



PROYECTO DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 4.0

Modelado y simulación de redes eléctricas de distribución hacia las redes eléctricas inteligentes: Introducción a cálculo de fallas

Contenidos

- Introducción a fallas
- Modelo de red de transmisión en estudios de fallas
- Cálculo de fallas en OpenDSS



¿Qué son fallas?

Es el fallo del material aislante que separa dos objetos con una diferencia de potencial.

Tipos de materiales aislantes:

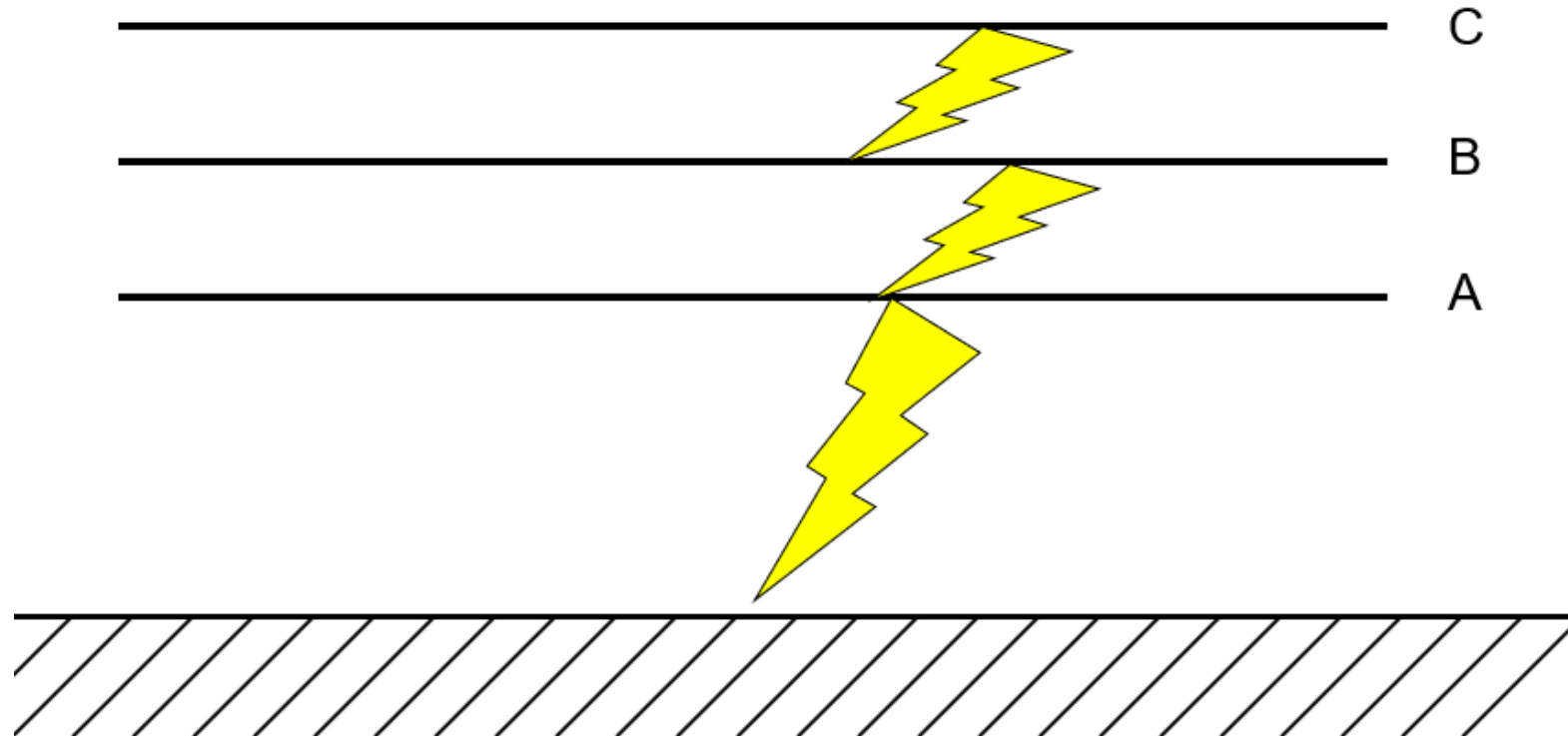
- Aire
- Gas (SF_6)
- Cerámica, vidrio (aisladores y *bushings*)
- Aceite
- Papel
- Polímeros (en cables y cadena de aisladores)

¿Qué causa las fallas?

