

Por Cláudio Mardegan*



Um melhor entendimento da curva da corrente de curto-circuito de decremento de gerador

- Equações da Curva de Decremento do Gerador;
- Constantes de Tempo do Gerador;
- Ajuste do "Field Forcing";
- Verificação da sensibilidade das proteções em outros níveis de tensão diferentes do nível de tensão da falta.

A corrente de curto-circuito em geradores decai acentuadamente com o tempo. Essa variação depende de dois tipos de decremento, AC e DC. O decremento DC ocorre durante os primeiros ciclos do curto-circuito. O decremento AC é dividido em três diferentes períodos de tempo conhecidos como subtransitório, transitório e de regime permanente, baseados respectivamente na reatância do gerador $X''d$, $X'd$ e X_d . Nos terminais do gerador esta variação é

bastante pronunciada. A figura 1 seguinte ilustra o exposto.

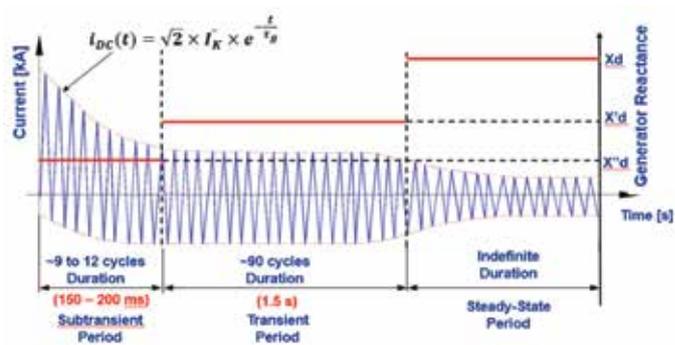


Figura 1 – Períodos e variação da corrente de curto-circuito e das reatâncias em geradores.

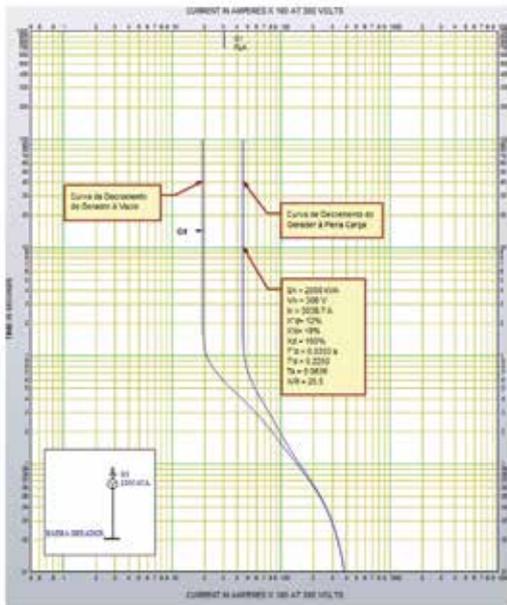
Curva de decremento da corrente de curto-circuito do gerador

Quando ocorre um curto-circuito em um sistema elétrico alimentado por geradores, a corrente de curto-circuito apresenta um pico inicial e depois começa a decair rapidamente, pois não possui inércia suficiente para sustentar permanentemente o valor inicial. Na maioria dos casos, a corrente de curto-circuito permanente pode até ser menor que a corrente nominal do gerador. Isso ocorre quando Xd é maior que 1pu.

O valor da corrente de curto-circuito neste caso depende do carregamento do gerador. Assim, o valor real da corrente depende do carregamento e do tempo. Entre a condição a vazio e a condição de plena carga, existem famílias de curvas de decremento.

A seguir é apresentada uma típica curva de decremento do gerador. Atualmente, a maioria dos geradores possui um sistema que sustenta o valor da corrente acima da corrente nominal (de plena carga) por um tempo especificado, normalmente a corrente é sustentada entre 1,5 e quatro vezes a corrente nominal por 10s, dependendo do fabricante.

O decaimento da corrente de curto-circuito com o tempo é conhecida como curva de decremento do gerador. O equacionamento do decremento da corrente de curto-circuito do gerador conforme IEEE Std 242 é apresentado a seguir.



$$i_{ac} = (i_d'' - i_d')e^{-t/T_d'} + (i_d' - i_d)e^{-t/T_d} + i_d$$

$$i_d'' = \frac{e''}{X_d''} \text{ pu} \quad e'' = e_t + X_d'' \sin \theta \text{ pu}$$

Figura 2 – Curva de decremento típica de gerador.

