

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.1 Generalidades

El cortocircuito es un defecto de impedancia despreciable entre partes activas, que en condiciones normales están a distinto potencial.

6.2 Tipos de fallos

Tipos de defectos

En una red trifásica pueden presentarse los siguientes tipos de defecto:

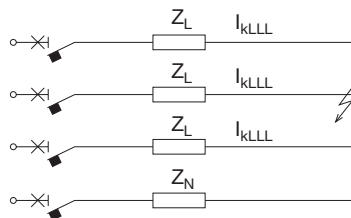
- defecto trifásico
- defecto bifásico
- defecto fase-neutro
- defecto fase-PE.

En las fórmulas se utilizan los siguientes símbolos:

- I_k corriente de cortocircuito
- U_r tensión asignada
- Z_L impedancia de línea
- Z_N impedancia del neutro
- Z_{PE} impedancia del conductor de protección.

La siguiente tabla muestra de forma resumida los tipos de defectos y las relaciones entre el valor de la corriente de cortocircuito por defecto simétrico (trifásico) y la corriente de cortocircuito por defecto asimétrico (bifásico y monofásico) debidos a defectos alejados de generadores. Para un cálculo más preciso, se aconseja el uso del software DOCWin.

Defecto trifásico

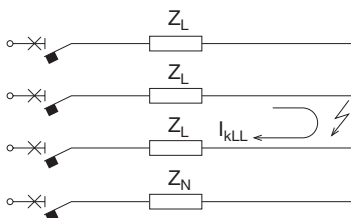


$$I_{kLLL} = \frac{U_r}{\sqrt{3} Z_L}$$

donde

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}$$

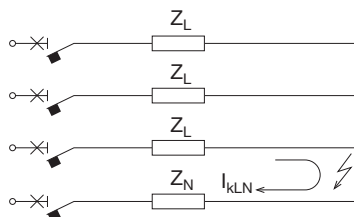
Defecto bifásico



$$I_{kLL} = \frac{U_r}{2Z_L} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{kLLL} = 0.87 I_{kLLL}$$

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Defecto fase-neutro



$$I_{kLN} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_N)}$$

Si $Z_L = Z_N$ (sección del neutro igual a la de la fase):

$$I_{kLN} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_N)} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(2Z_L)} = 0.5 I_{kLLL}$$

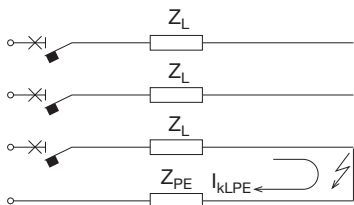
Si $Z_N = 2Z_L$ (sección del neutro mitad de la fase):

$$I_{kLN} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_N)} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(3Z_L)} = 0.33 I_{kLLL}$$

Si $Z_N = 0$ condición límite:

$$I_{kLN} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_N)} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L)} = I_{kLLL}$$

Defecto fase-PE



$$I_{kLPE} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_{PE})}$$

Si $Z_L = Z_{PE}$ (sección del conductor de protección igual a la de la fase):

$$I_{kLPE} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_{PE})} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(2Z_L)} = 0.5 I_{kLLL}$$

Si $Z_{PE} = 2Z_L$ (sección del conductor de protección mitad de la fase):

$$I_{kLPE} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_{PE})} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(3Z_L)} = 0.33 I_{kLLL}$$

Si $Z_{PE} = 0$ caso límite:

$$I_{kLPE} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L + Z_{PE})} = \frac{U_r}{\sqrt{3}(Z_L)} = I_{kLLL}$$

La siguiente tabla permite calcular de forma rápida el valor aproximado de una corriente de cortocircuito.

Nota	Cortocircuito trifásico	Cortocircuito bifásico	Cortocircuito fase-neutro	Cortocircuito fase-PE (sistemas TN)
	I_{kLLL}	I_{kLL}	I_{kLN}	I_{kLPE}
I_{kLLL}	-	$I_{kLL} = 0.87 I_{kLLL}$	$I_{LN} = 0.5 I_{kLLL} (Z_L = Z_N)$ $I_{LN} = 0.33 I_{kLLL} (Z_L = 0.5 Z_N)$ $I_{LN} = I_{kLLL} (Z_N = 0)$	$I_{LPE} = 0.5 I_{kLLL} (Z_L = Z_{PE})$ $I_{LPE} = 0.33 I_{kLLL} (Z_L = 0.5 Z_{PE})$ $I_{LPE} = I_{kLLL} (Z_{PE} = 0)$
I_{kLL}	$I_{kLLL} = 1.16 I_{kLL}$	-	$I_{kLN} = 0.58 I_{kLL} (Z_L = Z_N)$ $I_{kLN} = 0.38 I_{kLL} (Z_L = 0.5 Z_N)$ $I_{kLN} = 1.16 I_{kLL} (Z_N = 0)$	$I_{kLPE} = 0.58 I_{kLL} (Z_L = Z_{PE})$ $I_{kLPE} = 0.38 I_{kLL} (Z_L = 0.5 Z_{PE})$ $I_{kLPE} = 1.16 I_{kLL} (Z_{PE} = 0)$
I_{kLN}	$I_{kLLL} = 2 I_{kLN} (Z_L = Z_N)$ $I_{kLLL} = 3 I_{kLN} (Z_L = 2 Z_N)$ $I_{kLLL} = I_{kLN} (Z_N = 0)$	$I_{kLL} = 1.73 I_{kLN} (Z_L = Z_N)$ $I_{kLL} = 2.6 I_{kLN} (Z_L = 2 Z_N)$ $I_{kLL} = 0.87 I_{kLN} (Z_N = 0)$	-	

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.3 Determinación de la corriente de cortocircuito: “método de las potencias”

La corriente de cortocircuito se puede determinar utilizando el “método de las potencias”. Este método permite determinar de forma sencilla la corriente de cortocircuito en un punto de la instalación que, por lo general, ofrece un valor aceptable. Sin embargo, este método no es fiable y ofrece valores más precisos cuanto más similares son los factores de potencia de los componentes considerados (red, generadores, transformadores, motores y cables de gran sección, etc.).

El “método de la potencia de cortocircuito” calcula la corriente de cortocircuito I_k a partir de la fórmula:

$$\text{Cortocircuito trifásico} \quad I_k = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot U_r}$$

$$\text{Cortocircuito bifásico} \quad I_k = \frac{S_k}{2 \cdot U_r}$$

donde:

- S_k es la potencia aparente de cortocircuito vista desde el punto de defecto
- U_r es la tensión asignada.

Para determinar la potencia aparente de cortocircuito S_k se deben considerar todos los componentes de la red, que pueden ser:

- componentes que facilitan un aporte a la corriente de cortocircuito: red, generadores, motores;
- componentes que limitan o reducen el valor de la corriente de cortocircuito: conductores y transformadores.