- Descargas atmosféricas
- Contacto entre conductores desnudos
- Movimiento de conductores
- Defectos en material aislante (envejecimiento del material, contaminación de aceite)
- Daño a material aislante (temperatura alta)
- Daño a aislantes sólidos (vandalismo)

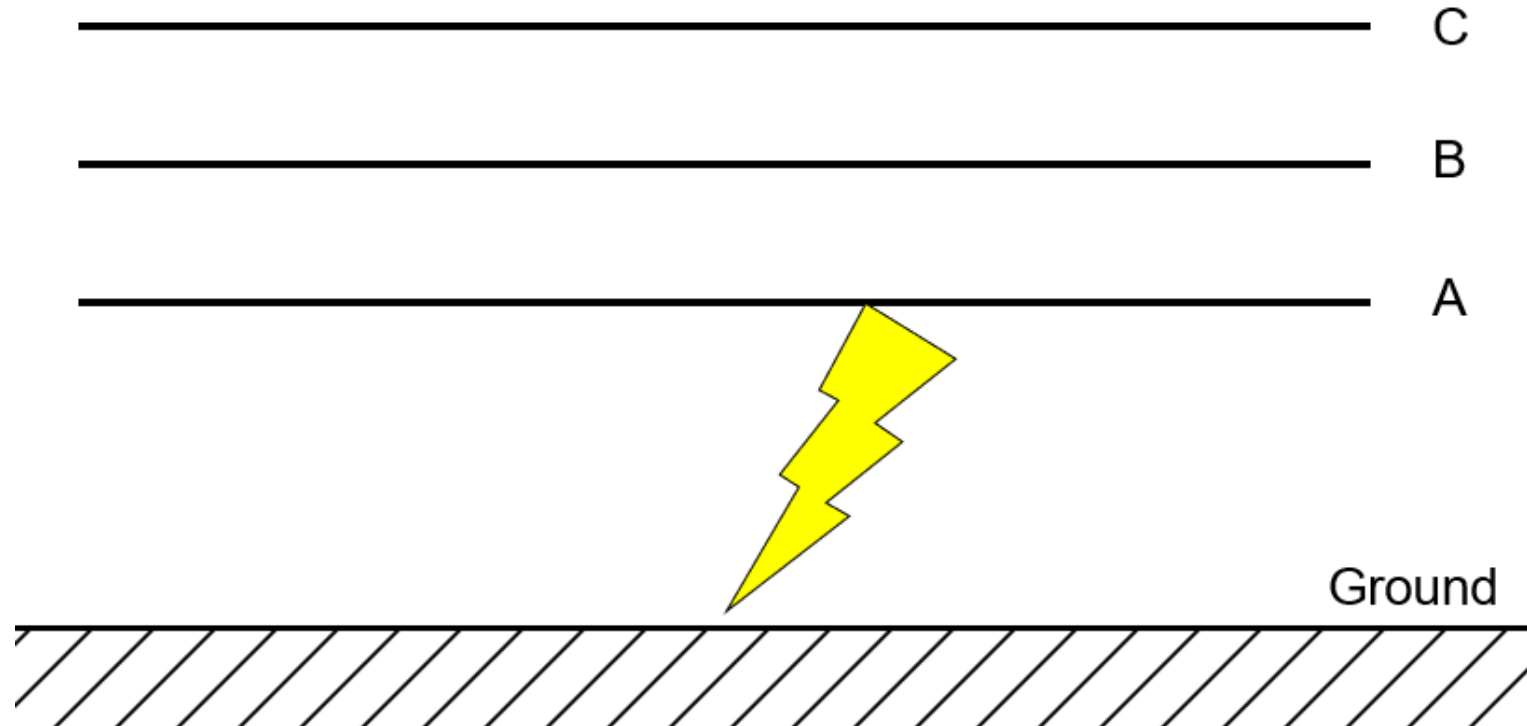
Tipos de falla

- Falla trifásica a tierra (balanceada)



