

Redes Trifásicas Desequilibradas

Sistemas Eléctricos de Potencia
3ºC, I.E.M

Ignacio Rafael Pastor Escribano

Guillermo José Mairal Zuera

Santiago López López

Javier Miñarro Mena

Pedro Pardo Posadas

Ignacio Sanz Soriano

Grupo C4

9 de abril de 2016

Índice

Índice de figuras	1
1. Circuitos Secuenciales	4
1.1. Dipolos de <i>Thevenin</i> Equivalentes	5
1.1.1. Código <i>Matlab</i>	5
1.1.2. Parámetros de los Dipolos Equivalentes	7
2. Falta Franca Fase-Tierra	7
2.1. Circuito Equivalente de la Falta Fase-Tierra	8
2.2. Resultados	8
2.2.1. Código <i>Matlab</i>	8
2.2.2. Resultados Numéricos	10
3. Falta Fase-Fase	11
3.1. Circuito Equivalente de la Falta Fase-Fase	11
3.2. Resultados	12
3.2.1. Código <i>Matlab</i>	12
3.2.2. Resultados Numéricos	13
4. Falta Fase-Fase-Tierra	15
4.1. Circuito Equivalente de la Falta Fase-Tierra	15
4.2. Resultados	15
4.2.1. Código <i>Matlab</i>	15
4.2.2. Resultados Numéricos	17
Referencias	18

Índice de figuras

1. Secuencia Directa (1)	5
2. Secuencia Inversa (2)	5
3. Secuencia Homopolar (O)	5
4. Dipolo de Thévenin Equivalente S. Directa (1)	7
5. Dipolo de Thévenin Equivalente S. Inversa (2)	7
6. Dipolo de Thévenin Equivalente S. Homopolar (O)	7

Enunciado

La red de la figura presenta el esquema de evacuación de una central que cuenta con dos grupos de generación. En el momento anterior a la falta, ambas máquinas presentan tensión de vacío nominal y la red infinita se encuentra a 390kV. Se considera además que todos los grupos presentan ángulo cero (con la conveniente corrección debida a su transformador). Los datos de la red son los siguientes:

- **ALTERNADOR a):** 300 MVA, 35 kV; $z_{g1} = j0,3 p.u.$, $z_{g2} = j0,2 p.u.$, $z_{g0} = j0,06 p.u.$; $Z_n = j1,5 \Omega$.
- **TRANSFORMADOR a):** 300 MVA, 395/35 kV, YNd5; $z_{cc} = j0,13 p.u.$
- **ALTERNADOR b):** 200 MVA, 20 kV; $z_{g1} = j0,2 p.u.$, $z_{g2} = j0,1 p.u.$, $z_{g0} = j0,04 p.u.$; $Z_n = 0 \Omega$.
- **TRANSFORMADOR b):** 200 MVA, 410/20 kV, YNyn0; $z_{cc} = j0,15 p.u.$
- **LÍNEA:**

Grupo	C1	E1	C2	E2	C3	E3	C4	E4	C5	E5	C6
$\chi_1 [\Omega]$	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270
$\chi_0 [\Omega]$	200	257	314	371	429	486	543	600	657	714	771

Cuadro 1: Valores de las Impedancias de Línea

La elección de las bases es libre, aunque se recomienda usar 100 MVA y 400/35/20 kV. Considerando que las faltas se producen en el lado de alta de los transformadores (punto **F**), obtener las siguientes magnitudes:

1. Intensidades de avería (kA).
2. Intensidades que SALEN de la red infinita y de ambos transformadores en alta (kA).
3. Intensidades de los alternadores (kA).
4. Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la red infinita (kA).
5. Tensiones en el punto de la avería (kV).
6. Tensiones en bornes de los alternadores (kV).

Para los siguientes supuestos:

1. Falta franca fase-tierra
2. Falta franca fase-fase
3. Falta franca fase-fase-tierra

Se pide comparar entre las tres faltas cómo afectan estas a los generadores y los transformadores.

Datos del problema (*Matlab*)

```

% La red de la figura presenta el esquema de evacuacion de una central que cuenta
% con dos grupos de
% generacion. En el momento anterior a la falta, ambas maquinas presentan tension
% de vacio nominal
% y la red infinita se encuentra a 390kV. Se considera ademas que todos los grupos
% presentan angulo
% cero (con la conveniente correccion debida a su transformador).
% Los datos de la red son los siguientes:
% ALTERNADOR a: 300 MVA, 35 kV; zg1 = j0.3 p.u., zg2 = j0.2 p.u., zg0 = j0.06 p.u
% .; ZN = j1.5 ?
% TRANSFORMADOR a: 300 MVA, 395/35 kV, YNd5; zcc = j0.13 p.u.
% ALTERNADOR b: 200 MVA, 20 kV; zg1 = j0.2 p.u., zg2 = j0.1 p.u., zg0 = j0.04 p.u
% .; ZN = 0.0 ?
% TRANSFORMADOR b: 200 MVA, 410/20 kV, YNyn0; zcc = j0.15 p.u.
% LINEA: Xl=190, X0=543.
% Falta franca fase-tierra
% a) Intensidades de averia (kA)
% b) Intensidades que SALEN de la red infinita y de ambos transformadores en alta
% (kA)
% c) Intensidades de los alternadores (kA)
% d) Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la
% red infinita (kA)
% e) Tensiones en el punto de la averia (kV)
% f) Tensiones en bornes de los alternadores (kV)

j = sqrt(-1) ;

a = exp(j*2*pi/3) ;

A = [
    [ 1   1   1 ] ;
    [ 1  a*a  a ] ;
    [ 1   a  a*a ] ;
    ] ;
invA = inv(A) ;

%% 1. Magnitudes Base del Problema
SB=100/3; %MVA
UB=[400 35 20]/sqrt(3); %KV
IB=SB./UB; %KA
ZB=UB./IB; %ohmio

tB_1=UB(2)/UB(1);
tB_2=UB(3)/UB(1);

%% 2. Alternador 1
Sg1=300/3;
Ug1=35/sqrt(3);

zg1_G1 = j*0.3;  zg1_1 = zg1_G1*(Ug1*Ug1/Sg1)/ZB(2);
zg2_G1 = j*0.2;  zg2_1 = zg2_G1*(Ug1*Ug1/Sg1)/ZB(2);
zg0_G1 = j*0.06; zg0_1 = zg0_G1*(Ug1*Ug1/Sg1)/ZB(2);
zN_G1 = j*1.5;   zN_1 = zN_G1*(Ug1*Ug1/Sg1)/ZB(2);

%% 3. Transformador 1 (YNd5)
St1=300/3;
Ut1=[35 395]/sqrt(3);
zcc1.t1=j*0.13; zcc1=zcc1.t1*(Ut1(2)*Ut1(2)/St1)/ZB(1); %lado de Alta

t_1 = (Ut1(1)/Ut1(2))/tB_1; % en el lado de BAJA
t0_1 = t_1 ;
t1_1 = t_1*exp(-j*150*pi/180);
t2_1 = t_1*exp(j*150*pi/180);