El procedimiento para calcular la corriente de cortocircuito contempla las siguientes fases:

1. cálculo de la potencia de cortocircuito de los diversos componentes de la instalación
2. cálculo de la potencia de cortocircuito en el punto de defecto
3. cálculo de la corriente de cortocircuito.

6.3.1 Cálculo de la corriente de cortocircuito para los diversos componentes de la instalación

Primero hay que determinar la potencia aparente de cortocircuito S_k para todos los componentes que conforman la instalación:

Red

Por red eléctrica se considera todo lo que se encuentra aguas arriba del punto de suministro de energía.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Generalmente la compañía suministradora de energía facilita como dato la potencia aparente de cortocircuito S_{knet} en el punto de suministro; en cambio, si facilitara el valor de la corriente de cortocircuito I_{knet} , el valor de la potencia se podrá deducir, para un sistema trifásico, a través de la siguiente fórmula:

$$S_{knet} = \sqrt{3} U_r I_{knet}$$

donde U_r es la tensión asignada en el punto de suministro de la energía.

Si los referidos datos no resultaran disponibles, como referencia podrán considerarse los valores de S_{knet} que se indican en la siguiente tabla:

Tensión asignada de red U_r [kV]	Potencia aparente de cortocircuito S_{knet} [MVA]
Up to 20	500
Up to 32	750
Up to 63	1000

Generador

La potencia de cortocircuito se obtiene de:

$$S_{kgen} = \frac{S_r \cdot 100}{X_d' \%}$$

donde $X_d' \%$ es el valor porcentual de la reactancia subtransitoria (X_d'), la reactancia transitoria (X_d'') o la reactancia síncrona (X_d), en base al instante en el cual se pretenda evaluar el valor de la potencia de cortocircuito.

Las reactancias en general se expresan en porcentaje de la impedancia asignada del generador, dada por:

$$Z_d = \frac{U_r^2}{S_r}$$

donde U_r y S_r son la tensión asignada y la potencia asignada del generador. Los valores típicos pueden ser:

- X_d' de 10 % a 20 %;
- X_d'' de 15 % a 40 %;
- X_d de 80 % a 300 %.

Normalmente se considera la condición más desfavorable; es decir, se utiliza la reactancia subtransitoria.

La siguiente tabla facilita algunos valores aproximados de la potencia de cortocircuito de los generadores ($X_d' = 12.5 \%$):

S_r [kVA]	50	63	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000
S_{kgen} [MVA]	0.4	0.5	1.0	1.3	1.6	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.4	8.0	10.0	12.8	16.0	20.0	25.6	32.0

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Motores asíncronos trifásicos

En caso de cortocircuito, los motores eléctricos proporcionan un aporte por un breve periodo (5-6 periodos).

La potencia puede calcularse en función de la corriente de cortocircuito del motor (I_k) a través de la siguiente ecuación:

$$S_{\text{kmot}} = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot I_k$$

Valores típicos son:

$$S_{\text{kmot}} = 5-7 S_{\text{mot}}$$

(típicamente I_k vale alrededor de 5-7 I_{mot} : 5 para motores de poca potencia y 7 para motores de potencia más elevada).

Transformadores

La potencia de cortocircuito del transformador S_{ktrafo} se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_{\text{ktrafo}} = \frac{100}{u_k \%} \cdot S_r$$

La siguiente tabla facilita algunos valores aproximados de la potencia de cortocircuito de los transformadores:

S_r [kVA]	50	63	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000
u_k %	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6
S_{ktrafo} [MVA]	1.3	1.6	3.1	4	5	6.3	8	10	12.5	15.8	16	20	25	26.7	33.3			

Cables

La potencia de cortocircuito de los cables, es:

$$S_{\text{kcable}} = \frac{U_r^2}{Z_c}$$

donde la impedancia del cable Z_c es:

$$I_{\text{kLLL}} = \frac{U_r}{\sqrt{3} Z_L}$$

donde

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}$$

La siguiente tabla facilita algunos valores aproximados de la potencia de cortocircuito de los cables, a 50 Hz y a 60 Hz, en función de la tensión de alimentación (longitud del cable = 10 m):

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

S [mm²]	230 [V]	400 [V]	440 [V]	500 [V]	690 [V]	230 [V]	400 [V]	440 [V]	500 [V]	690 [V]
	S _{kable} [MVA] @50 Hz					S _{kable} [MVA] @60 Hz				
1.5	0.44	1.32	1.60	2.07	3.94	0.44	1.32	1.60	2.07	3.94
2.5	0.73	2.20	2.66	3.44	6.55	0.73	2.20	2.66	3.44	6.55
4	1.16	3.52	4.26	5.50	10.47	1.16	3.52	4.26	5.50	10.47
6	1.75	5.29	6.40	8.26	15.74	1.75	5.29	6.40	8.26	15.73
10	2.9	8.8	10.6	13.8	26.2	2.9	8.8	10.6	13.7	26.2
16	4.6	14.0	16.9	21.8	41.5	4.6	13.9	16.9	21.8	41.5
25	7.2	21.9	26.5	34.2	65.2	7.2	21.9	26.4	34.1	65.0
35	10.0	30.2	36.6	47.3	90.0	10.0	30.1	36.4	47.0	89.6
50	13.4	40.6	49.1	63.4	120.8	13.3	40.2	48.7	62.9	119.8
70	19.1	57.6	69.8	90.1	171.5	18.8	56.7	68.7	88.7	168.8
95	25.5	77.2	93.4	120.6	229.7	24.8	75.0	90.7	117.2	223.1
120	31.2	94.2	114.0	147.3	280.4	29.9	90.5	109.5	141.5	269.4
150	36.2	109.6	132.6	171.2	326.0	34.3	103.8	125.6	162.2	308.8
185	42.5	128.5	155.5	200.8	382.3	39.5	119.5	144.6	186.7	355.6
240	49.1	148.4	179.5	231.8	441.5	44.5	134.7	163.0	210.4	400.7
300	54.2	164.0	198.4	256.2	488.0	48.3	146.1	176.8	228.3	434.7

Con n cables en paralelo se deberá multiplicar el valor de la tabla por n.

Si la longitud del cable (L_{act}) es diferente de 10 metros, se deberá multiplicar el valor de la tabla por el siguiente coeficiente:

$$\frac{10}{L_{act}}$$

6.3.2 Cálculo de la potencia aparente de cortocircuito en un punto de la instalación

La regla para determinar la potencia de cortocircuito en un punto de la instalación, en función de la potencia de cortocircuito de los diversos componentes del circuito, es análoga a la referente al cálculo de la admitancia equivalente. En particular:

- la potencia de **componentes en serie equivalente** al inverso de la suma de los inversos de cada potencia (igual que para el paralelo de impedancias);

$$S_k = \frac{1}{\sum \frac{1}{S_i}}$$

- La potencia de cortocircuito de **componentes en paralelo equivalente** a la suma de cada potencia de cortocircuito (igual que para la serie de impedancias).

$$S_k = \sum S_i$$

Los componentes del circuito se consideran en serie o en paralelo observando el circuito desde el punto de defecto.

