

Figura 4.1 - Circuito para determinação da seqüência de fases

Exercício 4.2

No circuito da Figura 4.2, quando ocorre um defeito fase-terra franco na barra P, pede-se determinar:

- a corrente de defeito;
- as tensões na barra P;
- as tensões na barra Q.

Dados:

- gerador: 13,8 kV ; 10 MVA ; $x = 2\%$; $Z_{at} = 0,1 \Omega$;
- linha: 2 km ; $Z_1 = (0,2 + j0,4) \Omega/\text{km}$; $Z_0 = (0,6 + j1,2) \Omega/\text{km}$.

Resposta:

- $\dot{I}_A = 4,2420 \angle -65,9^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0$; $\dot{I}_C = 0$
- $\dot{V}_{AN} = 0$; $\dot{V}_{BN} = 9,2542 \angle -136,2^\circ \text{ kV}$; $\dot{V}_{CN} = 9,9752 \angle 132,1^\circ \text{ kV}$
- $\dot{V}_{AN} = 6,3222 \angle -2,4^\circ \text{ kV}$; $\dot{V}_{BN} = 7,7220 \angle -122,6^\circ \text{ kV}$; $\dot{V}_{CN} = 8,3961 \angle 119,7^\circ \text{ kV}$

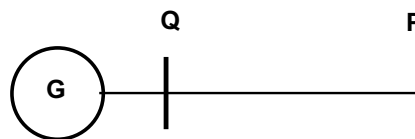


Figura 4.2

Exercício 4.3

Um transformador trifásico possui o primário ligado em triângulo e o secundário ligado em estrela aterrada por resistor. O primário é alimentado por tensão nominal quando ocorre um curto-circuito fase-terra franco no secundário. Nessas condições, pede-se, **sem utilizar componentes simétricas**:

- as correntes no secundário (módulo em kA e ângulo em $^{\circ}$);
- as correntes de fase e de linha no primário (módulo em kA e ângulo em $^{\circ}$);
- as tensões de fase e de linha no secundário (módulo em kV e ângulo em $^{\circ}$).

Dados:

- transformador 138 kV : 13,8 kV , 10 MVA , $x = 5\%$, resistência de aterramento do centro estrela igual a $0,5 \Omega$;
- o primário do transformador é alimentado por barramento infinito.

Resposta:

- $\dot{I}_A = 7,4082 \angle -62,30^{\circ} \text{ kA} ; \dot{I}_B = 0 ; \dot{I}_C = 0 ;$
- $\dot{I}_{AB} = 0,4277 \angle -62,30^{\circ} \text{ kA} ; \dot{I}_{BC} = 0 ; \dot{I}_{CA} = 0 ;$
 $\dot{I}_A = 0,4277 \angle -62,30^{\circ} \text{ kA} ; \dot{I}_B = 0,4277 \angle 117,70^{\circ} \text{ kA} ; \dot{I}_C = 0 ;$
- $\dot{V}_{AN} = \dot{V}_{AA'} + \dot{V}_{A'N'} + \dot{V}_{N'N} = 0$ (a-b-c: terminais externos do transformador ; a'-b'-c': pontos localizados entre as bobinas do secundário e as reatâncias dos enrolamentos ; n: referência de tensões do sistema ; n': centro estrela do secundário) ;
 $\dot{V}_{BN} = \dot{V}_{B'N'} + \dot{V}_{N'N} = 6,7575 \angle -147,60^{\circ} \text{ kV} ;$
 $\dot{V}_{CN} = \dot{V}_{C'N'} + \dot{V}_{N'N} = 11,6695 \angle -119,27^{\circ} \text{ kV} ;$
 $\dot{V}_{AB} = 6,7575 \angle 32,40^{\circ} \text{ kV} ; \dot{V}_{BC} = 13,8 \angle -90,00^{\circ} \text{ kV} ; \dot{V}_{CA} = 11,6695 \angle 119,27^{\circ} \text{ kV} .$

Exercício 4.4

Repetir o exercício anterior utilizando componentes simétricas e potência de base igual a 100 MVA.

Exercício 4.5

Um transformador trifásico ligado em ΔY aterrado (aterramento franco) é alimentado no primário por uma barra na qual a potência de curto-circuito trifásico vale 400 MVA e a de curto-circuito fase-terra vale 300 MVA. Em determinado momento ocorre um curto-circuito fase-terra no secundário do transformador, com impedância de defeito igual a 2Ω . Nestas condições, pede-se determinar:

- diagramas seqüenciais do transformador, não esquecendo de indicar claramente as barras referentes aos enrolamentos primário e o secundário;
- correntes (módulo em kA e ângulo em $^{\circ}$) no primário e no secundário.