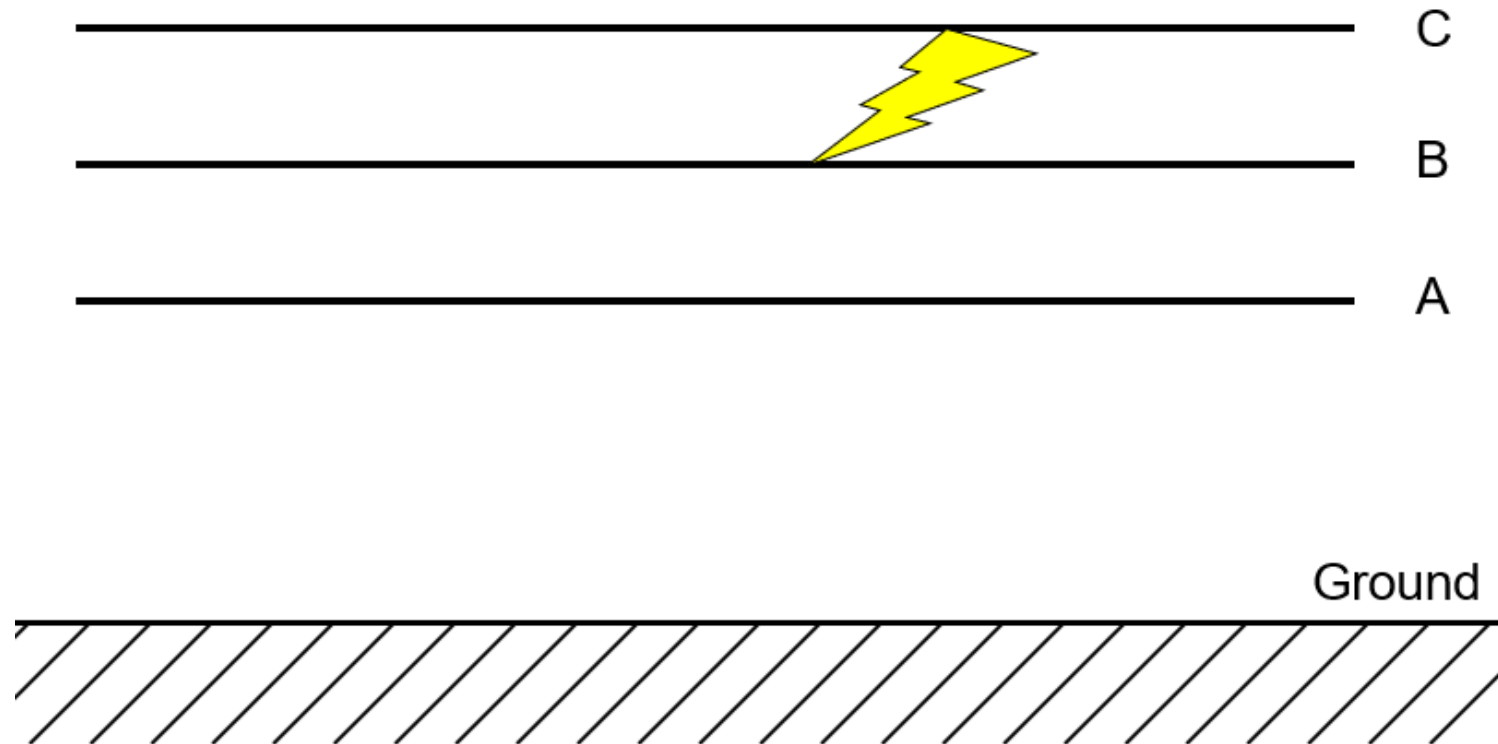
Tipos de falla

- Falla monofásica a tierra (desbalanceada)