When machine is at no-load, $e'' = e_t$.

$$i_d' = \frac{e'}{X_d'} \text{ pu} \quad e' = e_t + X_d' \sin \theta \text{ pu}$$

Again, at no-load, $e' = e_t$.

$$\sqrt{2}i_d'' e^{-t/T_d} \quad i_{tot} = \sqrt{i_{ac}^2 + i_{dc}^2}$$

Onde:

IF = É a corrente com o campo atual para uma condição especificada (pu)

IFg= É a corrente de campo para condição a vazio na tensão nominal (pu).

VALOR INSTANTÂNEO DA CORRENTE DE DECREMENTO DO GERADOR

O valor da corrente instantânea é calculado como segue:

$$i_{ac}(t) = (I''_K - I'_K) \times e^{-\frac{t}{\tau''d}} + (I'_K - I_K) \times e^{-\frac{t}{\tau'd}} + I_K$$

Onde:

I''K= Corrente de Curto-Circuito Subtransitória

I'K = Corrente de Curto-Circuito Transitória

IK = Corrente de curto-circuito permanente

$\tau''d$ = Constante de Tempo Subtransitória

$\tau'd$ = Constante de Tempo Transitória

$\tau'g$ = Constante de tempo de armadura

Os valores de I''_K, I'_K e I_K são calculados como segue:

Para o curto-circuito trifásico

$$I''_{K(3)} = \frac{E''_Y}{X'_d + Z_N} \quad I'_{K(3)} = \frac{E'_Y}{X'_d + Z_N} \quad I_{K(3)} = \frac{E_Y}{X'_d + Z_N}$$

Para o curto-circuito bifásico

$$I''_{K(2)} = \frac{\sqrt{3}E''_Y}{X'_d + X_2 + 2Z_N} \quad I'_{K(2)} = \frac{\sqrt{3}E'_Y}{X'_d + X_2 + 2Z_N} \quad I_{K(2)} = \frac{\sqrt{3}E_Y}{X'_d + X_2 + 2Z_N}$$

Para o curto-circuito monofásico

$$I''_{K(1)} = \frac{3E''_Y}{X'_d + X_2 + 2Z_N + Z_{N0} + X_0 + 3Z_G} \quad I'_{K(1)} = \frac{3E'_Y}{X'_d + X_2 + 2Z_N + Z_{N0} + X_0 + 3Z_G}$$

$$I_{K(1)} = \frac{3E_Y}{X'_d + X_2 + 2Z_N + Z_{N0} + X_0 + 3Z_G}$$

Os valores de E''_Y, E'_Y e E_Y são calculados como segue:

$$E''_Y = U_Y + jX'_d I \quad E'_Y = k' U_Y \quad E_Y = U_Y + jX_d I \quad E_Y = k U_Y$$

$$E_Y = U_Y + jX_d I \quad E_Y = k U_Y$$

Onde:

$E''_Y =$ F.E.M. atrás da reatância subtransitória saturada do eixo d

$E'_Y =$ F.E.M. atrás da reatância transitória saturada do eixo d

$E_Y =$ F.E.M. atrás da reatância síncrona

$X''_d =$ reatância subtransitória saturada do eixo d

$X'_d =$ Reatância transitória do eixo d saturada

$X_d =$ Reatância síncrona

$Z_N =$ Impedância externa do gerador (até o ponto de aplicação da falha)

$U_Y =$ Tensão no terminal do gerador

$I =$ Corrente de carga do gerador

O diagrama fasorial do gerador pode ser visualizado na Figura 3.

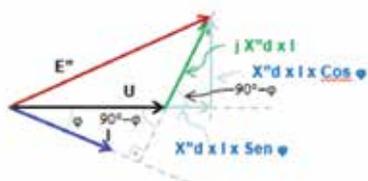


Figura 3 - Diagrama Fasorial do Gerador

Com base no diagrama fasorial pode-se obter o valor eficaz de E''_Y , como segue:

$$E''_Y = \sqrt{(U + X''_d \times I_L \times \sin \varphi)^2 + (X''_d \times I_L \times \cos \varphi)^2}$$

Analogamente, obtêm-se E'_Y e E_Y

$$E'_Y = \sqrt{(U + X'_d \times I_L \times \sin \varphi)^2 + (X'_d \times I_L \times \cos \varphi)^2}$$

$$E_Y = \sqrt{(U + X_d \times I_L \times \sin \varphi)^2 + (X_d \times I_L \times \cos \varphi)^2}$$