Dados do transformador: 138 kV / 13,8 kV ; 50 MVA ; $x = 4\%$.

Resposta:

b) Primário: Linha: $\dot{I}_A = 0,2239|_{-13,22^\circ} \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0,2239|_{166,78^\circ} \text{ kA}$; $\dot{I}_C = 0$

Fase: $\dot{I}_{AB} = 0,2239|_{-13,22^\circ} \text{ kA}$; $\dot{I}_{BC} = 0$; $\dot{I}_{CA} = 0$

Secundário: $\dot{I}_A = 3,8783|_{-13,22^\circ} \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0$; $\dot{I}_C = 0$

Exercício 4.6

No transformador do exercício anterior, determinar o valor da resistência de aterramento do centro estrela do transformador (em Ω) de forma que a corrente de defeito resulte reduzida à metade do valor original.

Resposta:

2,076 Ω

Exercício 4.7

No circuito da Figura 4.3 pede-se determinar, adotando potência de base igual a 100 MVA:

- os diagramas seqüenciais em pu associados ao circuito;
- as correntes de defeito (em kA) para defeitos trifásico e fase-terra franco na barra 04;
- a tensão nas fases sãs da barra 04 para o defeito fase-terra;
- as correntes de defeito (em kA) para defeitos trifásico e fase-terra franco na barra 03;
- a tensão nas fases sãs da barra 03 para o defeito fase-terra.

Dados:

- Transformador T1: 88 kV : 13,8 kV, 30 MVA, $x = 4\%$, ligação ΔY aterrado;
- Transformador T2: 13,8 kV : 0,22 kV, 1 MVA, $x = 3\%$, ligação Y isolado - Y aterrado;
- Linha 02-03: 10 km;
 $z1 = (0,2 + j0,4) \Omega/\text{km}$;
 $z0 = (0,6 + j1,2) \Omega/\text{km}$.
- Pot. de curto-circuito trifásico na barra 01: 500 MVAr;
- Pot. de curto-circuito fase-terra na barra 01: 350 MVAr.

Resposta:

b) $I_{\phi T} = 0$

d) $I_{\phi T} = 1,007 \text{ kA}$

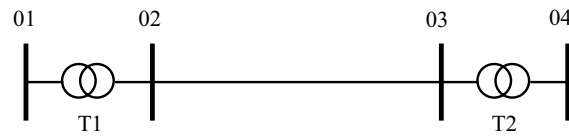


Figura 4.3

Exercício 4.8

No circuito da Figura 4.4 sabe-se que o sistema operava em vazio com tensão de 240 kV na barra 3 quando um defeito dupla fase-terra (franco) ocorreu na mesma barra. Nestas condições, pede-se determinar:

- os diagramas seqüenciais do sistema, indicando claramente todas as barras (utilizar os seguintes valores de base na barra 1: 13,8 kV e 100 MVA);
- corrente (em kA) que flui para a terra no ponto de defeito;
- corrente (em kA) que flui nos aterramentos dos transformadores.

Dados:

- geradores: 13,2 kV ; 100 MVA ; $x_1 = 25\%$; $x_0 = 15\%$; ligação estrela aterrado;
- Transformador T₁: banco de 3 monofásicos ligados em ΔY aterrado; dados das unidades: 13,8 kV / 127 kV ; 30 MVA ; $x = 8\%$;
- Transformador T₂: trifásico ligado em Y aterrado -Y isolado; 220 kV / 13,8 kV ; 100 MVA ;
 $x_0 = x_1 = 8\%$; resistência de aterramento igual a 100 Ω ;
- linha: $X_1 = 30 \Omega$; $X_0 = 50 \Omega$.

Resposta:

- 1,5488 kA
- T₁: 1,5488 kA ; T₂: 0

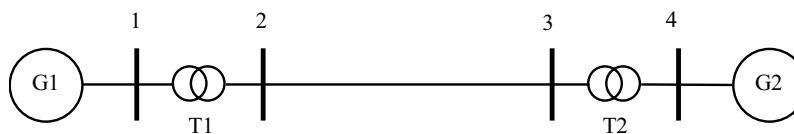


Figura 4.4

Exercício 4.9

No sistema representado na Figura 4.5 pede-se determinar, quando da ocorrência de um defeito fase-terra na barra R (utilizando potência de base igual a 100 MVA):

- a corrente no ponto de defeito, em A;
- a contribuição do sistema equivalente para o defeito (corrente nas 3 fases e na terra, em A);
- a corrente nos enrolamentos do transformador, em A;
- a corrente nos enrolamentos do gerador, em A.