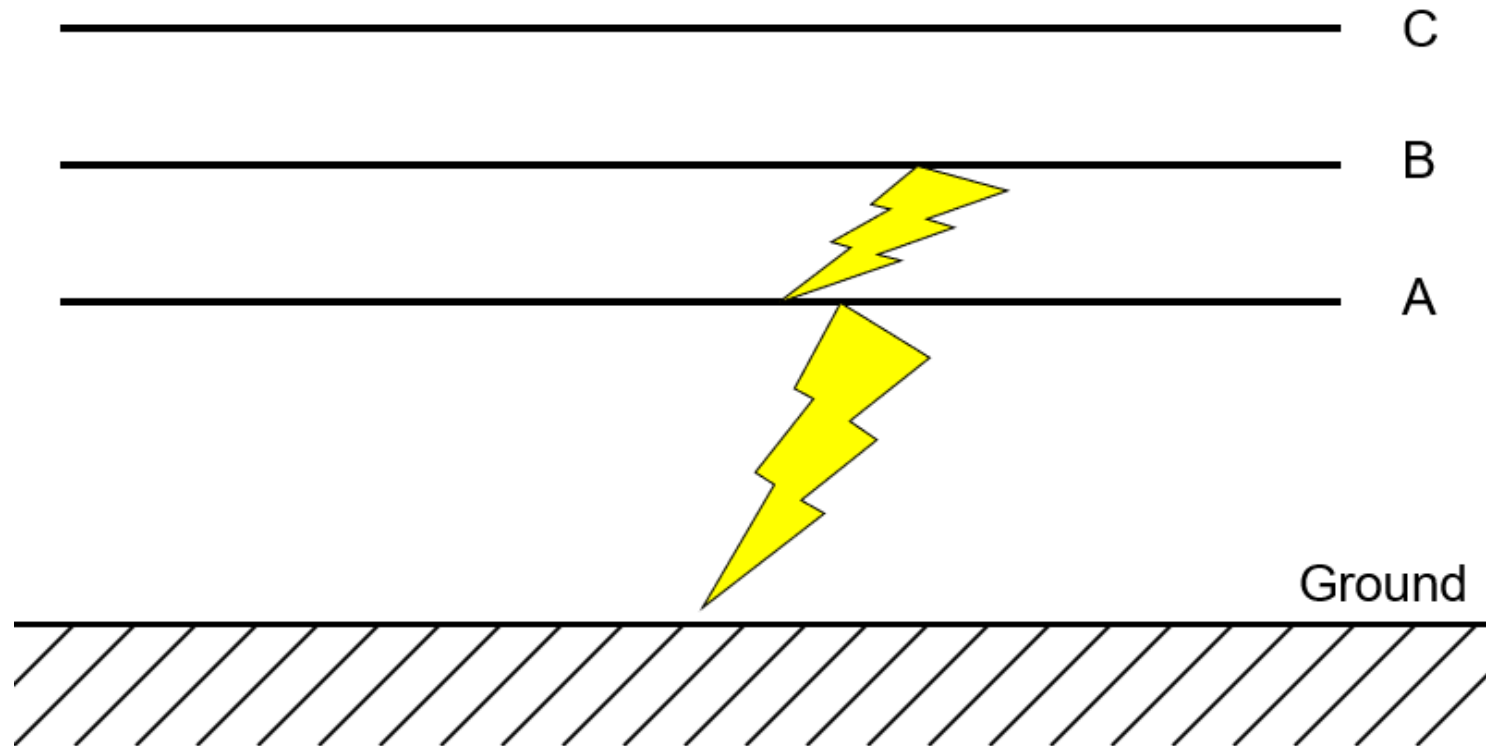
Tipos de falla

- Falla línea-línea (desbalanceada)



Tipos de falla

- Falla línea-línea a tierra (desbalanceada)



¿Para qué se estudian fallas?

Cálculo de capacidad de interruptores

- Debe interrumpirse la falla lo más pronto posible
- Falla del interruptor conlleva a problemas aún mayores

Diseño del sistema de protección

- ¿La falla es lo suficientemente grande para ser detectada?
- Fallas que no se detectan son un peligro de seguridad

Revisión de estabilidad del sistema

Calidad de la energía

- Las fallas crean huecos de tensión en la red

El sistema debe continuar su operación aún en condiciones anormales.

¿Cuál es la frecuencia de las fallas y cuáles son más severas?

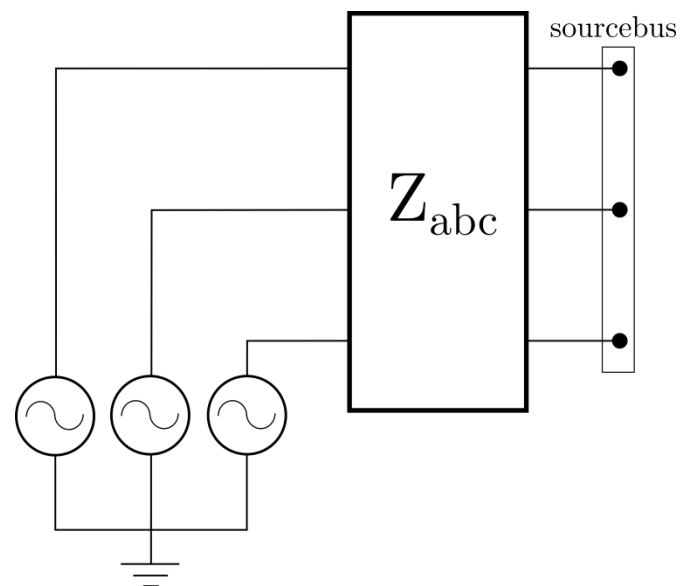
- | | |
|-------------------------|-------|
| 1. Monofásica a tierra | ~ 70% |
| 2. Línea a línea | ~ 15% |
| 3. Doble línea a tierra | ~ 10% |
| 4. Falla trifásica | ~ 5% |

Las fallas simétricas son por lo general las más severas (alta corriente). Sin embargo, en algunos casos las fallas monofásicas a tierra pueden ser más severas que una falla balanceada.

Equivalente de transmisión

Los estudios de cortocircuito en redes de distribución deben considerar el aporte de la red de transmisión a las corrientes de fallas

Usualmente la red de transmisión se modela como un equivalente de Thevenin: una fuente de tensión trifásica en serie con una matriz de impedancia equivalente.

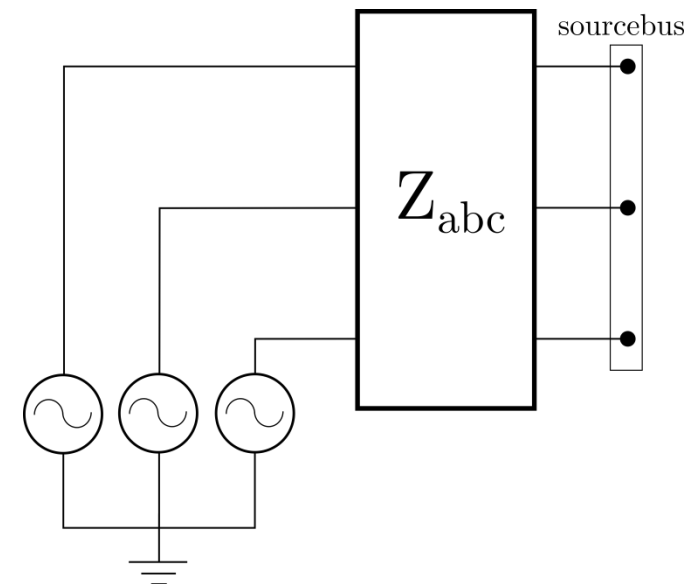


Equivalente de transmisión

El operador de la red de transmisión (TSO) le reporta al operador de distribución el aporte de corrientes de falla en el punto de conexión (puede ser en alta tensión o en media tensión). La información se puede entregar como:

- Corriente de cortocircuito trifásica y monofásica (en kA)
- Potencia de cortocircuito trifásica y monofásica (en MVA)
- Impedancia de secuencia positiva y cero (en Ohm)

Cualquiera de las tres opciones anteriores es información mínima requerida para obtener la matriz de impedancia de la red externa.