En el caso de diversas ramas en paralelo, una vez calculada la corriente de cortocircuito en el punto de defecto, se deberá determinar la repartición del mismo en las diversas ramas de forma que se efectúe una correcta elección de los aparatos de protección instalados en las distintas ramas.

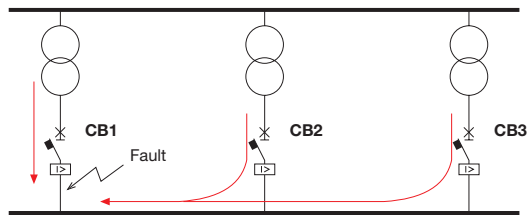
6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.3.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Para determinar la corriente de cortocircuito en una instalación, se deberá considerar el punto de defecto y la configuración del sistema que hace máxima la corriente de cortocircuito que circula a través del aparato; de precisarse, se considera el aporte de los motores.

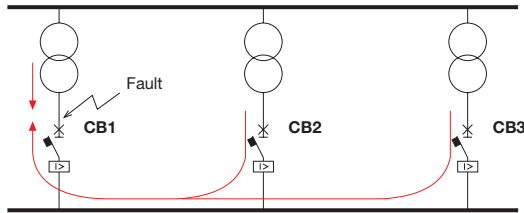
Por ejemplo, en el caso que se indica a continuación, para el interruptor automático CB1 la condición más pesada se presenta cuando el defecto se encuentra inmediatamente aguas arriba del propio interruptor automático. Para determinar el poder de corte del mismo, se deberá considerar el aporte de dos transformadores en paralelo.

Defecto inmediatamente aguas abajo de CB1



1SDC010051F0001

Defecto inmediatamente aguas arriba de CB1
(condición más pesada para CB1)



1SDC010051F0001

Tras haber determinado la potencia de cortocircuito equivalente en el punto de defecto, la corriente de cortocircuito se calcula mediante la siguiente fórmula:

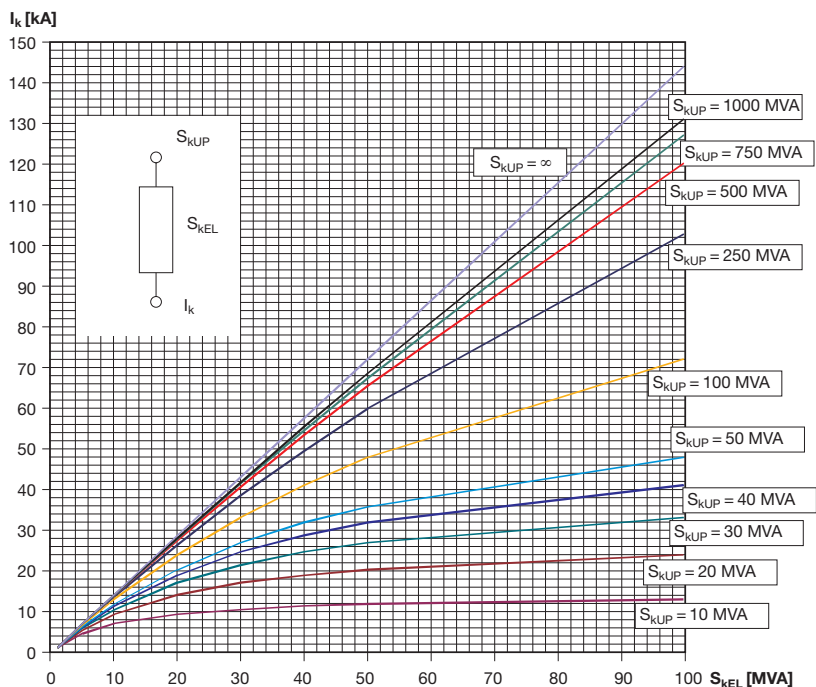
Cortocircuito trifásico
$$I_k = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot U_r}$$

Cortocircuito bifásico
$$I_k = \frac{S_k}{2 \cdot U_r}$$

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Como primera aproximación, es posible –utilizando el siguiente ábaco– calcular la corriente de cortocircuito trifásica aguas abajo de un objeto del cual se conoce el valor de la potencia de cortocircuito (S_{kEL}); en correspondencia con dicho valor y conocida la potencia de cortocircuito aguas arriba del objeto (S_{kUP}), en las ordenadas se lee el valor de I_k , expresado en kA, a 400 V.

Figura 1: Ábaco para el cálculo de la corriente de cortocircuito trifásica a 400 V



1SDC010052F0001

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.3.4 Ejemplos

Los siguientes ejemplos muestran el cálculo de la corriente de cortocircuito en algunos tipos de instalación.

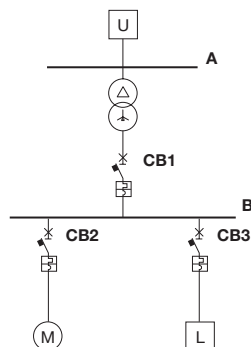
Ejemplo 1

Red aguas arriba: $U_r = 20000 \text{ V}$
 $S_{knet} = 500 \text{ MVA}$

Transformador: $S_r = 1600 \text{ kVA}$
 $u_k \% = 6\%$
 $U_{1r} / U_{2r} = 20000 / 400$

Motor: $P_r = 220 \text{ kW}$
 $I_{kmot} / I_r = 6.6$
 $\cos \varphi_r = 0.9$
 $\eta = 0.917$

Carga genérica: $I_{rL} = 1443.4 \text{ A}$
 $\cos \varphi_r = 0.9$



1SDC010053P0001

Cálculo de las potencias de cortocircuito para los diversos componentes

Red: $S_{knet} = 500 \text{ MVA}$

Transformador: $S_{ktrafo} = \frac{100}{u_k \%} \cdot S_r = 26.7 \text{ MVA}$

Motor: $S_{rmot} = \frac{P_r}{\eta \cdot \cos \varphi_r} = 267 \text{ kVA}$

$S_{kmot} = 6.6 \cdot S_{rmot} = 1.76 \text{ MVA}$ para los primeros 5-6 períodos (aprox. 100 ms a 50Hz)

Cálculo de la corriente de cortocircuito para poder elegir los interruptores automáticos

Elección de CB1

Para el interruptor automático CB1, la condición más pesada es cuando el defecto se presenta inmediatamente aguas abajo del automático mismo; de hecho, en caso de defecto inmediatamente aguas arriba, a través del interruptor automático circularía sólo la corriente de defecto procedente del motor, la cual es considerablemente inferior al aporte de la red.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