Dados:

- gerador: 13,8 kV ; 20 MVA ; $z_0 = z_1 = j0,1$ pu ; operando em tensão nominal antes do defeito ; ligação Y aterrada;
- transformador: trifásico ; 13,8 kV / 34,5 kV ; 30 MVA ; $z_0 = z_1 = j0,03$ pu ; ligação Δ -Y aterrada;
- linhas Q-R e R-S: cada uma com 2 km ; $Z_1 = (0,1 + j0,3)$ Ω /km ; $Z_0 = (0,3 + j0,9)$ Ω /km;
- sistema equivalente: operando em tensão nominal antes do defeito ; $z_1 = j0,3333$ pu ; $z_0 = j0,8333$ pu.

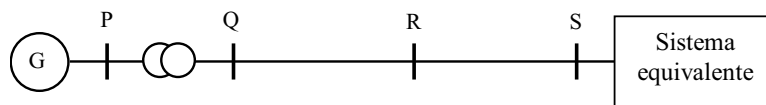


Figura 4.5

Exercício 4.10

No circuito da Figura 4.6 pede-se determinar, adotando potência de base igual a 100 MVA:

- os diagramas seqüenciais do sistema;
- a tensão em pu (módulo e ângulo) em todas as barras do sistema;
- o gerador equivalente de Thévenin visto pela barra 03 (para as 3 seqüências);
- tensões e correntes em cada fase (valores não normalizados) em toda a rede quando uma carga monofásica de $j346 \Omega$ é conectada entre a fase A da barra 03 e a terra.

Dados:

- gerador: barramento infinito com tensão de linha igual a 220 kV;
- linha 01-02: $\bar{z}_1 = j0,2$ pu ; $\bar{z}_0 = j0,5$ pu (bases 220 kV e 100 MVA);
- linha 02-03: $\bar{z}_1 = j0,3$ pu ; $\bar{z}_0 = j0,8$ pu (bases 220 kV e 100 MVA);
- transformador 02-04: banco de 3 transformadores monofásicos com os seguintes dados: 127 kV / 88 kV ; 20 MVA ; $x = 0,09$ pu ; ligação Y aterrado (02) - Δ (04);
- carga na barra 04: trifásica equilibrada, ligação Δ , absorve 82,6 MVA quando alimentada por tensão de 80 kV , impedância constante.

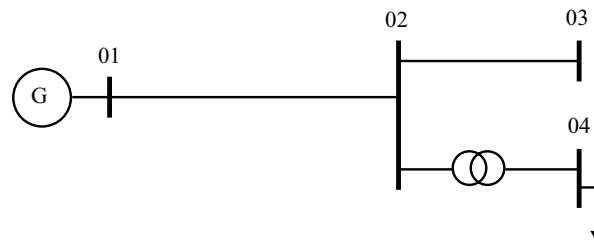


Figura 4.6

Exercício 4.11

Um gerador trifásico simétrico alimenta um circuito trifásico equilibrado. O sistema se encontra operando em vazio quando um defeito dupla fase-terra ocorre na extremidade do circuito (extremidade oposta à do gerador). Neste defeito, a fase B resulta ligada à terra através de uma resistência de 3Ω e a fase C resulta ligada à terra através de uma resistência também de 3Ω . Nestas condições, pede-se:

- desenhar o diagrama trifilar do sistema em sua condição de defeito;
- determinar todas as correntes resultantes (módulo em A e ângulo em $^\circ$) utilizando o diagrama trifilar do item anterior e um método de análise de circuitos à sua escolha (não utilize componentes simétricas!);
- desenhe os diagramas seqüenciais em pu, indicando claramente as barras do sistema;
- determine todas as correntes resultantes (módulo em A e ângulo em $^\circ$) interligando adequadamente os diagramas seqüenciais. Compare os resultados obtidos com os do item (b).

Dados:

- gerador ligado em Y aterrada, tensão de linha igual a 220 V;
- resistência de aterramento do gerador: 2Ω ;
- resistência por fase do circuito: 1Ω .