Información enviada por TSO

Corriente de cortocircuito trifásica y monofásica:

$\bar{I}_f^{3\phi}$: Fasor de corriente de falla trifásica a tierra (fase a)

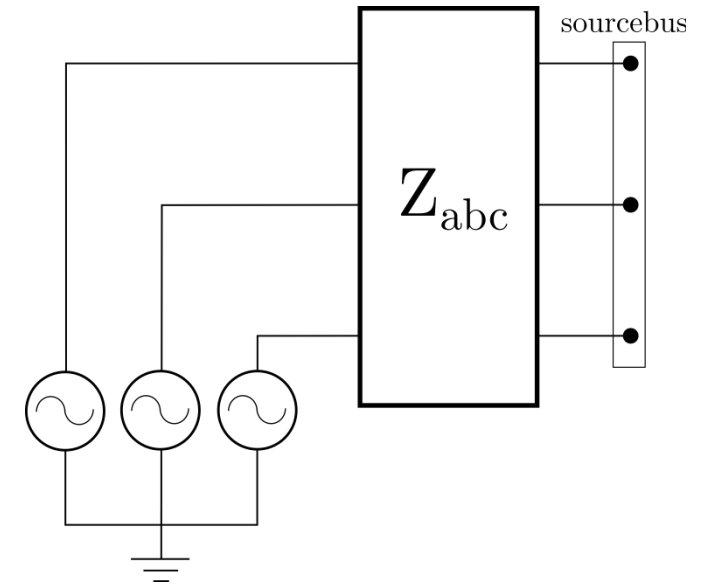
$\bar{I}_f^{1\phi}$: Fasor de corriente de falla monofásica a tierra (fase a)

Potencia de cortocircuito trifásica y monofásica:

$$S_f^{3\phi} = \sqrt{3}V_{LL} (\bar{I}_f^{3\phi})^*$$

$$S_f^{1\phi} = \sqrt{3}V_{LL} (\bar{I}_f^{1\phi})^*$$

V_{LL} : Tensión nominal línea-línea en el punto de falla



Información enviada por TSO

Impedancia de secuencia positiva y negativa:

$$Z_1 = \frac{V_{LL}^2}{(S_f^{3\phi})^*} \quad Z_0 = \frac{3V_{LL}^2}{(S_f^{1\phi})^*} - 2Z_1$$

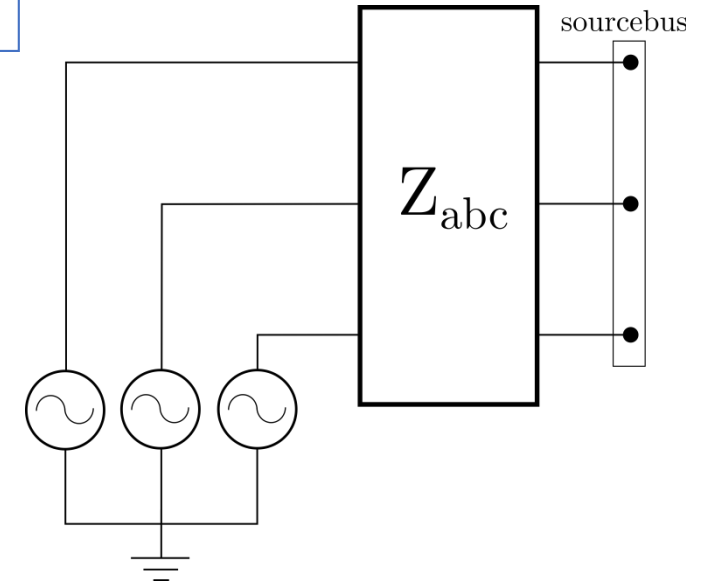
$$Z_1 = Z_2$$

Matriz de impedancia de la red externa:

$$Z_{abc} = A \cdot Z_{012} \cdot A^{-1}$$

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$



Ejemplo 1:

Determine la matriz de impedancias Z_{012} de la red externa transmisión en la barra de subestación de 230 kV con corrientes de cortocircuito:

$$\bar{I}_f^{3\phi} = 9.5525 \angle -84.26^\circ \text{ kA}$$

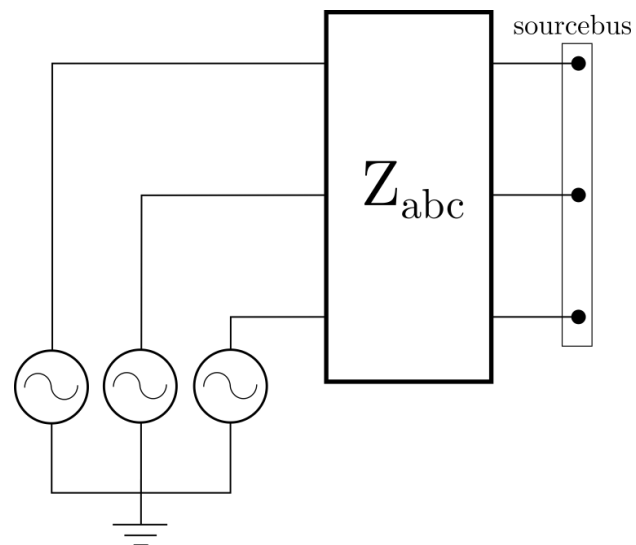
$$\bar{I}_f^{1\phi} = 10.7450 \angle -83.70^\circ \text{ kA}$$

Respuesta:

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} 1.28704 + j9.18706 & 0 & 0 \\ 0 & 1.39037 + j13.8314 & 0 \\ 0 & 0 & 1.39037 + j13.8314 \end{bmatrix} \Omega$$

Ejemplo 2:

Determine la matriz de impedancias Z_{abc} a partir de los datos del ejemplo anterior:



$$Z_{abc} = A \cdot Z_{012} \cdot A^{-1}$$

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.28704 + j9.18706 & 0 & 0 \\ 0 & 1.39037 + j13.8314 & 0 \\ 0 & 0 & 1.39037 + j13.8314 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 1.3559 + j12.2833 & -0.0344 - j1.5481 & -0.0344 - j1.5481 \\ -0.0344 - j1.5481 & 1.3559 + j12.2833 & -0.0344 - j1.5481 \\ -0.0344 - j1.5481 & -0.0344 - j1.5481 & 1.3559 + j12.2833 \end{bmatrix}$$

Ejemplo 3:

Determine la corriente de falla trifásica que aporta la red de transmisión en la barra de 230 kV, según la impedancia calculada en ejemplo 2.

$$I_{sc} = Y_{sc} V_{oc}$$

$$Y_{sc} = Z_{sc}^{-1}$$

$$Z_{sc} = Z_{abc} = \begin{bmatrix} 1.3559 + j12.2833 & -0.0344 - j1.5481 & -0.0344 - j1.5481 \\ -0.0344 - j1.5481 & 1.3559 + j12.2833 & -0.0344 - j1.5481 \\ -0.0344 - j1.5481 & -0.0344 - j1.5481 & 1.3559 + j12.2833 \end{bmatrix}$$

$$V_{oc} = \begin{bmatrix} 132.79 \angle 0.000^\circ \\ 132.79 \angle -120^\circ \\ 132.79 \angle +120^\circ \end{bmatrix} kV$$

$$I_{sc} = \begin{bmatrix} 9.5525 \angle -84.26^\circ \\ 9.5525 \angle +155.7^\circ \\ 9.5525 \angle +35.74^\circ \end{bmatrix} kA$$

Fallas en OpenDSS

Las fallas se corren en modo *dynamic* el cual funciona después que se hizo una primera corrida de flujos para calcular tensiones prefalla.

```
clear
set defaultbasefrequency=60

new circuit.ejemplo_fallas BasekV=230 pu=1.00 angle=0 frequency=60 phases=3

! Información del circuito
! Solución del flujo de potencia para calcular tensiones prefalla e inicializar modelos de generadores
solve

! Pasa a modo dinámico
solve mode=dynamic number=1

! Se incluye la falla
new fault...

! Cálculo de corrientes de falla
solve
```

Acá se especifica la corriente (o potencia) de cortocircuito de la red externa, o las respectivas impedancias de secuencia positiva, negativa y cero.

MVAsc3=... MVAsc1=...

Isc3=... Isc1=...

r1=... x1=... r0=... x0=...

Objeto *Fault* en OpenDSS

Las fallas se definen con el objeto *fault*.

- **name:** identificador (único) de la falla
- **bus1:** nombre de la barra 1 a fallar con respectivos nodos
- **bus2:** nombre de la barra 2 a fallar con respectivos nodos
- **r:** resistencia de falla (en cada fase), en Ω . Default es 0.0001
- **phases:** Número de fases. Default es 1.

OpenDSS tiene una serie de reglas que se deben seguir en la conexión de los nodos de las barras para lograr todo tipo de fallas.