```

```

O12.t1 = [ t0_1 ; t1_1 ; t2_1 ];

%% 4. Alternador 2
Sg2=200/3;
Ug2=20/sqrt(3);

zg1_G2 = j*0.2;  zg1_2 = zg1_G2*(Ug2*Ug2/Sg2)/ZB(3);
zg2_G2 = j*0.1;  zg2_2 = zg2_G2*(Ug2*Ug2/Sg2)/ZB(3);
zg0_G2 = j*0.04; zg0_2 = zg0_G2*(Ug2*Ug2/Sg2)/ZB(3);
zN_G2 = j*0;      zgN_2 = zN_G2*(Ug2*Ug2/Sg2)/ZB(3);

%% 5. Transformador 2 (YNy0)
St2=200/3;
Ut2=[20 410]/sqrt(3);
zcc2.t2=j*0.15; zcc_2=zcc2.t2*(Ut2(2)*Ut2(2)/St2)/ZB(1); %lado de Alta

t_2 = (Ut2(1)/Ut2(2))/tB_2; % en el lado de BAJA
t0_2 = t_2;
t1_2 = t_2*exp(j*0*pi/180);
t2_2 = t_2*exp(-j*0*pi/180);
O12.t2 = [ t0_2 ; t1_2 ; t2_2 ];

%% 6. Linea:
Xl=j*190; %ohmios
X0=j*543; %ohmios

z1_linea=Xl/ZB(1);
z2_linea=z1_linea;
z0_linea=X0/ZB(1);

%% 7. Red:
Uinf=390/sqrt(3);
uinf=Uinf/UB(1);

```

1. Circuitos Secuenciales

Descomponemos una terna trifásica (***RST***) en componentes de secuencia (***012***), utilizando la inversa de la matriz de transformación $[\mathbf{A}]^{-1}$, que se define como:

$$\begin{pmatrix} X_O \\ X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{pmatrix} \quad (1)$$

Aplicando esto a los elementos de la red, los generadores y los transformadores, se nos quedan tres circuitos secuenciales equivalentes.

Una vez resueltos los circuitos secuenciales, para llevar esas componentes de secuencia a su equivalente en el sistema trifásico, usaremos la matriz $[\mathbf{A}]$, de la forma:

$$\begin{pmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Asumiendo la simetría de secuencia, obtenemos unos circuitos que modelan nuestra red en **Componentes de Secuencia**:

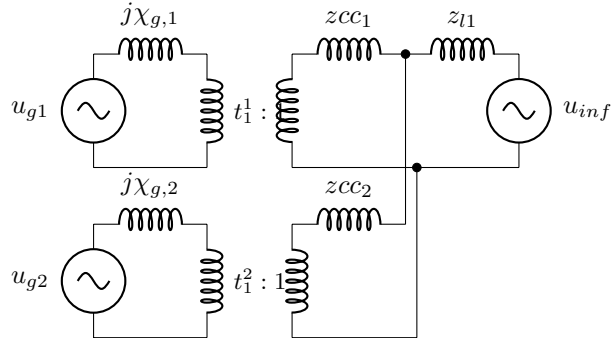


Figura 1: Secuencia Directa (1)

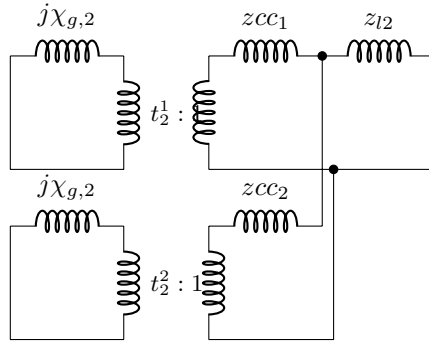


Figura 2: Secuencia Inversa (2)

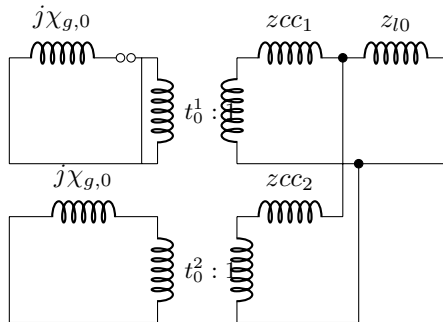


Figura 3: Secuencia Homopolar (0)

1.1. Dipolos de *Thevenin* Equivalentes

1.1.1. Código *Matlab*

```
%%0.Circuitos equivalentes de Thevenin en el punto F.
%%%Secuencia Directa (1)
```

```

%% %% %Generador1 en alta
Ug1_alta = Ug1/UB(2)/O12.t1(2);
zgL1_alta = zgL1/O12.t1(1)^2;
%% %% %Generador 2 en alta
Ug2_alta = Ug2/UB(3)/O12.t2(2);
zgL2_alta = zgL2/O12.t2(1)^2;
%% %% %Zthevenin
zth1_1.izq = zcc.1+zgL1_alta;
zth1_2.izq = zcc.2+zgL2_alta;
zth1_der = z1_linea;
zth1_v = [zth1_1.izq zth1_2.izq zth1_der];
%% %% %Ethevenin
eth1_1.izq = Ug1_alta;
eth1_2.izq = Ug2_alta;
eth1_der = uinf;
eth1 = [eth1_1.izq eth1_2.izq eth1_der];
%% %% %Vthevenin
vth1 = eth1(1)*(paralelo(zth1_v(2),zth1_v(3)))/(paralelo(zth1_v(2),zth1_v(3))+
    zth1_v(1));
vth2 = eth1(2)*(paralelo(zth1_v(1),zth1_v(3)))/(paralelo(zth1_v(1),zth1_v(3))+
    zth1_v(2));
vth3 = eth1(3)*(paralelo(zth1_v(2),zth1_v(1)))/(paralelo(zth1_v(2),zth1_v(1))+
    zth1_v(3));
vth_total = vth1+vth2+vth3;

%% %% %Equivalente thevenin del conjunto
zth1_total = paralelo(paralelo(zth1_v(1),zth1_v(2)),zth1_v(3));
eth1_total = vth_total;

%% %% %Secuencia Inversa (2)
%% %% %Generador1 + Trafo1
zth2_1.izq = zcc.1+zg2_1/O12.t1(1)^2;
zth2_der = z1_linea;

%% %% %Generador2 + Trafo2
zth2_2.izq = zcc.2+zg2_2/O12.t2(1)^2;

%% %% %Equivalente thevenin del conjunto
zth2_v = [zth2_1.izq zth2_2.izq zth2_der];
zth2_total = paralelo(paralelo(zth2_v(1),zth2_v(2)),zth2_v(3));

%% %% %Secuencia Homopolar (0)
%% %% %Generador1 + Trafo1
zth0_1.izq = zcc.1;
zth0_der = z0_linea;

%% %% %Generador2 + Trafo2
zth0_2.izq = zcc.2+zg0_2/O12.t2(1)^2;

%% %% %Equivalente thevenin del conjunto
zth0_v = [zth0_1.izq zth0_2.izq zth0_der];
zth0_total = paralelo(paralelo(zth0_v(1),zth0_v(2)),zth0_v(3));