Equações das constantes de tempo do gerador

As equações das constantes de tempo do gerador são calculadas como segue:

$$\tau''_d = \frac{X''_d + X_N}{X''_d + X_N} \cdot \tau''_{d0} \quad \tau'_d = \frac{X'_d + X_N}{X'_d + X_N} \cdot \tau'_{d0} \quad \tau_g = \frac{X'_d + X_N}{\omega(R_a + R_N)}$$

A componente DC da corrente de curto-circuito pode ser calculada pela equação:

$$i_{DC}(t) = \sqrt{2} \times I'_K \times e^{-\frac{t}{\tau_g}}$$

A corrente de curto-circuito assimétrica total é calculada pela expressão:

$$i_{TOTAL(RMS)} = \sqrt{i_{AC}(t)^2 + i_{DC}(t)^2}$$

$$i_{TOTAL(RMS)} = \sqrt{\left[(I'_K - I'_K) \times e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (I'_K - I_K) \times e^{-\frac{t}{\tau'_d}} + I_K \right]^2 + 2 \times \left[I'_K \times e^{-\frac{t}{\tau_g}} \right]^2}$$

A equação acima é obtida do livro "Correntes de Curto-Circuitos em Redes Trifásicas", de Richard Roeper – Siemens – 1985, 167 páginas.

EXEMPLO:

Determine a curva de decremento do gerador de 3400 kVA, 380V, 0.8 PF, corrente nominal 5165.7 Amps, $X''_d = 15.8\%$, $X'_d = 21.4\%$, $X_d = 290\%$, $R_a = 0.5588\%$, $T''_{d0} = 20.3\text{ms}$, $T'_{d0} = 2.122\text{s}$, para um curto-circuito trifásico em seus terminais ($Z_N = 0$), na condição a vazio e plena carga.

SOLUÇÃO:

Primeiro será calculada a corrente na condição de plena carga.

O primeiro passo consiste no cálculo das constantes de tempo.

$$\tau''_d = \frac{X''_d + X_N}{X''_d + X_N} \times \tau''_{d0} = \frac{0.158 + 0.0}{0.214 + 0.0} \times 0.0203 = 0.0150 \text{ s}$$

$$\tau'_d = \frac{X'_d + X_N}{X'_d + X_N} \times \tau'_{d0} = \frac{0.214 + 0.0}{2.90 + 0.0} \times 2.1222 = 0.01566 \text{ s}$$

$$\tau_g = \frac{X'_d + X_N}{\omega \times (R_a + R_N)} = \frac{0.158 + 0.0}{2\pi \times 60 \times (0.005588 + 0.0)} = 0.0750 \text{ s}$$

O segundo passo consiste no cálculo no cálculo das F.E.M.:

$$E''_Y = \sqrt{(U + X''_d \times I \times \text{Sen} \varphi)^2 + (X''_d \times I \times \text{Cos} \varphi)^2} = \sqrt{(1 + 0.158 \times 1 \times 0.6)^2 + (0.158 \times 1 \times 0.8)^2}$$

$$E''_Y = \sqrt{1.2146} = 1.1021$$

$$E'_Y = \sqrt{(U + X'_d \times I \times \text{Sen} \varphi)^2 + (X'_d \times I \times \text{Cos} \varphi)^2} = \sqrt{(1 + 0.214 \times 1 \times 0.6)^2 + (0.214 \times 1 \times 0.8)^2}$$

$$E'_Y = \sqrt{1.3026} = 1.1413$$

$$E_Y = \sqrt{(U + X_d \times I \times \text{Sen} \varphi)^2 + (X_d \times I \times \text{Cos} \varphi)^2} = \sqrt{(1 + 2.9 \times 1 \times 0.6)^2 + (2.9 \times 1 \times 0.8)^2}$$

$$E_Y = \sqrt{12.89} = 3.5903$$

As correntes de curto-circuito podem ser determinadas como segue:

$$I''_K = \frac{E''_Y}{X''_d + Z_N} = \frac{1.1021}{0.158 + 0.0} = 6.9751 \text{ pu} \quad I''_K = 6.9751 \times 5165.7 = 36032 \text{ A}$$

$$I'_K = \frac{E'_Y}{X'_d + Z_N} = \frac{1.1413}{0.214 + 0.0} = 5.3332 \text{ pu} \quad I'_K = 5.3332 \times 5165.7 = 27050 \text{ A}$$

$$I_K = \frac{E_Y}{X_d + Z_N} = \frac{3.5903}{2.9 + 0.0} = 1.238 \text{ pu} \quad I_K = 1.238 \times 5165.7 = 6395.3 \text{ A}$$