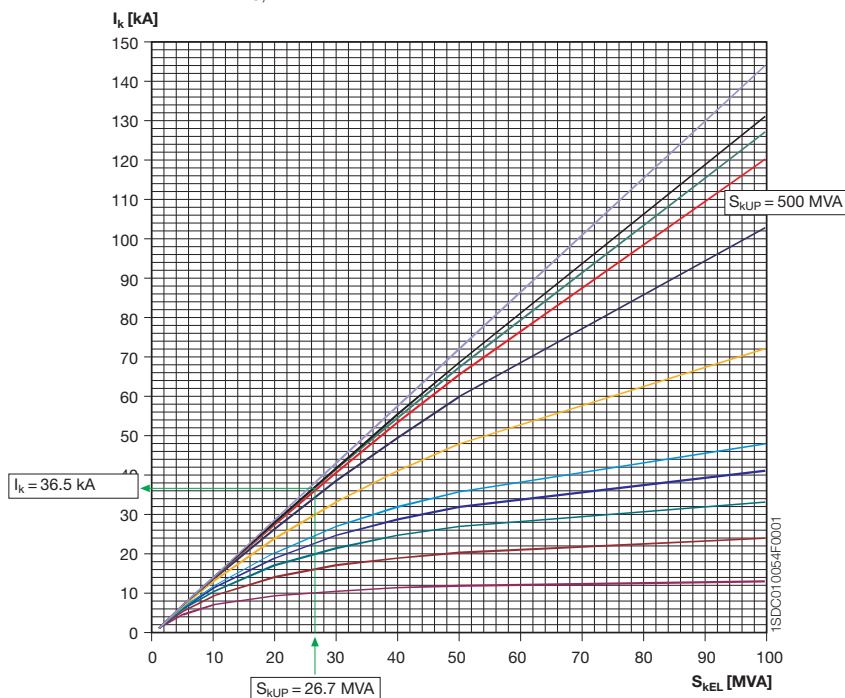
El circuito, visto desde el punto de defecto, consta de la serie de la red y el transformador. Siguiendo las reglas anteriormente enunciadas, la potencia de cortocircuito se determina a través de la siguiente ecuación:

$$S_{kCB1} = \frac{S_{knet} \cdot S_{ktrafo}}{S_{knet} + S_{ktrafo}} = 25.35 \text{ MVA}$$

La corriente de defecto máxima vale:

$$I_{kCB1} = \frac{S_{kCB1}}{\sqrt{3} \cdot U_r} = 36.6 \text{ kA}$$

La corriente nominal en el secundario del transformador vale 2309 A; en consecuencia, el interruptor automático que debe elegirse es un Emax E3N 2500. Utilizando el gráfico que se muestra en la Figura 1, es posible obtener I_{kCB1} de la curva con $S_{kUP} = S_{knet} = 500 \text{ MVA}$ en correspondencia con $S_{kEL} = S_{ktrafo} = 26,7 \text{ MVA}$:



6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Elección de CB2

Para el interruptor automático CB2, la condición más pesada es cuando el defecto se presenta inmediatamente aguas abajo del interruptor automático mismo; en consecuencia, el circuito –visto desde el punto de defecto– consta de la serie de la red y el transformador. La corriente de cortocircuito resulta idéntica a la que debe utilizarse para CB1.

$$I_{kCB1} = \frac{S_{kCB1}}{\sqrt{3} \cdot U_r} = 36.6 \text{ kA}$$

La corriente asignada del motor equivale a 385 A. El interruptor automático que debe elegirse es un Tmax T5H 400.

Elección de CB3

También para el interruptor automático CB3 la condición más pesada es cuando el defecto se presenta inmediatamente aguas abajo del interruptor automático mismo.

El circuito, visto desde el punto de defecto, consta de dos ramas en paralelo: el motor y la serie de red y transformador. Siguiendo las reglas anteriormente explicadas, la potencia de cortocircuito se determina a través de la siguiente fórmula:

Motor // (Red + Transformador)

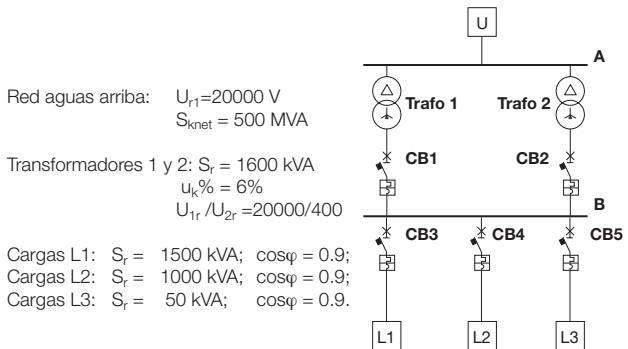
$$S_{kCB3} = S_{kmot} + \frac{1}{\frac{1}{S_{knet}} + \frac{1}{S_{ktrafo}}} = 27.11 \text{ MVA}$$

$$I_{kCB3} = \frac{S_{kCB3}}{\sqrt{3} \cdot U_r} = 39.13 \text{ kA}$$

La corriente nominal de la carga L vale 1443 A; el interruptor automático que debe elegirse es un SACE Isomax S7S 1600 o un Emax E2N1600.

Ejemplo 2

Considérese ahora el circuito que se muestra en la figura, constituido por la alimentación, dos transformadores en paralelo y tres cargas.



6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Cálculo de las potencias de cortocircuito de los diversos componentes:

Red $S_{knet} = 500 \text{ MVA}$

Transformadores 1 y 2 $S_{ktrafo} = \frac{S_r}{u_k \%} \cdot 100 = 26.7 \text{ MVA}$

Elección de CB1 (CB2)

Para el interruptor automático CB1 (CB2) la condición más pesada es cuando el defecto se presenta inmediatamente aguas abajo del mismo. Siguiendo las reglas anteriormente explicadas, el circuito –visto desde el punto de defecto– consta del paralelo de los dos transformadores conectados en serie con la red: Red + (Trafo1 // Trafo2).

La corriente de cortocircuito que se obtiene de esta forma corresponde a la corriente de cortocircuito de la barra. Esta corriente, dada la simetría del circuito, se distribuye de manera uniforme en las dos ramas (mitad cada una). La corriente que circula a través de CB1 (CB2) resulta entonces equivalente a la mitad de la que circula por la barra.

$$S_{kbusbar} = \frac{S_{knet} \cdot (S_{rtrafo1} + S_{ktrafo2})}{S_{knet} + (S_{ktrafo1} + S_{ktrafo2})} = 48.2 \text{ MVA}$$

$$I_{kbusbar} = \frac{S_{kbusbar}}{\sqrt{3} \cdot U_r} = 69.56 \text{ kA}$$

$$I_{kCB1(2)} = \frac{I_{kbusbar}}{2} = 34.78 \text{ kA}$$

Los interruptores automáticos CB1 (CB2) que deben elegirse con referencia a la corriente asignada de los transformadores son Emax E3N 2500.