```

1.1.2. Parámetros de los Dipolos Equivalentes

Los Dipolos de Thévenin equivalentes son:

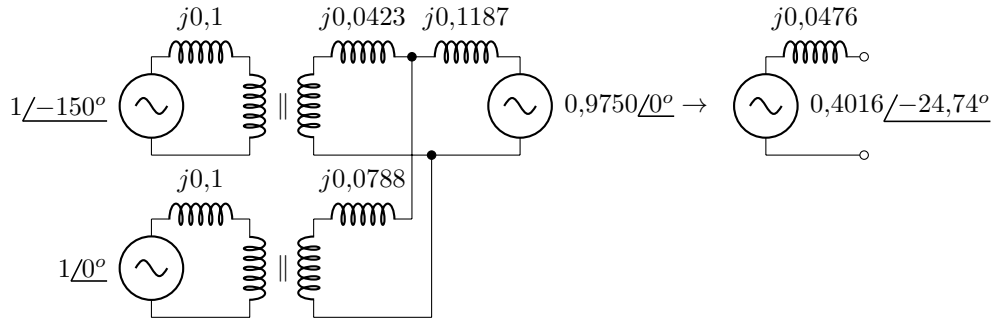


Figura 4: Dipolo de Thévenin Equivalente S. Directa (1)

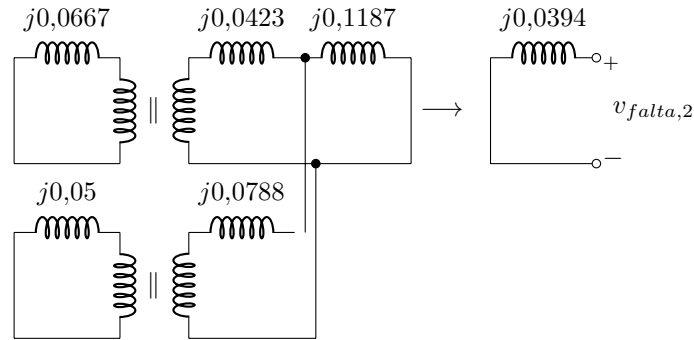


Figura 5: Dipolo de Thévenin Equivalente S. Inversa (2)

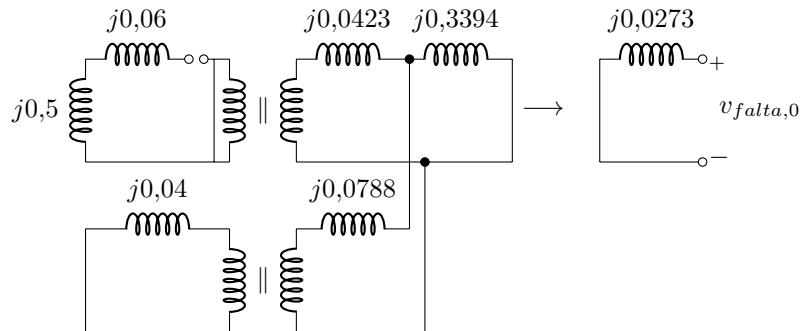
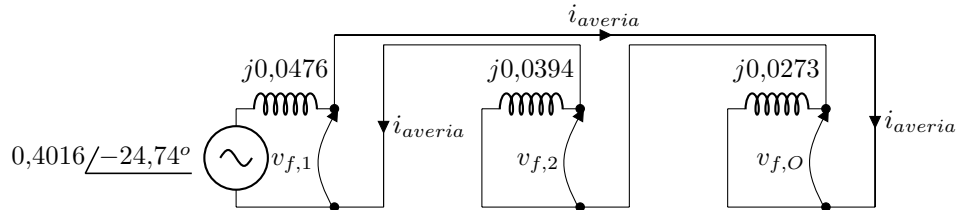


Figura 6: Dipolo de Thévenin Equivalente S. Homopolar (O)

2. Falta Franca Fase-Tierra

Después de obtener los Thevenin's equivalentes en el punto de la falta, y después de analizar las corrientes de avería hemos de retroceder al circuito original en componentes de secuencia para responder a todos los apartados del problema.

2.1. Circuito Equivalente de la Falt Fase-Tierra



Una vez resuelto este circuito, calculando la i_{averia} podremos hallar el resto de apartados del problema. Para ello se emplearán las condiciones de contorno que caracterizan a este tipo de faltas:

$$I_0^f = I_1^f = I_2^f$$

$$V_0^f + V_1^f + V_2^f = (3Z^f) \cdot I_0^f$$

2.2. Resultados

2.2.1. Código Matlab

```
%% 1. Falt Franca Fase-Tierra
disp('%% 1. Falt Franca Fase-Tierra');
%% a) Intensidad de Averia
i_averia = eth1.total/(zth0.total+zth1.total+zth2.total);
i_av_012 = [i_averia; i_averia; i_averia];
rst_i_averia = A*i_av_012*IB(1);

disp('a) Intensidades de averia (kA y grados)');
disp( [ abs(rst_i_averia) 180*angle(rst_i_averia)/pi ] )

%% b) Intensidades que SALEN de la red infinita y de ambos trafos en alta.
%%% Homopolar.
% i_red_0 = i_averia*(paralelo(zth0_v(1),zth0_v(2))/paralelo(zth0_v(1),zth0_v(2))+
%       zth0_v(3));
% Vfalta_0 = -i_red_0*zth0_v(3);
Vfalta_0 = -i_averia*zth0.total;
i_red_0=-Vfalta_0/zth0.der;

i_alta_0 = i_averia-i_red_0;
i_alta_0_1 = -Vfalta_0/zth0.1.izq;
i_alta_0_2 = -Vfalta_0/zth0.2.izq;

%%% Inversa
% i_red_2 = i_averia*(paralelo(zth2_v(1),zth2_v(2))/paralelo(zth2_v(1),zth2_v(2))+
%       zth2_v(3));
% Vfalta_2 = -i_averia*zth2.total;
Vfalta_2 = -i_averia*zth2.total;
i_red_2=-Vfalta_2/zth2.der;

i_alta_2 = i_averia-i_red_2;
i_alta_2_1 = -Vfalta_2/zth2.1.izq;
i_alta_2_2 = -Vfalta_2/zth2.1.izq;

%%% Directa
Vfalta_1 = -Vfalta_2-Vfalta_0;
i_red_1=(uinf-Vfalta_1)/zth1.der;

i_alta_1 = i_averia-i_red_1;
i_alta_1_1 = (eth1.1.izq-Vfalta_1)/zth1.1.izq;
i_alta_1_2 = (eth1.2.izq-Vfalta_1)/zth1.2.izq;
```

```

%%b.1) Intensidades de Red
O12.i.red = [i.red.0; i.red.1; i.red.2];
rst.i.red = A*O12.i.red*IB(1);

disp('b.1) Intensidades que SALEN de la Red (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.red) 180*angle(rst.i.red)/pi ] )

%%b.2) Intensidades que Salen del trafa de alta en los trafos t1 y t2.
O12.i.alta.t1 = [i.alta.0.1;i.alta.1.1;i.alta.2.1];
O12.i.alta.t2 = [i.alta.0.2;i.alta.1.2;i.alta.2.2];
rst.i.alta.t1 = A*O12.i.alta.t1*IB(1);
rst.i.alta.t2 = A*O12.i.alta.t2*IB(1);

disp('b.2.1) Intensidades de alta en el Transformador 1 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.alta.t1) 180*angle(rst.i.alta.t1)/pi ] )
disp('b.2.2) Intensidades de alta en el Transformador 2 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.alta.t2) 180*angle(rst.i.alta.t2)/pi ] )

%% c) Intensidades de los alternadores.
O12.i.generador.1 = O12.i.alta.t1./conj(O12.t1);
rst.i.generador.1 = A*O12.i.generador.1*IB(2);

O12.i.generador.2 = O12.i.alta.t2./conj(O12.t2);
rst.i.generador.2 = A*O12.i.generador.2*IB(3);

disp('c.1) Intensidades que salen del generador 1 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.generador.1) 180*angle(rst.i.generador.1)/pi ] )
disp('c.2) Intensidades que salen del generador 2 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.generador.2) 180*angle(rst.i.generador.2)/pi ] )

%% d) Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la
red infinita (kA).
rst.i.neutro.red = 0;
rst.i.neutro.alta.t1 = 0;
rst.i.neutro.alta.t2 = 0;
rst.i.neutro.gen1 = 0;
rst.i.neutro.gen2 = 0;
for i=1:3
rst.i.neutro.red = rst.i.red(i)+rst.i.neutro.red;
rst.i.neutro.alta.t1 = rst.i.alta.t1(i) + rst.i.neutro.alta.t1;
rst.i.neutro.alta.t2 = rst.i.alta.t2(i) + rst.i.neutro.alta.t2;
rst.i.neutro.gen1 = rst.i.generador.1(i) + rst.i.neutro.gen1;
rst.i.neutro.gen2 = rst.i.generador.2(i) + rst.i.neutro.gen2;
end
disp('d.1) Intensidades del neutro hacia tierra en la red infinita (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.red) 180*angle(rst.i.neutro.red)/pi ] )
disp('d.2) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 1 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.alta.t1) 180*angle(rst.i.neutro.alta.t1)/pi ] )
disp('d.3) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 2 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.alta.t2) 180*angle(rst.i.neutro.alta.t2)/pi ] )
disp('d.4) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 1 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.gen1) 180*angle(rst.i.neutro.gen1)/pi ] )
disp('d.5) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 2 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.gen2) 180*angle(rst.i.neutro.gen2)/pi ] )

%% e) Tension en el punto de averia.
O12.Vfalta = [Vfalta.0; Vfalta.1; Vfalta.2];
rst.Vfalta = A*O12.Vfalta*UB(1);

disp('e) Tension en el punto de averia(kV y grados).');
disp( [ abs(rst.Vfalta) 180*angle(rst.Vfalta)/pi ] )

%% f) Tensiones en Bornas del Alternador.
O12.Vgen1.bornas = (O12.Vfalta+zcc.1*O12.i.alta.t1).*O12.t1;
rst.Vgen1.bornas = A*(O12.Vgen1.bornas)*UB(2);
O12.Vgen2.bornas = (O12.Vfalta+zcc.2*O12.i.alta.t2).*O12.t2;
rst.Vgen2.bornas = A*(O12.Vgen2.bornas)*UB(3);

```

```

disp('f.1) Tensiones en bornas del generador 1 (kV y grados)');
disp( [ abs(rst.Vgen1.bornas) 180*angle(rst.Vgen1.bornas)/pi ] )
disp('f.2) Tensiones en bornas del generador 2 (kV y grados)');
disp( [ abs(rst.Vgen2.bornas) 180*angle(rst.Vgen2.bornas)/pi ] )

```

2.2.2. Resultados Numéricos

1. Intensidades de averia (kA y °).

$$rst\ i\ averia = \begin{pmatrix} 3,8215/\underline{-90,0000^\circ} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

2. Intensidades que SALEN de la Red (kA y °).

- a) Intensidades que SALEN de la Red.

$$rst\ i\ red = \begin{pmatrix} 0,9947/\underline{-90,0000^\circ} \\ 0,3460/\underline{96,6420^\circ} \\ 0,3460/\underline{83,3580^\circ} \end{pmatrix}$$

- b) Intensidades de alta en el Transformador 1 (kA y °).

$$rst\ i\ alta\ t1 = \begin{pmatrix} 2,4902/\underline{-90,0000^\circ} \\ 0,6329/\underline{179,0321^\circ} \\ 0,6329/\underline{0,9679^\circ} \end{pmatrix}$$

- c) Intensidades de alta en el Transformador 2 (kA y °).

$$rst\ i\ alta\ t2 = \begin{pmatrix} 0,4223/\underline{-90,0000^\circ} \\ 0,8094/\underline{-22,6301^\circ} \\ 0,8094/\underline{-157,3699^\circ} \end{pmatrix}$$

3. Intensidaddes que salen de los Generadores (kA y °).

- a) Intensidaddes que salen del generador 1 (kA y °).

$$rst\ i\ generador\ 1 = \begin{pmatrix} 8,1308/\underline{120,4700^\circ} \\ 12,4200/\underline{-48,3992^\circ} \\ 25,9130/\underline{-99,1553^\circ} \end{pmatrix}$$

- b) Intensidades que salen del generador 2 (kA y °).

$$rst\ i\ generador\ 2 = \begin{pmatrix} 8,6581/\underline{-90,0000^\circ} \\ 16,5930/\underline{-22,6301^\circ} \\ 16,5930/\underline{-157,3699^\circ} \end{pmatrix}$$

4. Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la red infinita (kA).