Aplicando-se os valores na equação seguinte pode-se montar um tabela em uma planilha e obter a curva mostrada na Figura 4.

$$i_{TOTAL(RMS)} = \sqrt{\left[(I''_K - I'_K) \times e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (I'_K - I_K) \times e^{-\frac{t}{\tau'_d}} + I_K \right]^2 + 2 \left(I'_K \times e^{-\frac{t}{\tau_g}} \right)^2}$$

BR6

Painel Compacto SF6 até 36kV
Testado conforme NBR IEC 62271-200



Uso abrigado



Uso ao tempo

G2 SLIM

Painel isolado à AR até 17,5kV
Testado conforme NBR IEC 62271-200



Uso abrigado



Uso ao tempo

BR-POWER

Transformador a seco MT até 36,2kV
Testado conforme NBR 5356



Uso abrigado
(IP00, IP21 e IP23)



Uso ao tempo
(IP54)

PROSE7

Painel de baixa tensão até 1000V
Testado conforme NBR IEC 61439



Uso abrigado



Uso ao tempo



Nova Unidade

BRVAL

Sorocaba-SP

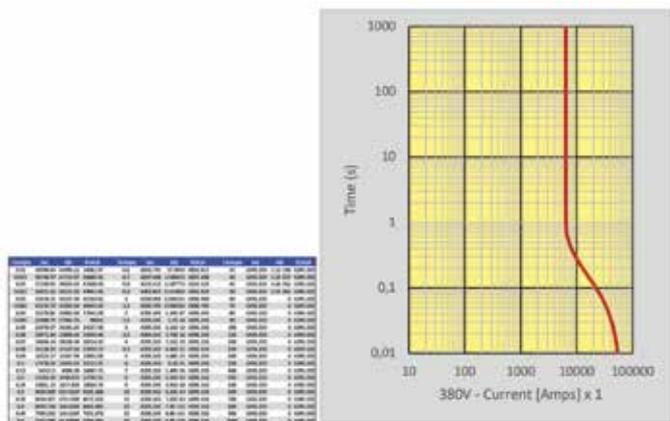


Figura 4 – Curva de decaimento para curto-circuito trifásico a plena carga.

Para a condição à vazio, $E''_Y = E'_Y = E_Y = 1$ e as correntes de curto-circuito podem ser calculadas:

$$I'_{K} = 4.6729 \times 5165.7 = 24139 \text{ A} \quad I_K = 0.3448 \times 5165.7 = 1781.3 \text{ A}$$

$$I''_{K} = 6.3291 \times 5165.7 = 32695 \text{ A}$$

Os resultados das simulações estão na planilha seguinte e a Figura 5 mostra a curva de decaimento à vazio.

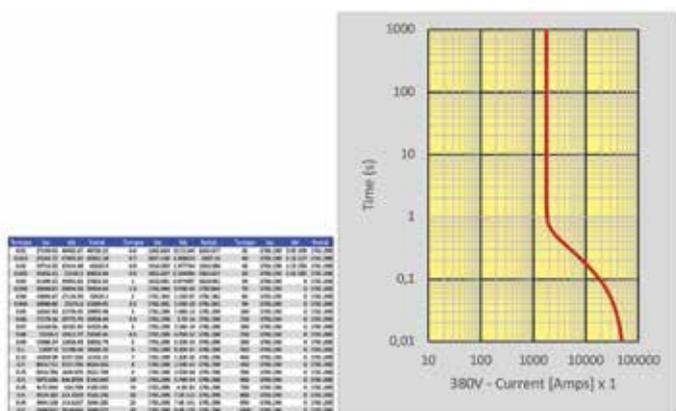


Figura 5 – Curva de decaimento para curto-circuito trifásico à vazio.