Elección de CB3-CB4-CB5

Para estos interruptores automáticos la condición más desfavorable se tiene con un defecto inmediatamente aguas abajo de los mismos; en consecuencia, la corriente de cortocircuito que debe considerarse es la de la barra:

$$I_{kCB3} = I_{kbusbar} = 69.56 \text{ kA}$$

Los interruptores automáticos que deben elegirse con referencia a la corriente de las cargas son:

CB3: Emax E3S 2500

CB4: Emax E3S 1600

CB5: Tmax T2H 160

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.4 Determinación de la corriente de cortocircuito

I_k aguas abajo de un cable en función de la corriente aguas arriba

La siguiente tabla permite determinar, de forma conservativa, la corriente de cortocircuito trifásica en un punto de la red de 400 V aguas abajo de un cable unipolar de cobre a la temperatura de 20°C.

Los valores conocidos son:

- la corriente de cortocircuito trifásica aguas arriba del cable
- la longitud y la sección del cable.

Sección cable [mm ²]	Longitud [m]																								
1.5	0.9 1.1 1.4 1.8 2.5 3.5 5.3 7 9.4 14																								
2.5	0.9 1 1.2 1.5 1.8 2.3 2.9 4.1 5.9 8.8 12 16 24																								
4	0.9 1.2 1.4 1.6 1.9 2.3 2.8 3.7 4.7 6.6 9.4 14 19 25 38																								
6	0.8 1.1 1.4 1.8 2.1 2.5 2.8 3.5 4.2 5.6 7 10 14 21 28 38 56																								
10	0.9 1.2 1.4 1.9 2.3 2.9 3.5 4.1 4.7 5.8 7 9.4 12 16 23 35 47 63 94																								
16	0.9 1.1 1.5 1.9 2.2 3 3.7 4.7 5.6 6.5 7.5 9.3 11 15 19 26 37 56 75 100 150																								
25	0.9 1.2 1.4 1.7 2.3 2.9 3.5 4.6 5.8 7.2 8.7 10 12 14 17 23 29 41 58 87 116 155 233																								
35	1.2 1.6 2 2.4 3.2 4 4.8 6.4 8 10 12 14 16 20 24 32 40 56 80 121 161 216 324																								
50	1.1 1.7 2.3 2.8 3.4 4.5 5.7 6.8 9 11 14 17 20 23 28 34 45 57 79 113 170 226 303 455																								
70	0.8 1.5 2.3 3.1 3.8 4.6 6.2 7.7 9.2 12 15 19 23 27 31 38 46 62 77 108 154 231 308 413																								
95	1 2 3 4 5 6 8 10 12 16 20 25 30 35 40 50 60 80 100 140 200 300 400																								
120	1.2 2.4 3.6 4.8 6 7.2 10 12 14 19 24 30 36 42 48 60 72 96 120 168 240 360 481																								
150	1.4 2.8 4.2 5.6 7 8.4 11 14 17 23 28 35 42 49 56 70 84 113 141 197 281 422																								
185	1.6 3.2 4.8 6.4 8 10 13 16 19 26 32 40 48 56 64 80 96 128 160 224 320 480																								
240	1.8 3.7 5.5 7.3 9.1 11 15 18 22 29 37 46 55 64 73 91 110 146 183 256 366 549																								
300	2 4 6 8 10 12 16 20 24 32 40 50 60 70 80 100 120 160 200 280 400																								
2x120	2.4 4.8 7.2 10 12 14 19 24 29 38 48 60 72 84 96 120 144 192 240 336 481																								
2x150	2.8 5.6 8.4 11 14 17 23 28 34 45 56 70 84 98 113 141 169 225 281 394 563																								
2x185	3.2 6.4 10 13 16 19 26 32 38 51 64 80 96 112 128 160 192 256 320 448																								
3x120	3.6 7.2 11 14 18 22 29 36 43 58 72 90 108 126 144 180 216 288 360 505																								
3x150	4.2 8.4 13 17 21 25 34 42 51 68 84 105 127 148 169 211 253 338 422																								
3x185	4.8 10 14 19 24 29 38 48 58 77 96 120 144 168 192 240 288 384 480																								
I _k aguas arriba [kA]	I _k aguas abajo [kA]																								
100	96	92	89	85	82	78	71	65	60	50	43	36	31	27	24	20	17	13	11	7.8	5.6	3.7	2.7	2.0	1.3
90	86	83	81	78	76	72	67	61	57	48	42	35	31	27	24	20	17	13	11	7.8	5.6	3.7	2.7	2.0	1.3
80	77	75	73	71	69	66	62	57	53	46	40	34	30	27	24	20	17	13	10	7.7	5.5	3.7	2.7	2.0	1.3
70	68	66	65	63	62	60	56	53	49	43	38	33	29	26	23	19	16	13	10	7.6	5.5	3.7	2.7	2.0	1.3
60	58	57	56	55	54	53	50	47	45	40	36	31	28	25	23	19	16	12	10	7.5	5.4	3.7	2.7	2.0	1.3
50	49	48	47	46	45	44	43	41	39	35	32	29	26	23	21	18	15	12	10	7.3	5.3	3.6	2.6	2.0	1.3
40	39	39	38	38	37	37	35	34	33	31	28	26	24	22	20	17	15	12	10	7.1	5.2	3.6	2.6	2.0	1.3
35	34	34	34	33	33	32	32	31	30	28	26	24	22	20	19	16	14	11	10	7.1	5.1	3.5	2.6	2.0	1.3
30	30	29	29	29	28	28	28	27	26	25	23	22	20	19	18	16	14	11	9.3	7.0	5.0	3.5	2.6	1.9	1.3
25	25	24	24	24	24	24	23	23	22	21	21	19	18	17	16	14	13	11	9.0	6.8	5.0	3.4	2.6	1.9	1.3
20	20	20	20	19	19	19	19	18	18	18	17	16	15	15	14	13	12	10	8.4	6.5	4.8	3.3	2.5	1.9	1.3
15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	13	13	12	12	12	11	10	8.7	7.6	6.1	4.6	3.2	2.5	1.9	1.3
12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	10	10	10	9.3	8.8	7.8	7.0	5.7	4.4	3.1	2.4	1.9	1.3
10	10	10	10	10	10	10	10	9.5	9.4	9.2	9.0	8.8	8.5	8.3	8.1	7.7	7.3	6.5	5.9	5.0	3.9	2.9	2.3	1.8	1.2
8.0	8.0	7.9	7.9	7.9	7.8	7.8	7.7	7.7	7.6	7.5	7.4	7.2	7.1	6.9	6.8	6.5	6.2	5.7	5.2	4.5	3.7	2.8	2.2	1.7	1.2
6.0	6.0	5.9	5.9	5.9	5.9	5.8	5.8	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	4.9	4.8	4.4	4.1	3.6	3.1	2.4	2.0	1.6	1.1
3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.2	2.0	1.7	1.4	1.2	0.9