- a) Intensidades del neutro hacia tierra en la red infinita (kA).

$$i\ neutro\ red = 0,3074/\underline{-90,0000}$$

- b) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 1 (kA).

$$i\ neutro\ alta\ t1 = 2,4688/\underline{-90,0000}$$

- c) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 2(kA).

$$i_{neutro\ alta\ t2} = 1,0452 \angle -90,0000$$

- d) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 1 (kA).

$$i_{neutro\ gen1} = 27,8625 \angle -90,0000$$

- e) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 2 (kA).

$$i_{neutro\ gen2} = 21,4274 \angle -90,0000$$

5. Tension en el punto de averia(kV y $^\circ$).

$$rst\ i\ red = \begin{pmatrix} 0,0000 \angle 180,0000^\circ \\ 205,1415 \angle -114,0065^\circ \\ 205,1415 \angle 114,0065^\circ \end{pmatrix}$$

6. Tensiones en bornas de los generadores (kV y $^\circ$).

- a) Tensiones en bornas del generador 1 (kV y $^\circ$).

$$rst\ V_{gen1\ bornas} = \begin{pmatrix} 17,4809 \angle -137,6531^\circ \\ 23,5508 \angle 90,0000^\circ \\ 17,4809 \angle -42,3469^\circ \end{pmatrix}$$

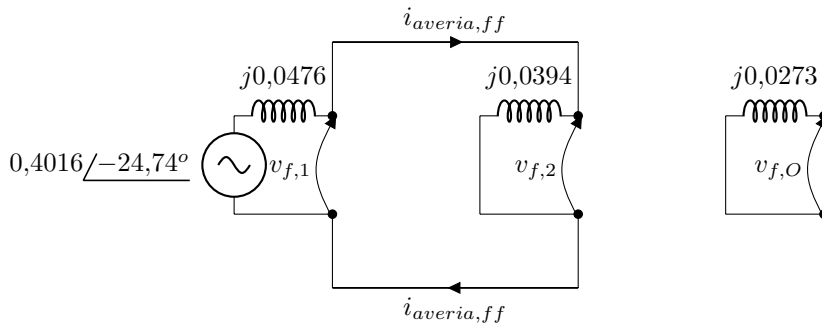
- b) Tensiones en bornas del generador 2 (kV y $^\circ$).

$$rst\ V_{gen2\ bornas} = \begin{pmatrix} 2,5974 \angle 0^\circ \\ 5,0319 \angle -115,3681^\circ \\ 5,0319 \angle 115,3680^\circ \end{pmatrix}$$

3. Falta Fase-Fase

Después de obtener los Thevenin's equivalentes en el punto de la falta, y después de analizar las corrientes de averia para la falta fase-fase hemos de retroceder al circuito original en componentes de secuencia para responder a todos los apartados del problema.

3.1. Circuito Equivalente de la Falta Fase-Fase



En una falta fase-fase, con $Z_{falta} = 0$, sabemos que se cumplen las siguientes condiciones de contorno que aplicaremos:

$$\begin{aligned} I_0^f &= 0 \\ I_1^f &= -I_2^f \\ V_1^f - V_2^f &= (Z^f) \cdot I_1^f \end{aligned}$$

3.2. Resultados

3.2.1. Código Matlab

```

%% 2. Falta Franca Fase-Fase
disp('%% 2. Falta Franca Fase-Fase');
%%%a) Intensidades de averia
i.averia_ff.1 = eth1_total/(zth1_total+zth2_total); %%%Directa
i.averia_ff.2 = -i.averia_ff.1; %%%Inversa
O12.i.averia_ff = [0;i.averia_ff.1;i.averia_ff.2];
rst.i.averia_ff = A*O12.i.averia_ff*IB(1);

disp('a) Intensidades de averia (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.averia_ff) 180*angle(rst.i.averia_ff)/pi ] )

%%%Tension de Falta Inversa
Vfalta2_ff = i.averia_ff.1*zth2_total;
i.red_ff.2 = -Vfalta2_ff/zth2_der;
i.alta_ff.2=i.averia_ff.2-i.red_ff.2;

%%%Tension de Falta Directa
Vfalta1_ff = eth1_total- i.averia_ff.1*zth1_total;
i.red_ff.1=(uinf-Vfalta1_ff)/zth1_der;
i.alta_ff.1=i.averia_ff.1-i.red_ff.1;

%% b) Intensidades que SALEN de la red infinita y de ambos trafos en alta.
%%%b.1) Intensidades de Red
O12.i.red_ff = [0; i.red_ff.1; i.red_ff.2];
rst.i.red_ff = A*O12.i.red_ff*IB(1);

disp('b.1) Intensidades que SALEN de la Red (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.red_ff) 180*angle(rst.i.red_ff)/pi ] )

%%%b.2) Intensidades que Salen del trafa de alta en los trafos t1 y t2.
%%% Inversa
i.alta_ff.2.1 = -Vfalta2_ff/(zth2.1.izq);
i.alta_ff.2.2 = -Vfalta2_ff/(zth2.2.izq);

%%%Directa
i.alta_ff.1.1 = (eth1.1.izq-Vfalta1_ff)/zth1.1.izq;
i.alta_ff.1.2 = (eth1.2.izq-Vfalta1_ff)/zth1.2.izq;

%%%Trafo 1
O12.i.alta_ff.t1 = [0;i.alta_ff.1.1;i.alta_ff.2.1]; %h,D,I
%%%Trafo 2
O12.i.alta_ff.t2 = [0;i.alta_ff.1.2;i.alta_ff.2.2]; %h,D,I

rst.i.alta_ff.t1 = A*O12.i.alta_ff.t1*IB(1);
rst.i.alta_ff.t2 = A*O12.i.alta_ff.t2*IB(1);

disp('b.2.1) Intensidades de alta en el Transformador 1 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.alta_ff.t1) 180*angle(rst.i.alta_ff.t1)/pi ] )
disp('b.2.2) Intensidades de alta en el TRansformador 2 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.alta_ff.t2) 180*angle(rst.i.alta_ff.t2)/pi ] )

%% c) Intensidades de los alternadores.
O12.i.generador_ff.1 = O12.i.alta_ff.t1./conj(O12.t1);
rst.i.generador_ff.1 = A*O12.i.generador_ff.1*IB(2);
O12.i.generador_ff.2 = O12.i.alta_ff.t2./conj(O12.t2);
rst.i.generador_ff.2 = A*O12.i.generador_ff.2*IB(3);

disp('c.1) Intensidades que salen del generador 1 1 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.generador_ff.1) 180*angle(rst.i.generador_ff.1)/pi ] )
disp('c.2) Intensidades que salen del generador 2 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.generador_ff.2) 180*angle(rst.i.generador_ff.2)/pi ] )