Usando agora o software EasyPower, os valores batem com a planilha. Sem forçar o campo e a vazio, a corrente de decaimento do gerador teria a curva de decaimento mostrada na Figura 6. Como pode ser visto, a corrente de curto-circuito permanente (corrente sustentada) está abaixo da corrente nominal do gerador: (1781 A < 5165 A!)

$$E_Y = \sqrt{(U + X_d \times I \times \text{Sen}\phi)^2 + (X_d \times I \times \text{Cos}\phi)^2} = E_Y = \sqrt{(1 + 2.9 \times 1 \times 0.6)^2 + (2.9 \times 1 \times 0.8)^2}$$

$$E_Y = \sqrt{12.89} = 3.59 \quad I_K = \frac{E_Y}{X_d} = \frac{3.59}{2.9} = 1.238 \text{ pu}$$

A corrente de curto-circuito permanente a plena carga será:

$$I_K = I_{K_for_FLA} = 1.238 \times 5165.7 = 6395 \text{ A}$$

A corrente de curto-circuito permanente atinge 23.8% acima da corrente de plena carga (6395 / 5165 * 100).

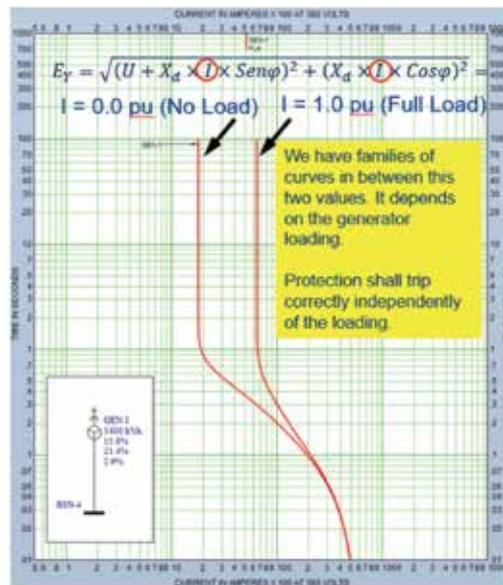


Figura 6 – Corrente de Decremento do Exemplo gerada no software EasyPower.

Ajuste do 'Field Forcing'

Como visto anteriormente, a corrente de curto-circuito permanente de um gerador depende da condição de carga do gerador e esta corrente pode ser menor que sua corrente nominal. Atualmente, os geradores podem ser adquiridos com um sistema que força a corrente de campo e a mantém em um determinado valor, acima da corrente nominal, por um tempo especificado

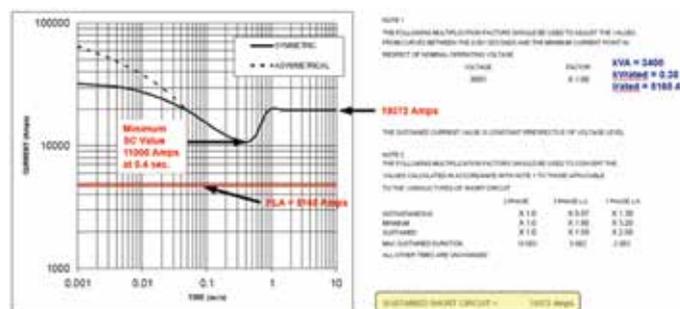


Figura 7 – Curva de decaimento de um gerador com "Field Forcing".

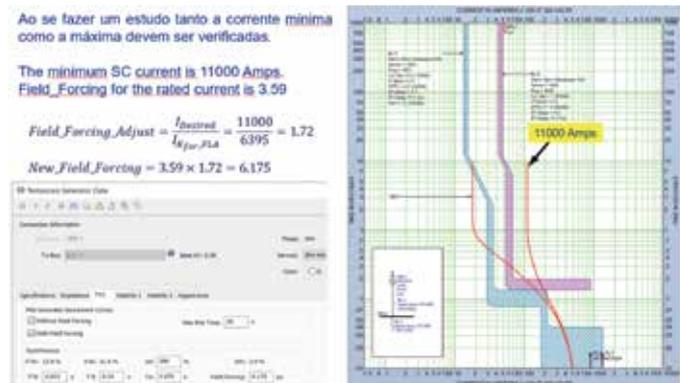


Figura 8 – Verificação se a proteção opera tanto na curva mínima como na máxima.

(normalmente 10s) para um curto-circuito trifásico. A Figura 7 mostra a corrente de decremento de um gerador de um fabricante onde o mesmo possui o "Field Forcing".

A Figura 9 mostra como ajustar o valor do Field Forcing para a corrente máxima que o fabricante do gerador consegue sustentar.