Resposta:

$$\text{b) e d): } \dot{I}_A = 0 ; \dot{I}_B = 28,619 \angle -106,1^\circ \text{ A} ; \dot{I}_C = 28,619 \angle 106,1^\circ \text{ A}$$

Exercício 4.12

Um transformador trifásico ligado em ΔY aterrado é alimentado no primário por uma barra na qual a potência de curto-circuito trifásico vale 200 MVar e a de curto-circuito fase-terra vale 150 MVar. No enrolamento secundário estão ligadas as seguintes cargas:

- impedância igual a $j200 \Omega$ entre os pontos B e N $'$;
- impedância igual a $j200 \Omega$ entre os pontos C e N $'$;
- impedância igual a $j400 \Omega$ entre os pontos N $'$ e terra.

Pede-se determinar, adotando potência de base igual a 100 MVA:

- diagramas seqüenciais do sistema completo;
- correntes de linha (em kA) e tensões de fase e de linha (em kV) no enrolamento secundário do transformador;
- correntes de fase e de linha (em kA) e tensões de linha (em kV) no enrolamento primário.

Dados do transformador: 230 kV / 34,5 kV ; 150 MVA ; $x = 5\%$.

Exercício 4.13

Para a rede da Figura 4.7, com qual ligação do terciário de T1 (triângulo, estrela isolada ou estrela solidamente aterrada) ocorrerá a maior corrente de curto-circuito fase-terra na barra 4? Os enrolamentos primário e secundário do transformador T1 estão na ligação estrela aterrada, e a ligação do transformador T2 é triângulo (barra 4) - estrela aterrada (barra 5). Sugestão: desenhe os diagramas seqüenciais interconectados nos 3 casos.

Resposta: Ligação triângulo

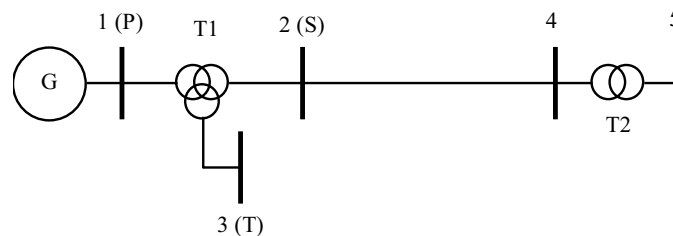


Figura 4.7

Exercício 4.14

No sistema de potência representado na Figura 4.8, em determinado momento um defeito fase-terra com resistência de defeito igual a 10Ω ocorre na barra 3. Nestas condições pede-se determinar, adotando potência de base igual a 100 MVA:

- a corrente no ponto de defeito;
- as correntes que circulam nas linhas 2-3 e 3-4;
- as correntes nos enrolamentos dos transformadores T1 e T2;
- as correntes nos enrolamentos do gerador.

Dados:

- gerador: trifásico, 20 kV, 100 MVA, $z_0 = j0,20 \text{ pu}$, $z_1 = j0,15 \text{ pu}$;
- transformador T1: banco de transformadores monofásicos, cada um com os seguintes dados: 20 kV / 127 kV, 30 MVA, $z_{cc} = j0,03 \text{ pu}$;

- linhas de transmissão 2-3 e 3-4: cada uma com 50 km, $Z_1 = j0,43 \Omega/\text{km}$, $Z_0 = j0,86 \Omega/\text{km}$;
- transformador T2: banco de transformadores monofásicos de 3 enrolamentos, cada um com os seguintes dados: 127 kV (barra 4) / 79,6 kV (barra 5) / 13,8 kV (barra 6), 15 MVA. Os circuitos de seqüência direta e zero do banco são fornecidos nas Figuras 4.9 e 4.10.

Resposta:

- a) $\dot{I}_{Def} = 1,2601 | -60^\circ \text{ kA}$
- b) Linha 2-3: $\dot{I}_A = 1,2095 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0,0505 | 120^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_C = 0,0505 | 120^\circ \text{ kA}$
 Linha 3-4: $\dot{I}_A = 0,0508 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0,0508 | -60^\circ \text{ kA}$;
 $\dot{I}_C = 0,0508 | -60^\circ \text{ kA}$
- c) Trafo T1: Primário: $\dot{I}_{AB} = 7,6803 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_{BC} = 0,3207 | 120^\circ \text{ kA}$;
 $\dot{I}_{CA} = 0,3207 | 120^\circ \text{ kA}$
 Secundário: $\dot{I}_A = 1,2095 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0,0505 | 120^\circ \text{ kA}$;
 $\dot{I}_C = 0,0505 | 120^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_{Aterr} = 1,1085 | -60^\circ \text{ kA}$
- Trafo T2: Primário (4): $\dot{I}_A = 0,0508 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 0,0508 | -60^\circ \text{ kA}$;
 $\dot{I}_C = 0,0508 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_{Aterr} = 0,1524 | -60^\circ \text{ kA}$
 Secundário (5): $\dot{I}_A = 0$; $\dot{I}_B = 0$; $\dot{I}_C = 0$
 Terciário (6): $\dot{I}_{AB} = 0,4675 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_{BC} = 0,4675 | -60^\circ \text{ kA}$;
 $\dot{I}_{CA} = 0,4675 | -60^\circ \text{ kA}$
- d) Gerador: $\dot{I}_A = 8,0010 | -60^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_B = 8,0010 | 120^\circ \text{ kA}$; $\dot{I}_C = 0$; $\dot{I}_{Aterr} = 0$

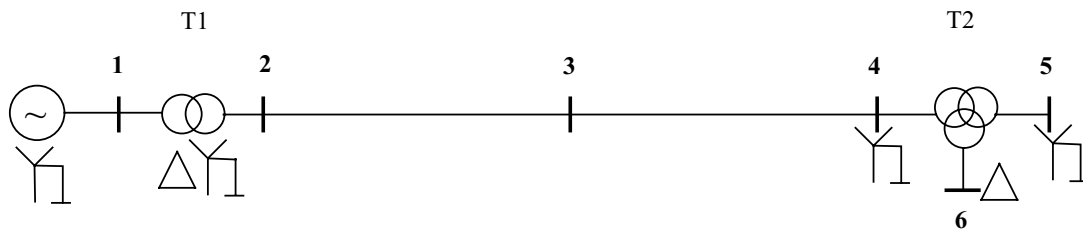


Figura 4.8

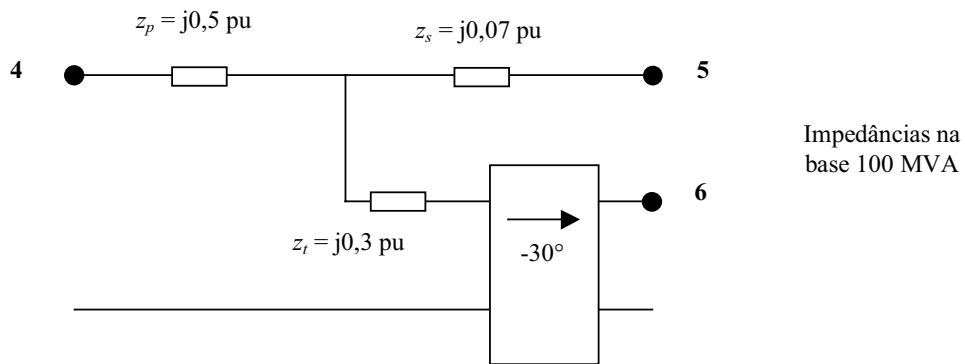


Figura 4.9 - Circuito de seqüência direta para o banco de transformadores de 3 enrolamentos

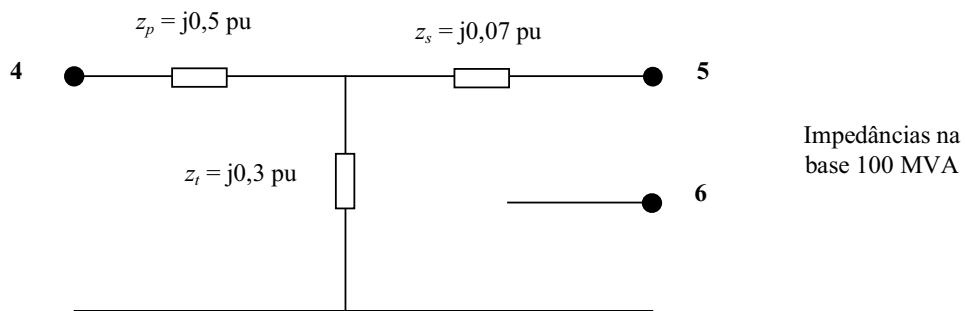


Figura 4.10 - Circuito de seqüência zero para o banco de transformadores de 3 enrolamentos