```

```

%% d) Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la
    red infinita (kA).
rst.i.neutro.red.ff = 0;
rst.i.neutro.alta.ff.t1 = 0;
rst.i.neutro.alta.ff.t2 = 0;
rst.i.neutro.gen1.ff = 0;
rst.i.neutro.gen2.ff = 0;
for i=1:3
    rst.i.neutro.red.ff = rst.i.red.ff(i)+rst.i.neutro.red.ff;
    rst.i.neutro.alta.ff.t1 = rst.i.alta.ff.t1(i) + rst.i.neutro.alta.ff.t1;
    rst.i.neutro.alta.ff.t2 = rst.i.alta.ff.t2(i) + rst.i.neutro.alta.ff.t2;
    rst.i.neutro.gen1.ff = rst.i.generador.ff.1(i) + rst.i.neutro.gen1.ff;
    rst.i.neutro.gen2.ff = rst.i.generador.ff.2(i) + rst.i.neutro.gen2.ff;
end
disp('d.1) Intensidades del neutro hacia tierra en la red infinita (kA).');
disp([ abs(rst.i.neutro.red.ff) 180*angle(rst.i.neutro.red.ff)/pi ] );
disp('d.2) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 1 (kA).');
disp([ abs(rst.i.neutro.alta.ff.t1) 180*angle(rst.i.neutro.alta.ff.t1)/pi ] );
disp('d.3) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 2 (kA).');
disp([ abs(rst.i.neutro.alta.ff.t2) 180*angle(rst.i.neutro.alta.ff.t2)/pi ] );
disp('d.4) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 1 (kA).');
disp([ abs(rst.i.neutro.gen1.ff) 180*angle(rst.i.neutro.gen1.ff)/pi ] );
disp('d.5) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 2 (kA).');
disp([ abs(rst.i.neutro.gen2.ff) 180*angle(rst.i.neutro.gen2.ff)/pi ] );

%% e) Tension en el punto de averia.
O12.Vfalta.ff = [0; Vfalta1.ff; Vfalta2.ff];
rst.Vfalta.ff = A*O12.Vfalta.ff*UB(1);

disp('e) Tension en el punto de averia(kV y grados).');
disp([ abs(rst.Vfalta.ff) 180*angle(rst.Vfalta.ff)/pi ] );

%% f) Tensiones en Bornas del Alternador.
O12.Vgen1.bornas.ff = (O12.Vfalta.ff+zcc.1*O12.i.alta.ff.t1);
rst.Vgen1.bornas.ff = A*(O12.Vgen1.bornas.ff.*O12.t1)*UB(2);

O12.Vgen2.bornas.ff = O12.Vfalta.ff+zcc.2*O12.i.alta.ff.t2;
rst.Vgen2.bornas.ff = A*(O12.Vgen2.bornas.ff.*O12.t2)*UB(3);

disp('f.1) Tensiones en bornas del generador 1 (kV y grados)');
disp([ abs(rst.Vgen1.bornas.ff) 180*angle(rst.Vgen1.bornas.ff)/pi ] );
disp('f.2) Tensiones en bornas del generador 2 (kV y grados)');
disp([ abs(rst.Vgen2.bornas.ff) 180*angle(rst.Vgen2.bornas.ff)/pi ] )

```

3.2.2. Resultados Numéricos

1. Intensidades de averia (kA y °).

$$rst\ i\ averia\ ff = \begin{pmatrix} 0/0^\circ \\ 2,8985/180,0000^\circ \\ 2,8985/0,0000^\circ \end{pmatrix}$$

2. Intensidades que SALEN de la Red (kA y °).

- a) Intensidades que SALEN de la Red.

$$rst\ i\ red = \begin{pmatrix} 0,0736/-90,0000^\circ \\ 1,0270/177,9454^\circ \\ 1,0270/2,0546^\circ \end{pmatrix}$$

- b) Intensidades de alta en el Transformador 1 (kA y °).

$$rst\ i\ alta\ t1\ ff = \begin{pmatrix} 0,7198/-90,0000^\circ \\ 1,7269/167,9707^\circ \\ 1,7269/12,0293^\circ \end{pmatrix}$$

- c) Intensidades de alta en el Transformador 2 (kA y °).

$$rst\ i\ alta\ t2\ ff = \begin{pmatrix} 0,7934/90,0000^\circ \\ 0,4370/-114,7886^\circ \\ 0,4370/-65,2114^\circ \end{pmatrix}$$

3. Intensidades que salen de los Generadores (kA y °).

- a) Intensidades que salen del generador 1 (kA y °).

$$rst\ i\ generador\ 1\ ff = \begin{pmatrix} 13,0614/147,4\ ff102^\circ \\ 22,0097/0,0000^\circ \\ 13,0614/-147,4102^\circ \end{pmatrix}$$

- b) Intensidades que salen del generador 2 (kA y °).

$$rst\ i\ generador\ 2\ ff = \begin{pmatrix} 16,2655/90,0000^\circ \\ 8,9582/-114,7886^\circ \\ 8,9582/-65,2114^\circ \end{pmatrix}$$

4. Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la red infinita (kA).