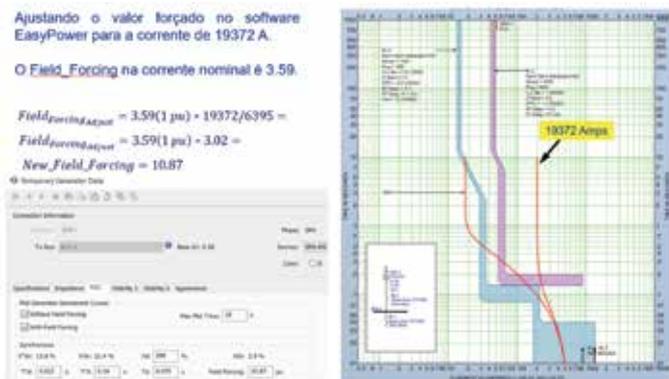


Figura 9 - Ajuste do valor do Field Forcing no software para a corrente máxima que o fabricante do gerador consegue sustentar.

Curva de decremento do gerador para curtos-circuitos em um nível de tensão diferente do gerador

Considere o unifilar da Figura 10. Deve-se sempre verificar se as proteções ainda ficam sensíveis quando o sistema está sendo suprido apenas pelo gerador e o curto-circuito ocorre em nível de tensão diferente de onde está o gerador. Os softwares comerciais não fazem esta tarefa para nós. A seguir está um passo-a-passo de como fazer isso.

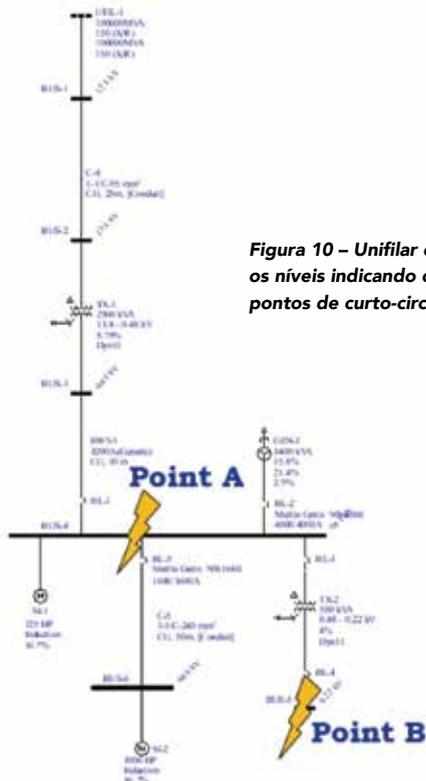


Figura 10 - Unifilar com os níveis indicando os pontos de curto-circuito.

Vamos aplicar uma falta no Ponto B, em 220V. O primeiro passo consiste em se passar todas as impedâncias para a base do gerador.

$$Z_{TR,Base} = Z_{TR} \cdot \frac{MV_{Gerador}}{MV_{Trasformador}}$$

$$Z_{TR,Base} = 4 \cdot \frac{3.4}{0.3} = 4 \cdot 11.33 = 45.33$$

As novas constantes de tempo serão:

$$RN = 11.879091\% \quad XN = 43.749266$$

$$X_d = \frac{X_d + X_q}{X_d + X_q} = \frac{15.8 + 43.749266}{15.8 + 43.749266} = 0.02032 = \frac{59.549266}{65.149266} = 0.02032$$

$$X_q = 0.018573e$$

$$X_d = \frac{X_d + X_q}{X_d + X_q} = \frac{21.4 + 43.749266}{21.4 + 43.749266} = 0.12196 = \frac{65.149266}{333.749266} = 0.12196$$

$$X_q = 0.4142e$$

Essa impedância deve ser adicionada às impedâncias do gerador como segue:

$$X'd(\%) = 15.8$$

$$X'd_{New} = 15.8 + 43.749266 = 59.549266$$

$$X'q(\%) = 21.4$$

$$X'q_{New} = 21.4 + 43.749266 = 65.149266$$

$$X_d(\%) = 290$$

$$X_d_{New} = 290 + 43.749266 = 333.749266$$

Deve-se duplicar o equipamento gerador e substituir as impedâncias acima calculadas no segundo gerador.

Corrigindo as impedâncias e as constantes de tempo, as novas curvas são mostradas na Figura 11.



Figura 11 - Novas curvas de decremento agora para curto-circuito em 220 V.

Como pode ser observado a curva de decremento a vazio (curva azul à esquerda), fica no limiar de sensibilidade da proteção.