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

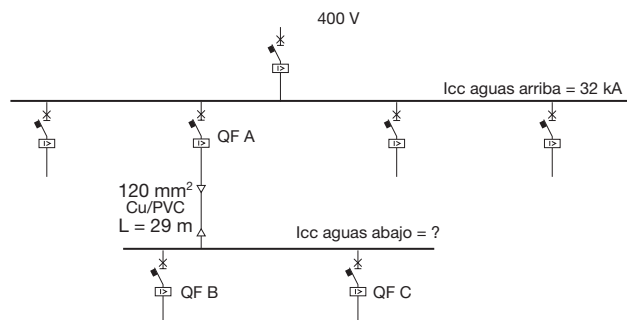
Notas para la utilización de la tabla:

- Si la I_k aguas arriba y la longitud del cable no se indicaran en la tabla, se deberá considerar:
 - el valor inmediatamente superior de la I_k aguas arriba
 - el valor inmediatamente inferior para la longitud del cable.Estas aproximaciones permiten realizar un cálculo a favor de la seguridad.
- Si algunos cables en paralelo no se indicaran en la tabla, se deberá dividir la longitud por el número de cables en paralelo.

Ejemplo

Datos
Tensión asignada = 400 V
Sección cable = 120 mm²
Conductor = cobre
Longitud = 29 m

Corriente de cortocircuito
aguas arriba = 32 kA



1SDC010056F0001

Procedimiento

En la línea correspondiente a la sección del cable 120 mm² se identifica la columna con una longitud de 29 metros o inmediatamente inferior (en este caso 24). En la columna de la corriente de cortocircuito aguas arriba se identifica la línea con un valor de 32 kA o inmediatamente superior (en este caso 35). A través de la intersección de esta última línea con la columna anteriormente identificada, se lee el valor de la corriente de cortocircuito aguas abajo de 26 kA.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.5 Álgebra de secuencias

6.5.1 Generalidades

Existe la posibilidad de contemplar una red trifásica simétrica y equilibrada de forma sencilla, mediante la reducción de la red trifásica a una única fase con el mismo valor de tensión asignada que la tensión entre fases del sistema trifásico.

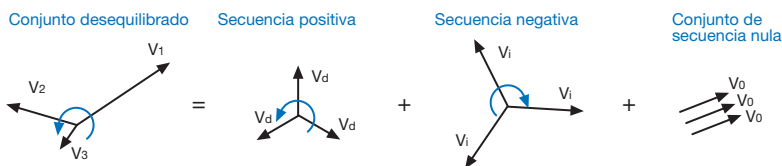
Las redes asimétricas no se pueden reducir al estudio de una red de una sola fase debido a este desequilibrio. En este caso, en el que resulta imposible realizar simplificación alguna, es necesario proceder según los métodos de análisis típicos para la solución de los sistemas eléctricos.

La técnica de modelado, que permite calcular una red asimétrica y desequilibrada convirtiéndola en un conjunto de tres redes equilibradas cada una de las cuales puede ser representada por un circuito equivalente de una fase, es el método de los componentes simétricos.

Este método se obtiene a partir de las consideraciones matemáticas según las cuales un conjunto de tres fasores¹ se puede dividir en tres conjuntos de fasores con las siguientes características:

- un conjunto equilibrado, llamado *secuencia positiva*, formado por tres fasores de igual magnitud desplazados a 120° y con la misma secuencia de fase que el sistema original
- un conjunto equilibrado, llamado *secuencia negativa*, formado por tres fasores de igual magnitud desplazados a 120° y con una secuencia de fase inversa respecto al sistema original
- un conjunto de *secuencia nula* formado por tres fasores de igual magnitud en la fase.

Figura 1



¹ El fasor es una representación vectorial de magnitud que varía en el tiempo. Una señal del tipo $v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$ se representa mediante el fasor $\bar{v} = V \cdot e^{j\varphi}$

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.5.2 Sistemas de secuencia positiva, negativa y nula

Las siguientes relaciones* representan la conexión entre los valores de la red trifásica equilibrada y los sistemas de secuencia positiva, negativa y nula:

$\bar{V}_0 = \frac{1}{3} (\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3)$	$\bar{I}_0 = \frac{1}{3} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3)$	$\bar{V}_1 = \bar{V}_0 + \bar{V}_d + \bar{V}_i$	$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_d + \bar{I}_i$
$\bar{V}_d = \frac{1}{3} (\bar{V}_1 + \alpha \cdot \bar{V}_2 + \alpha^2 \cdot \bar{V}_3)$	$\bar{I}_d = \frac{1}{3} (\bar{I}_1 + \alpha \cdot \bar{I}_2 + \alpha^2 \cdot \bar{I}_3)$	$\bar{V}_2 = \bar{V}_0 + \alpha^2 \cdot \bar{V}_d + \alpha \cdot \bar{V}_i$	$\bar{I}_2 = \bar{I}_0 + \alpha^2 \cdot \bar{I}_d + \alpha \cdot \bar{I}_i$
$\bar{V}_i = \frac{1}{3} (\bar{V}_1 + \alpha^2 \cdot \bar{V}_2 + \alpha \cdot \bar{V}_3)$	$\bar{I}_i = \frac{1}{3} (\bar{I}_1 + \alpha^2 \cdot \bar{I}_2 + \alpha \cdot \bar{I}_3)$	$\bar{V}_3 = \bar{V}_0 + \alpha \cdot \bar{V}_d + \alpha^2 \cdot \bar{V}_i$	$\bar{I}_3 = \bar{I}_0 + \alpha \cdot \bar{I}_d + \alpha^2 \cdot \bar{I}_i$

* En las fórmulas, los subíndices relativos a los componentes de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia nula están representados por "d", "i" y "0" respectivamente.

$$\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

La constante compleja es un versor que, multiplicado por un vector, gira el vector 120° en una dirección positiva (en sentido contrario a las agujas del reloj).

$$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

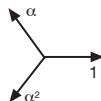
La constante compleja realiza un giro de -120° .