- a) Intensidades del neutro hacia tierra en la red infinita (kA).

$$i\ neutro\ red\ ff = 0,0000/0$$

- b) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 1 (kA).

$$i\ neutro\ alta\ ff\ t1 = 0,0000/90,0000$$

- c) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 2(kA).

$$i\ neutro\ alta\ ff\ t2 = 0,0000/-168,6901$$

- d) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 1 (kA).

$$i\ neutro\ gen1\ ff = 0,0000/63,4349$$

- e) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 2 (kA).

$$i\ neutro\ gen2\ ff = 0,0000/180,0000$$

5. Tension en el punto de averia(kV y °).

$$rst\ V\ falta\ ff = \begin{pmatrix} 211,1753/0^\circ \\ 105,5877/180,0000^\circ \\ 105,5877/180,0000^\circ \end{pmatrix}$$

6. Tensiones en bornas de los generadores (kV y °).

- a) Tensiones en bornas del generador 1 (kV y °).

$$rst\ V\ gen1\ bornas\ ff = \begin{pmatrix} 20,7775/-163,6707^\circ \\ 11,6835/90,0000^\circ \\ 20,7775/-16,3293^\circ \end{pmatrix}$$

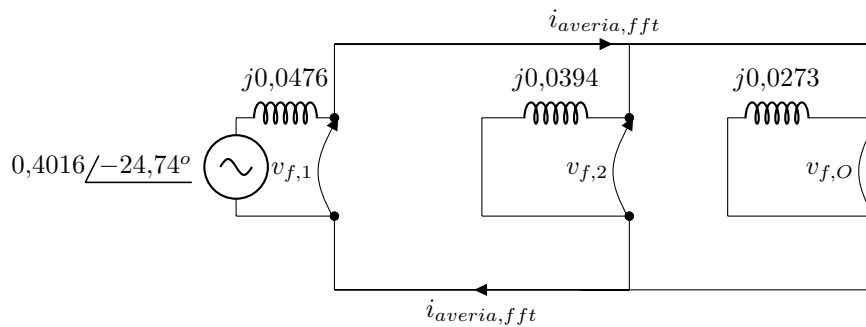
- b) Tensiones en bornas del generador 2 (kV y °).

$$rst\ V\ gen2\ bornas\ ff = \begin{pmatrix} 5,4216/0^\circ \\ 2,9356/-157,4292^\circ \\ 2,9356/157,4292^\circ \end{pmatrix}$$

4. Falta Fase-Fase-Tierra

Después de obtener los Thevenin's equivalentes en el punto de la falta, y después de analizar las corrientes de avería hemos de retroceder al circuito original en componentes de secuencia para responder a todos los apartados del problema.

4.1. Circuito Equivalente de la Falta Fase-Tierra



Una vez resuelto este circuito, calculando la i_{averia} podremos hallar el resto de apartados del problema. Para su resolución aplicaremos las condiciones de contorno que caracterizan a este tipo de cortocircuitos:

$$I_0^f + I_1^f + I_2^f = 0$$

$$V_1^f = V_2^f$$

$$V_0^f - V_1^f = (3Z^f) \cdot I_0^f$$

4.2. Resultados

4.2.1. Código Matlab

```

%% 3. Falta Franca Fase-Fase-Tierra
disp('%% 3. Falta Franca Fase-Fase-Tierra')
%%a) Intensidades de avería
i_averia_fft_1 = eth1_total / (zth1_total + paralelo(zth2_total, zth0_total)); %%
    Directa
V_falta_fft_1 = eth1_total - i_averia_fft_1 * zth1_total;
V_falta_fft_2 = V_falta_fft_1;
V_falta_fft_0 = V_falta_fft_1;
i_averia_fft_2 = -V_falta_fft_2 / zth2_total;
i_averia_fft_0 = -V_falta_fft_0 / zth0_total;

O12_i_averia_fft = [i_averia_fft_0; i_averia_fft_1; i_averia_fft_2];
rst_i_averia_fft = A * O12_i_averia_fft * IB(1);

disp('a) Intensidades de avería (kA y grados)');
disp( [ abs(rst_i_averia_fft) 180 * angle(rst_i_averia_fft) / pi ] )

%%b) Intensidades que SALEN de la red infinita y de ambos trafos en alta.
%%b.1) Intensidades de Red
i_red_fft_1 = -V_falta_fft_1 / zth1_der;
i_red_fft_2 = -V_falta_fft_2 / zth2_der;
i_red_fft_0 = -V_falta_fft_0 / zth0_der;

i_alta_fft_1 = i_averia_fft_1 - i_red_fft_1;
i_alta_fft_2 = i_averia_fft_2 - i_red_fft_2;
i_alta_fft_0 = i_averia_fft_0 - i_red_fft_0;

```



```

O12.i.red.fft = [i.red.fft_0; i.red.fft_1; i.red.fft_2];
rst.i.red.fft = A*O12.i.red.fft*IB(1);

disp('b.1) Intensidades que SALEN de la Red (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.red.fft) 180*angle(rst.i.red.fft)/pi ] )

%%% Inversa
i.alta.fft_2_1 = -Vfalta.fft_2/(zth2_1.izq);
i.alta.fft_2_2 = -Vfalta.fft_2/(zth2_2.izq);

%%% Directa
i.alta.fft_1_1 = (eth1_1.izq-Vfalta.fft_1)/(zth1_1.izq);
i.alta.fft_1_2 = (eth1_2.izq-Vfalta.fft_1)/(zth1_2.izq);

%%% Trafo 1
O12.i.alta.fft_t1 = [0; i.alta.fft_1_1; i.alta.fft_2_1]; %h,D,I
%%% Trafo 2
O12.i.alta.fft_t2 = [0; i.alta.fft_1_2; i.alta.fft_2_2]; %h,D,I

rst.i.alta.fft_t1 = A*O12.i.alta.fft_t1*IB(1);
rst.i.alta.fft_t2 = A*O12.i.alta.fft_t2*IB(1);

disp('b.2.1) Intensidades de alta en el Transformador 1 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.alta.fft_t1) 180*angle(rst.i.alta.fft_t1)/pi ] )
disp('b.2.2) Intensidades de alta en el Transformador 2 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.alta.fft_t2) 180*angle(rst.i.alta.fft_t2)/pi ] )

%% c) Intensidades de los alternadores.
O12.i.generador.fft_1 = O12.i.alta.fft_t1./conj(O12.t1);
rst.i.generador.fft_1 = A*O12.i.generador.fft_1*IB(2);
O12.i.generador.fft_2 = O12.i.alta.fft_t2./conj(O12.t2);
rst.i.generador.fft_2 = A*O12.i.generador.fft_2*IB(3);

disp('c.1) Intensidades que salen del generador 1 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.generador.fft_1) 180*angle(rst.i.generador.fft_1)/pi ] )
disp('c.2) Intensidades que salen del generador 2 (kA y grados)');
disp( [ abs(rst.i.generador.fft_2) 180*angle(rst.i.generador.fft_2)/pi ] )

%% d) Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la
red infinita (kA).
rst.i.neutro.red.fft = 0;
rst.i.neutro.alta.fft_t1 = 0;
rst.i.neutro.alta.fft_t2 = 0;
rst.i.neutro.gen1.fft = 0;
rst.i.neutro.gen2.fft = 0;
for i=1:3
rst.i.neutro.red.fft = rst.i.red.fft(i)+rst.i.neutro.red.fft;
rst.i.neutro.alta.fft_t1 = rst.i.alta.fft_t1(i) + rst.i.neutro.alta.fft_t1;
rst.i.neutro.alta.fft_t2 = rst.i.alta.fft_t2(i) + rst.i.neutro.alta.fft_t2;
rst.i.neutro.gen1.fft = rst.i.generador.fft_1(i) + rst.i.neutro.gen1.fft;
rst.i.neutro.gen2.fft = rst.i.generador.fft_2(i) + rst.i.neutro.gen2.fft;
end
disp('d.1) Intensidades del neutro hacia tierra en la red infinita (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.red.fft) 180*angle(rst.i.neutro.red.fft)/pi ] )
disp('d.2) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 1 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.alta.fft_t1) 180*angle(rst.i.neutro.alta.fft_t1)/pi ] )
disp('d.3) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 2 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.alta.fft_t2) 180*angle(rst.i.neutro.alta.fft_t2)/pi ] )
disp('d.4) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 1 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.gen1.fft) 180*angle(rst.i.neutro.gen1.fft)/pi ] )
disp('d.5) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 2 (kA).');
disp( [ abs(rst.i.neutro.gen2.fft) 180*angle(rst.i.neutro.gen2.fft)/pi ] )

%% e) Tension en el punto de averia.
O12.Vfalta.fft = [0; Vfalta.fft_1; Vfalta.fft_2];
rst.Vfalta.fft = A*O12.Vfalta.fft*UB(1);