Fallas en OpenDSS

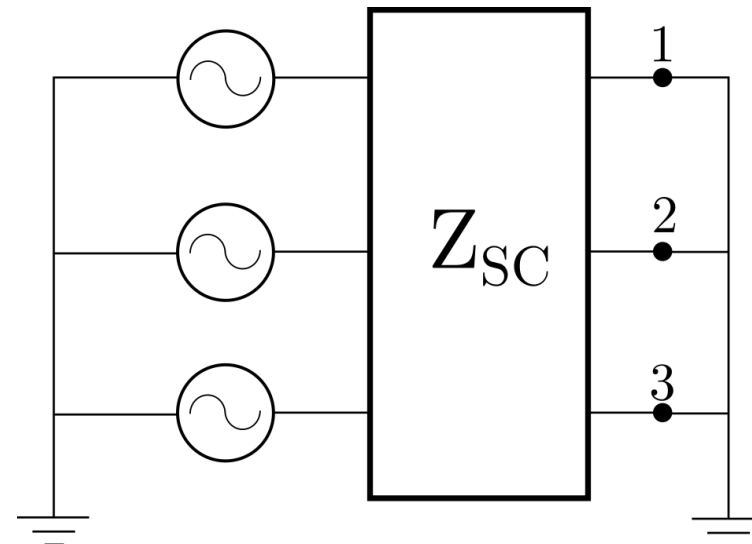
Falla trifásica sólida a tierra:

Opción A (recomendada):

new fault.LLLG bus1=busX.1.2.3 bus2=busX.0.0.0 phases=3 r=0.00001

Opción B:

new fault.LLLG bus1=busX phases=3 r=0.00001



Fallas en OpenDSS

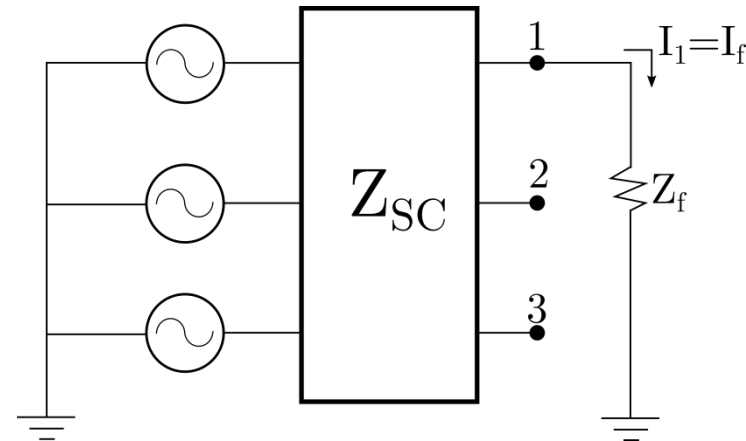
Falla monofásica a tierra (fase a):

Opción A (recomendada):

new fault.LG bus1=busX.1 bus2=busX.0 phases=1 r=0.0001

Opción B:

new fault.LG bus1=busX

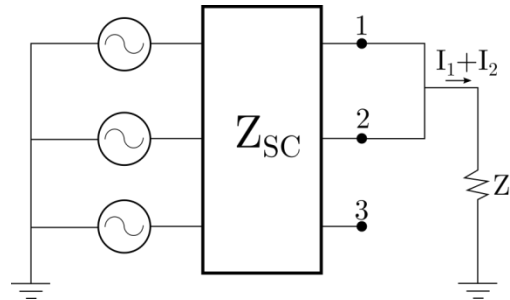


Fallas en OpenDSS

Falla bifásica a tierra (fases ab):

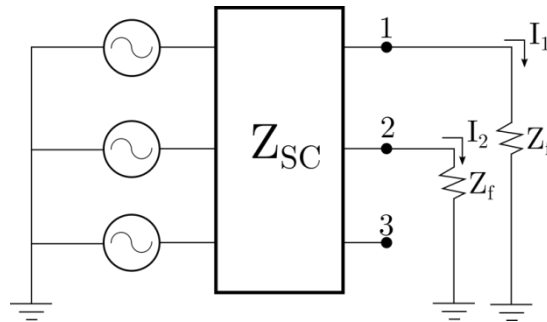
Opción A:

new fault.LLG_a bus1=busX.1.1 bus2=busX.2.0 phases=2 r=0.0001



Opción B:

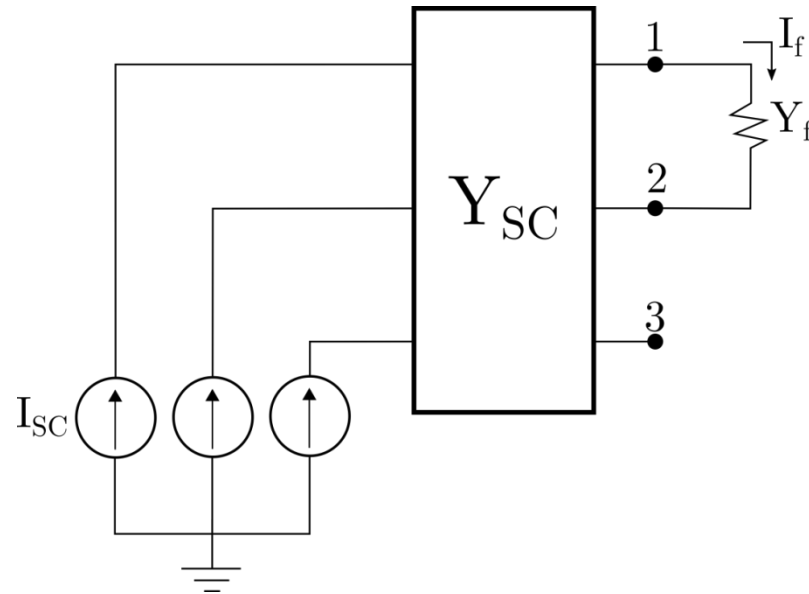
new fault.LLG_b bus1=busX.1.2 bus2=busX.0.0 phases=2 r=0.0001