Algunas propiedades útiles de este conjunto de tres vectores son:

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

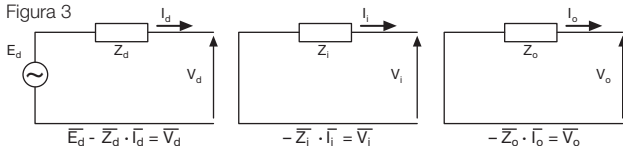
$$|\alpha^2 - \alpha| = \sqrt{3}$$

Figura 2



Por tanto, se puede afirmar que una red trifásica real se puede sustituir por tres redes de una fase relacionadas con las tres secuencias positivas, negativas y nulas, mediante la sustitución de cada componente por el correspondiente circuito equivalente. Si los generadores pueden ser simétricos, como sucede en una instalación, considerando como positiva la secuencia que generan, las tres redes de una fase son representadas por los siguientes circuitos y ecuaciones:

Figura 3



- E_d es la tensión fase-neutro ($E_d = \frac{U_r}{\sqrt{3}}$) de la sección aguas arriba del defecto
- Z es la impedancia del lugar del defecto
- I es la corriente de fallo
- V es la tensión medida en el lugar del defecto.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

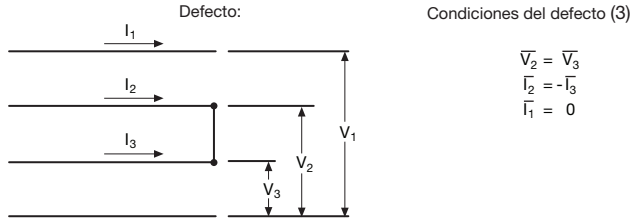
6.5.3 Cálculo de la corriente de cortocircuito con el álgebra de secuencias

Sin entrar en los detalles de un enfoque teórico, es posible ilustrar con un ejemplo el procedimiento para simplificar y resolver la red eléctrica bajo una condición de fallo previa.

Defecto bifásico aislado

El diagrama que muestra esta tipología de defecto y la relación entre corrientes y tensiones se puede representar de la siguiente forma:

Figura 4

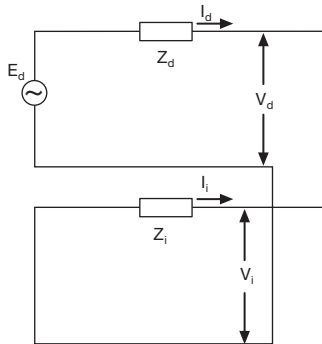


Tomando las condiciones de defecto y la fórmula 1), se obtiene que:

$$\begin{aligned} V_d &= V_i \\ I_d &= -I_i \\ I_o &= 0 \text{ por tanto } V_o = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Estas relaciones aplicadas a los tres circuitos de secuencia de la figura 3 permiten definir la red de secuencia que equivale a la red trifásica objeto de estudio y representa el estado de defecto inicial. Esta red se puede representar como sigue:

Figura 5



6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Al solucionar esta red simple (formada por elementos conectados en serie) en relación con la corriente I_d , se obtiene lo siguiente:

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \quad 5)$$

Utilizando las fórmulas 2) referidas a la corriente, y las fórmulas 4), se obtiene:

$$\bar{I}_2 = (\alpha^2 - \alpha) \cdot \bar{I}_d \quad \bar{I}_3 = (\alpha - \alpha^2) \cdot \bar{I}_d$$

Dado que $|(\alpha^2 - \alpha)|$ resulta ser igual a $\sqrt{3}$, el valor de la corriente entre fases en las dos fases afectadas por el defecto se puede expresar de la siguiente forma:

$$|\bar{I}_2| = |\bar{I}_3| = |\bar{I}_{k2}| = \sqrt{3} \cdot \left| \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \right|$$

Utilizando las fórmulas 2) referidas a la tensión, y las fórmulas 4) previamente obtenidas, se llega a lo siguiente:

$$\bar{V}_1 = 2 \cdot \bar{V}_i \quad 6) \text{ para la fase no afectada por el defecto}$$

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_3 = (\alpha^2 + \alpha) \cdot \bar{V}_d = -\bar{V}_d \quad 7) \text{ para las fases afectadas por el defecto}$$

Mediante el circuito de secuencia negativa, la relación 6) se puede representar como $\bar{V}_1 = -2 \cdot \bar{Z}_i \cdot \bar{I}_i$.

Con referencia a lo anterior, y según $\bar{I}_d = -\bar{I}_i$, la fase no afectada por el defecto debe ser:

$$\bar{V}_1 = \frac{2 \cdot \bar{Z}_i}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \cdot \bar{E}_d$$

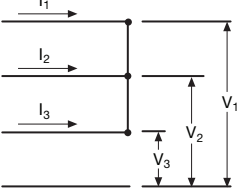
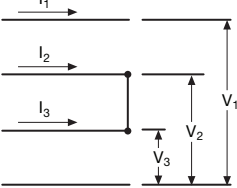
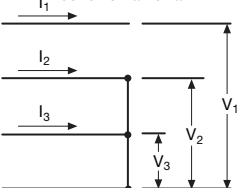
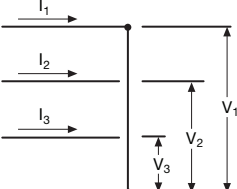
Para las fases afectadas por el defecto, siendo $\bar{V}_d = \bar{V}_i = \frac{\bar{V}_1}{2}$, se obtiene:

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_3 = -\frac{\bar{V}_1}{2} = \frac{\bar{Z}_i \cdot \bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i}$$

Haciendo referencia al ejemplo anterior, es posible analizar todas las tipologías de defectos y expresar las corrientes y tensiones de defecto como una función de las impedancias de los componentes de la secuencia.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

A continuación, en la Tabla 1, se ofrece un resumen:

Tipo de fallo	Condiciones de fallo:	Corriente	Tensión en las fases
Cortocircuito trifásico 	$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \bar{V}_3$ $\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0$	$ \bar{I}_{k3} = \bar{I}_1 = -\frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_d }$	$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \bar{V}_3 = 0$
Cortocircuito entre fases 	$\bar{V}_2 = \bar{V}_3$ $\bar{I}_2 = -\bar{I}_3$	$ \bar{I}_{k2} = \bar{I}_2 = \frac{U_n}{ \bar{Z}_d + \bar{Z}_1 }$	$ \bar{V}_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot U_n \cdot \left \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_1} \right $ $ \bar{V}_d = \bar{V}_3 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \left \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_1} \right $
Cortocircuito entre fases con conexión a tierra 	$\bar{V}_2 = \bar{V}_3 = 0$ $\bar{I}_1 = 0$	$ \bar{I}_2 = U_n \cdot \left \frac{(1 + \alpha^2) \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_d \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_d} \right $ $ \bar{I}_3 = U_n \cdot \left \frac{(1 + \alpha) \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_d \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_d} \right $ $ \bar{I}_{ground} = \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = U_n \cdot \left \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_d \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_d} \right $	$\bar{V}_2 = \bar{V}_3 = 0$ $ \bar{V}_1 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \left \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_d \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_d} \right $
Cortocircuito en una fase 	$\bar{V}_1 = 0$ $\bar{I}_2 = \bar{I}_3 = 0$	$ \bar{I}_{k1} = \bar{I}_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{ \bar{Z}_d + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 }$	$\bar{V}_1 = 0$ $ \bar{V}_2 = U_n \cdot \left \frac{\bar{Z}_1 \cdot \alpha \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0} \right $ $ \bar{V}_3 = U_n \cdot \left \frac{\alpha \cdot \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0} \right $

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.5.4 Impedancias de cortocircuito de secuencia positiva, negativa y nula del equipo eléctrico

Todos los componentes de una red eléctrica (utilidad – transformador – generador – cable) pueden ser representados por un valor de impedancia de secuencia positiva, negativa y nula.

