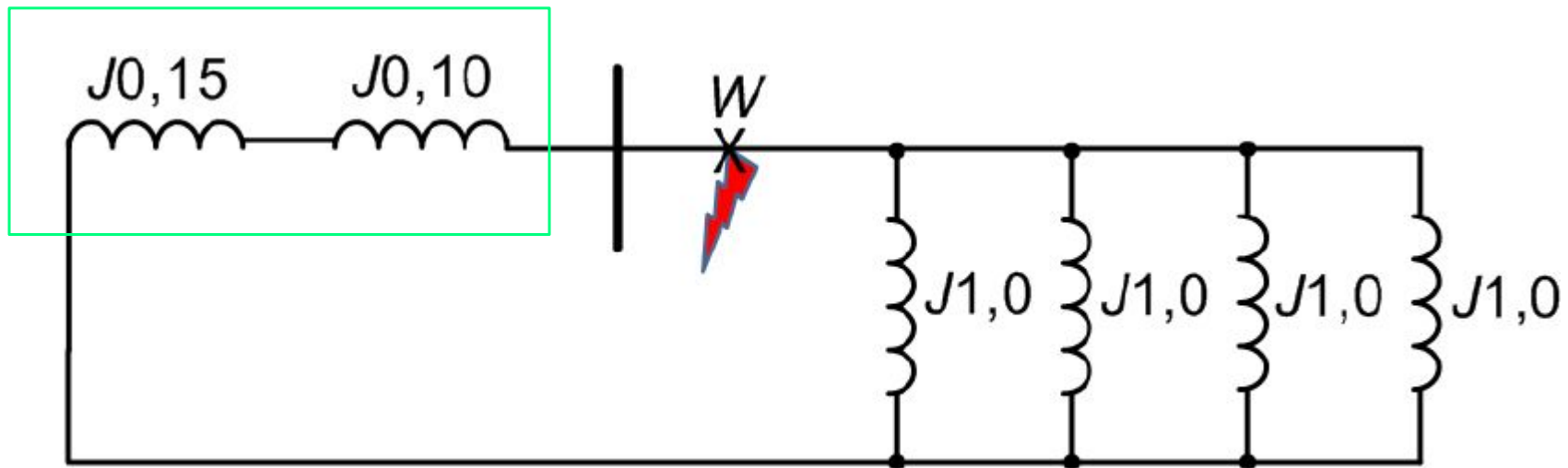
$$V_W = V_{TH} = 1,0 \text{ p.u.}$$

$$Z_{TH} = j0,125 \text{ p.u. (vide próximo slide)}$$

- O cálculo da tensão é equivalente e direto, uma vez que a tensão original e a tensão de base no ponto de ocorrência da falta são iguais

- A impedância equivalente pode ser obtida por meio da simples resolução do circuito:

em paralelo com as demais



- A corrente subtransitória na falta é igual a:

$$I'' = \frac{1,0}{j0,125} = -j8,0 \text{ p.u.}$$

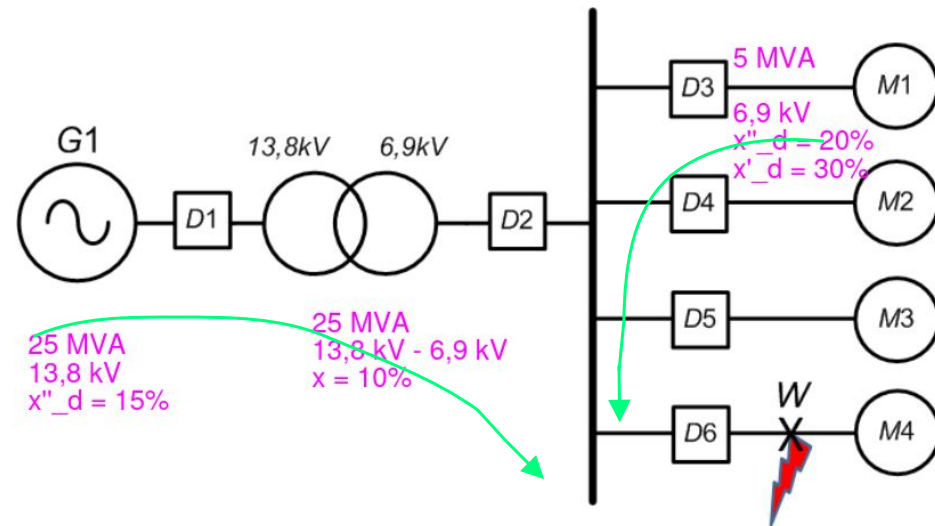
- A corrente de base no circuito de 6,9 kV é:

$$\frac{25 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 6,9 \text{ kV}} = 2,090 \text{ kA} \Rightarrow I'' = 8 \times 2,090 \text{ kA} = 16,720 \text{ kA}$$

$$I_{base}[A] = \frac{S_{base}[kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{base}[kV]_{LL}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

- Através do disjuntor D6 passa a contribuição do gerador e de três dos quatro motores