Fallas en OpenDSS

Falla línea a línea (fases ab):

new fault.LL bus1=busX.1 bus2=busX.2 **phases=1** r=0.0001



Ejemplo 4:

Utilice OpenDSS para determinar la corriente de falla trifásica a tierra en la barra de 230 kV:

$$Z_1 = 1.39037 + j13.8314 \Omega$$

$$Z_0 = 1.28704 + j9.18706 \Omega$$

Solución:

```
clear
set defaultbasefrequency=60

new circuit.ejemplo4_fallas BasekV=230 pu=1.00 angle=0 frequency=60 phases=3 r1=1.39037 x1=13.83140 r0=1.28704 x0=9.18706

solve
export Y

solve mode=dynamic number=1
new fault.falla3F bus1=sourcebus.1.2.3 bus2=sourcebus.0.0.0 phases=3 r=0.00001

solve
```


Ejemplo 4:

(Currents into element from indicated bus)

Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j (Imag)
ELEMENT = "Vsource.SOURCE"					
SOURCEBUS	1	9552.5 /_	95.7 =	-955.44 +j	9504.6
SOURCEBUS	2	9552.5 /_	-24.3 =	8709 +j	-3924.9
SOURCEBUS	3	9552.5 /_	-144.3 =	-7753.5 +j	-5579.7

SOURCEBUS	0	9552.5 /_	-84.3 =	955.44 +j	-9504.6
SOURCEBUS	0	9552.5 /_	155.7 =	-8709 +j	3924.9
SOURCEBUS	0	9552.5 /_	35.7 =	7753.5 +j	5579.7
ELEMENT = "Fault.FALLA3F"					
SOURCEBUS	1	9552.5 /_	-84.3 =	955.44 +j	-9504.6
SOURCEBUS	2	9552.5 /_	155.7 =	-8709 +j	3924.9
SOURCEBUS	3	9552.5 /_	35.7 =	7753.5 +j	5579.7

SOURCEBUS	0	9552.5 /_	95.7 =	-955.44 +j	9504.6
SOURCEBUS	0	9552.5 /_	-24.3 =	8709 +j	-3924.9
SOURCEBUS	0	9552.5 /_	-144.3 =	-7753.5 +j	-5579.7
=====					

Respuesta ejemplo 3:

$$I_{SC} = \begin{bmatrix} 9.5525 \angle -84.26^\circ \\ 9.5525 \angle +155.7^\circ \\ 9.5525 \angle +35.74^\circ \end{bmatrix} \text{ kA}$$

Ejemplo 5:

Utilice OpenDSS para determinar las corrientes y tensiones durante falla monofásica a tierra en la barra de 230 kV. La resistencia de falla es 0.01 Ω :

Solución:

```
clear
set defaultbasefrequency=60

new circuit.ejemplo5_fallas BasekV=230 pu=1.00 angle=0 frequency=60 phases=3 r1=1.39037 x1=13.83140 r0=1.28704 x0=9.18706

solve
export Y

solve mode=dynamic number=1
new fault.falla1F bus1=sourcebus.1 bus2=sourcebus.0 phases=1 r=0.01

solve
```

Ejemplo 5:

CIRCUIT ELEMENT CURRENTS

(Currents into element from indicated bus)

Power Delivery Elements

Bus	Phase	Magnitude, A	Angle	(Real)	+j (Imag)
ELEMENT = "Vsource.SOURCE"					
SOURCEBUS	1	10744 /_	96.3 =	-1187.5 +j	10679
SOURCEBUS	2	0 /_	0.0 =	0 +j	0
SOURCEBUS	3	9.0949E-013 /_	90.0 =	0 +j	9.0949E-013

SOURCEBUS	0	10744 /_	-83.7 =	1187.5 +j	-10679
SOURCEBUS	0	0 /_	0.0 =	0 +j	0
SOURCEBUS	0	9.0949E-013 /_	-90.0 =	0 +j	-9.0949E-013
ELEMENT = "Fault.FALLA1F"					
SOURCEBUS	1	10744 /_	-83.7 =	1187.5 +j	-10679

SOURCEBUS	0	10744 /_	96.3 =	-1187.5 +j	10679

Referencias

- W.H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis”, CRC Press, 3rd edition, 2012
- T.A. Short, “Electric Power Distribution Handbook”, CRC Press, 2nd edition, 2014
- T. Gönen, “Electric Power Distribution System Engineering”, CRC Press, 2nd edition, 2008.
- R. Dugan, “Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)

Muchas gracias por su atención

Dr. Jairo Quirós-Tortós
Consultor
jairoquirotortos@ieee.org