```

```

disp('e) Tension en el punto de averia(kV y grados).');
disp( [ abs(rst.Vfalta_fft) 180*angle(rst.Vfalta_fft)/pi ] )

%% f) Tensiones en Bornas del Alternador.
O12.Vgen1.bornas_fft = (O12.Vfalta_fft+zcc.1*O12.i_alta_fft.t1).*O12.t1;
rst.Vgen1.bornas_fft = A*(O12.Vgen1.bornas_fft)*UB(2);

O12.Vgen2.bornas_fft = (O12.Vfalta_fft+zcc.2*O12.i_alta_fft.t2).*O12.t2;
rst.Vgen2.bornas_fft = A*(O12.Vgen2.bornas_fft)*UB(3);

disp('f.1) Tensiones en bornas del generador 1 (kV y grados).');
disp( [ abs(rst.Vgen1.bornas_fft) 180*angle(rst.Vgen1.bornas_fft)/pi ] )
disp('f.2) Tensiones en bornas del generador 2 (kV y grados).');
disp( [ abs(rst.Vgen2.bornas_fft) 180*angle(rst.Vgen2.bornas_fft)/pi ] )

```

4.2.2. Resultados Numéricos

1. Intensidades de averia (kA y °).

$$rst\ i\ averia\ fft = \begin{pmatrix} 0/90,0000^\circ \\ 3,4470/144,0065^\circ \\ 3,4470/35,9935^\circ \end{pmatrix}$$

2. Intensidades que SALEN de la Red (kA y °).

- a) Intensidades que SALEN de la Red.

$$rst\ i\ red = \begin{pmatrix} 0,7296/90,0000^\circ \\ 0,2018/-90,0000^\circ \\ 0,2018/-90,0000^\circ \end{pmatrix}$$

- b) Intensidades de alta en el Transformador 1 (kA y °).

$$rst\ i\ alta\ t1\ fft = \begin{pmatrix} 1,1997/-90,0000^\circ \\ 1,7409/159,8451^\circ \\ 1,7409/20,1549^\circ \end{pmatrix}$$

- c) Intensidades de alta en el Transformador 2 (kA y °).

$$rst\ i\ alta\ t2\ fft = \begin{pmatrix} 0,4133/90,0000^\circ \\ 0,2433/-121,8442^\circ \\ 0,2433/-58,1558^\circ \end{pmatrix}$$

3. Intensidaddes que salen de los Generadores (kA y °).

- a) Intensidaddes que salen del generador 1 (kA y °).

$$rst\ i\ generador\ 1\ fft = \begin{pmatrix} 15,8390/132,2450^\circ \\ 21,2972/-0,0000^\circ \\ 15,8390/-132,2450^\circ \end{pmatrix}$$

- b) Intensidades que salen del generador 2 (kA y °).

$$rst\ i\ generador\ 2\ fft = \begin{pmatrix} 8,4722/90,0000^\circ \\ 4,9867/-121,8442^\circ \\ 4,9867/-58,1558^\circ \end{pmatrix}$$

4. Intensidades del neutro hacia tierra en alternadores, transformadores y la red infinita (kA).

- a) Intensidades del neutro hacia tierra en la red infinita (kA).

$$i_{neutro\ red\ fft} = 0,3259/\underline{90,0000}$$

- b) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 1 (kA).

$$i_{neutro\ alta\ fft\ t1} = 0,0000/\underline{26,5651}$$

- c) Intensidades del neutro hacia tierra en el transformador 2(kA).

$$i_{neutro\ alta\ fft\ t2} = 0,0000/\underline{-158,1986}$$

- d) Intensidades del neutro hacia tierra en el generador 1 (kA).

$$i_{neutro\ gen1\ fft} = 0,0000/\underline{-143,1301}$$

- e) Intensidades del neutro hacia tierra en el generaodr 2 (kA).

$$i_{neutro\ gen2\ fft} = 0,0000/\underline{-150,2551}$$

5. Tension en el punto de averia(kV y °).

$$rst\ V\ falta\ fft = \begin{pmatrix} 117,9804/\underline{0^{\circ}} \\ 58,9902/\underline{180,0000^{\circ}} \\ 58,9902/\underline{180,0000^{\circ}} \end{pmatrix}$$

6. Tensiones en bornas de los generadores (kV y °).

- a) Tensiones en bornas del generador 1 (kV y °).

$$rst\ V_{gen1\ bornas\ fft} = \begin{pmatrix} 16,2897/\underline{-159,6957^{\circ}} \\ 11,3052/\underline{90,0000^{\circ}} \\ 16,2897/\underline{-20,3043^{\circ}} \end{pmatrix}$$

- b) Tensiones en bornas del generador 2 (kV y °).

$$rst\ V_{gen2\ bornas\ fft} = \begin{pmatrix} 3,2135/\underline{0^{\circ}} \\ 1,7901/\underline{-153,8374^{\circ}} \\ 1,7901/\underline{153,8374^{\circ}} \end{pmatrix}$$

Referencias

- [1] Francisco M. Echavarren Cerezo y Andrés D. Díaz Casado: *Apuntes sobre Redes Trifásicas Desequilibradas*, Universidad Pontificia de Comillas (2016).