- Antes da falta os motores são cargas, porém, no instante da falta, devido às suas inércias, eles passam a ser considerados como geradores contribuindo para a corrente de falta
- O gerador contribui com uma corrente de

$$-j8,0 \times \frac{0,25}{0,50} = -j4,0 \text{ p.u.} \quad (\text{metade da corrente})$$

- Cada motor contribui com 25% do restante da corrente de falta, ou $-j1,0$ p.u.
- A corrente subtransitória no disjuntor D6 é:

$$I'' = -j4,0 + 3 \times (-j1,0) = -j7,0 \text{ pu} = 7 \times 2,090 \text{ kA} = 14,630 \text{ kA}$$

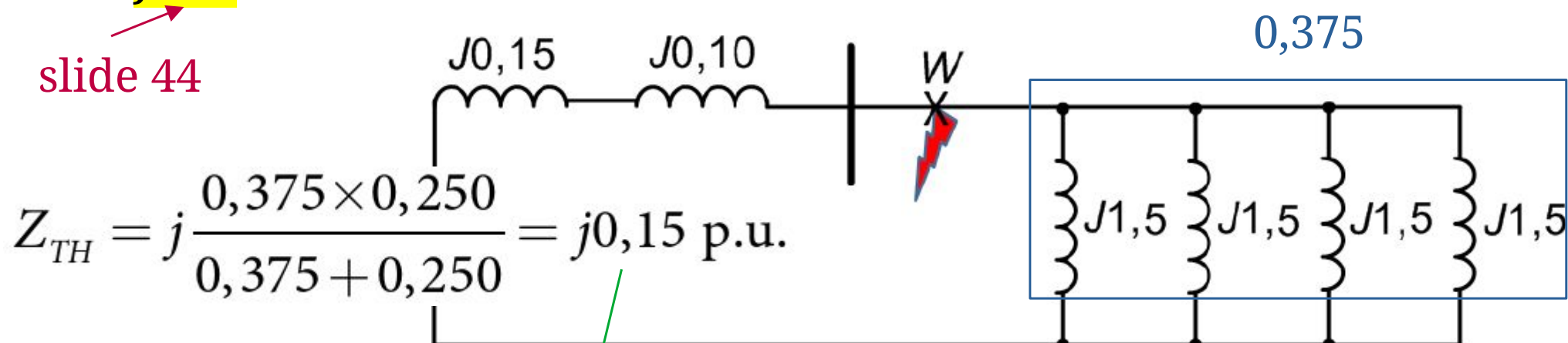
slide 48

- A corrente instantânea no disjuntor D6 é:

$$1,6 \times 14,630 \text{ kA} = 23,450 \text{ kA}$$

slide 36

- Para calcular a **corrente a ser interrompida**, deve-se substituir a reatância subtransitória de $j1,0$ pela reatância de **$j1,5$** no circuito do motor:



- O gerador contribui com uma corrente de:

tensão em pu

$$\frac{1}{j0,15} \times \frac{0,375}{0,625} = -j4,0 \text{ p.u.}$$

(0,375+0,25)

- Cada motor contribui com uma corrente de:

proporcional

$$\frac{1}{4} \times \frac{1}{j0,15} \times \frac{0,250}{0,625} = -j0,67 \text{ p.u.}$$

- Corrente mínima a ser interrompida pelo disjuntor:

$$1,1 \times (4,0 + 3 \times 0,67) \times 2,090 \text{ kA} = 13,8 \text{ kA}$$

slide 38 gerador slide 48

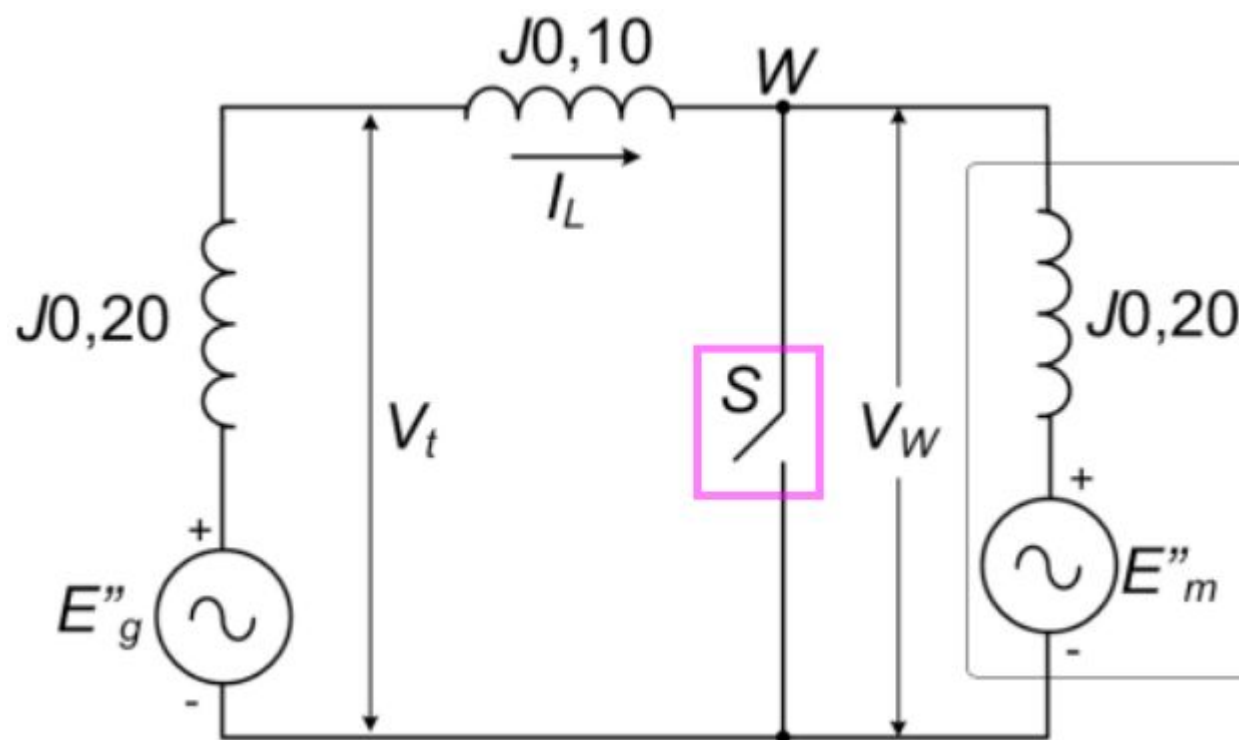
- Potência de interrupção do disjuntor:

$$\sqrt{3} \times 13,8 \text{ kA} \times 6,9 \text{ kV} = 165 \text{ MVA}$$

corrente

tensão

Curto-circuito trifásico levando em consideração as tensões internas das máquinas síncronas



Realizar o cálculo de curto-circuito do sistema elétrico equivalente

- Um gerador e um motor síncrono têm valores nominais de 30 MVA , 13,2 kV
- Ambos possuem reatâncias subtransitórias de 20%
- A reatância da linha que os conecta é 10% na base dos valores nominais das máquinas
- O motor está consumindo 20 MW com fator de potência de 0,8 adiantado e tensão terminal de 12,8 kV
- Ocorre uma falta trifásica representada pelo fechamento da chave S no ponto W
- Determinar a corrente subtransitória no gerador, no motor e na falta

Resolução

- Usando a tensão da falta V_w como fasor de referência:

tensão motor

$$V_w = \frac{12,8kV}{13,2kV} = 0,97 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

gerador base

potência de base

$$I_{BASE} = \frac{30MVA}{\sqrt{3} \times 13,2kV} = 1,312 \text{ kA}$$

$$I_{base}[A] = \frac{S_{base}[kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{base}[kV]_{LL}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

motor

$$I_L = \frac{20 \text{ MW}}{0,8 \times \sqrt{3} \times 12,8 \text{ kV}} \angle \cos^{-1} 0,8 = 1,128 \angle 36,9^\circ \text{ kA}$$

fator de potência

$$I_{LBASE} = \frac{1,128 \angle 36,9^\circ \text{ kA}}{1,312 \text{ kA}} = 0,86 \angle 36,9^\circ \text{ pu} = (0,69 + j0,52) \text{ p.u.}$$

slide anterior

- Para o gerador:

dado

$$V_t = 0,970 + j0,1 \times (0,69 + j0,52) = (0,918 + j0,069) \text{ p.u.}$$


slide anterior

(continua)

(continuação)

$$E''_g = \overset{\text{slide anterior}}{0,918 + j0,069} + \overset{\text{dado}}{j0,2} \times (0,69 + j0,52) =$$

$$= (0,814 + j0,207) \text{ p.u.}$$



$$I''_g = \frac{0,814 + j0,207}{j0,3} = (0,69 - j2,71) \text{ pu}$$

(j0,20+j0,10)

$$I_{BASE} \times (0,69 - j2,71) = (905 - j3550) \text{ A}$$

1,312 kA

- Para o motor

$$V_W = 0,97 \angle 0^\circ \text{ p.u.} \quad \text{já calculado}$$

$$E''_m = 0,97 + j0 - j0,2 \times (0,69 + j0,52) = (1,074 - j0,138) \text{ p.u.}$$

curto tensão em xg

$$I''_m = \frac{1,074 - j0,138}{j0,2} = (-0,69 - j5,37) \text{ pu} = I_{BASE} \times I''_m(\text{pu}) =$$

$$= (-905 - j7050) \text{ A}$$

- Na falta

slide anterior

$$I''_W = I''_g + I''_m = 0,69 - j2,71 - 0,69 - j5,37 = -j8,08 \text{ pu} =$$

$$= I_{BASE} \times I''_W(\text{pu}) = -j10,6 \text{ kA}$$

1,312 kA

- Circuito elétrico equivalente durante a falta, incluindo os sentidos de I''_g , I''_m , I''_w :