Utilidad

Por utilidad se entiende la red de alimentación de distribución (normalmente MV) de la cual se alimenta la planta. Se caracteriza por elementos de secuencia positiva y negativa, mientras que la impedancia de secuencia nula no se tiene en cuenta, dado que los arrollamientos conectados en triángulo del circuito primario del transformador impiden la corriente de la secuencia nula. En lo que respecta a las impedancias existentes, se puede escribir lo siguiente:

$$Z_d = Z_i = Z_{NET} \frac{U_r}{\sqrt{3} \cdot I_{k3}}$$

Transformador

Se caracteriza por elementos de secuencia positiva y negativa; además, como una función de la conexión de los arrollamientos y del sistema de distribución en la parte LV, el componente de la secuencia nula también puede estar presente.

Así, se puede concluir que:

$$Z_d = Z_i = Z_T = \frac{uk \%}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_r}$$

mientras que el componente de la secuencia nula se puede expresar como: $Z_0 = Z_T$ si las corrientes de la secuencia nula pueden fluir en los dos arrollamientos

$Z_0 = \infty$ si las corrientes de la secuencia nula no pueden fluir en los dos arrollamientos

Cable

Se caracteriza por los elementos de secuencia positiva, negativa y nula que varían como una función del retorno de la corriente de cortocircuito.

En lo que respecta a los componentes de la secuencia positiva y negativa, es posible concluir que:

$$Z_d = Z_i = Z_C = R_C + j X_C$$

Para evaluar la impedancia de la secuencia nula, es necesario conocer el retorno de la corriente:

$$Z_0 = Z_C + j3 \cdot Z_{nC} = (R_C + 3 \cdot R_{nC}) + j(X_C + 3 \cdot X_{nC})$$

Retorno a través del cable neutro (defecto fase-neutro)

$$Z_0 = Z_C + j3 \cdot Z_{PEC} = (R_C + 3 \cdot R_{PEC}) + j(X_C + 3 \cdot X_{PEC})$$

Retorno a través de PE (defecto de conductor fase-PE en el sistema TN-S)

$$Z_0 = Z_{EC} + j3 \cdot Z_{EC} = (R_C + 3 \cdot R_{EC}) + j(X_C + 3 \cdot X_{EC})$$

Retorno a través de tierra (defecto de fase-tierra en el sistema TT)

donde:

- Z_C , R_C y X_C hacen referencia al conductor de línea
- Z_{nC} , R_{nC} y X_{nC} hacen referencia al conductor neutro
- Z_{PEC} , R_{PEC} y X_{PEC} hacen referencia al conductor de protección PE
- Z_{EC} , R_{EC} y X_{EC} hacen referencia a tierra.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Generadores síncronos

En general, las reactancias de secuencia positiva, negativa y nula de **generadores síncronos** (y también de las máquinas giratorias) tienen valores diferentes.

Para la secuencia positiva, sólo se utiliza la reactancia subtransitoria X_d'' , dado que, en este caso, el cálculo de la corriente de fallo proporciona el valor más alto.

La reactancia de secuencia negativa es muy variable, y oscila entre los valores de X_d'' y X_q'' . En los momentos iniciales del cortocircuito, X_d'' y X_q'' no difieren en gran medida y, por tanto, podemos considerar que $X_1 = X_d''$. Al contrario, si X_d'' y X_q'' son muy diferentes, es posible utilizar un valor igual al valor medio de las dos reactancias; se concluye que:

$$X_1 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}.$$

La reactancia de la secuencia nula también es muy variable, y resulta ser inferior a las otras dos reactancias anteriormente mencionadas. Para esta reactancia, se puede tomar un valor igual a 0.1 a 0.7 veces las reactancias de secuencia negativa o positiva, y se puede calcular de la siguiente forma:

$$X_0 = \frac{x_o\%}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_r}$$

donde $x_o\%$ es un parámetro típico de la máquina. Además, el componente de la secuencia nula también se ve influenciado por la modalidad a tierra del generador, mediante la introducción de los parámetros R_G y X_G que representan, respectivamente, la resistencia a tierra y la reactancia del generador. Si el nodo del generador resulta inaccesible o no está puesto a tierra, la impedancia a tierra es ∞ .

En resumen, se deben tener en cuenta las siguientes expresiones para las impedancias de secuencia:

$$Z_d = (R_a + j \cdot X_d'')$$

$$Z_1 = (R_a + j \cdot X_d'')$$

$$Z_0 = R_a + 3 \cdot R_G + j \cdot (X_0 + 3 \cdot X_G)$$

donde R_a es la resistencia del estátor definida como $R_a = \frac{X_d''}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_a}$, siendo T_a la constante de tiempo del estátor.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

Cargas

Si la carga es pasiva, la impedancia se debe considerar infinita.

Si la carga no es pasiva, como podría suceder en un motor asíncrono, es posible considerar la máquina representada por la impedancia Z_M para la secuencia positiva y negativa, mientras que para la secuencia nula, el valor Z_{0M} debe ser facilitado por el fabricante. Además, si los motores no están puestos a tierra, la impedancia de la secuencia nula sería ∞ .

Así:

$$Z_d = Z_i = Z_M = (R_M + j \cdot X_M)$$

siendo Z_M igual a

$$Z_M = \frac{U_r^2}{\frac{I_{LR}}{I_r} \cdot S_r}$$

donde:

I_{LR} es el valor de corriente cuando el rotor es bloqueado por el motor

I_r es la corriente asignada del motor

$$S_r = \frac{P_r}{(\eta \cdot \cos \varphi_r)} \text{ es la potencia aparente asignada del motor}$$

La razón $\frac{R_M}{X_M}$ se suele conocer; para los motores LV, esta razón se puede

considerar igual a 0.42 con $X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}}$, a partir de la cual se puede determinar $X_M = 0.922 \cdot Z_M$

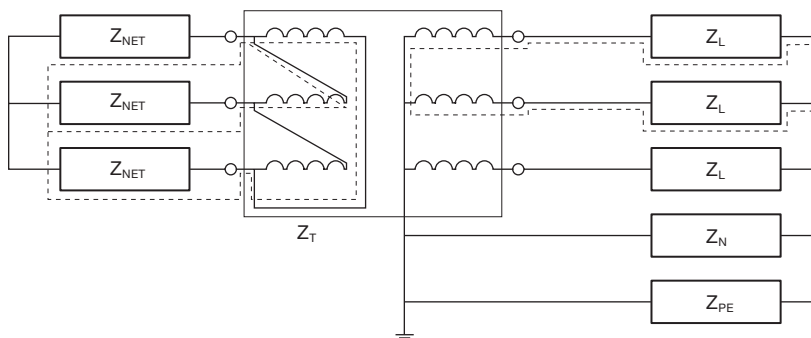
6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.5.5 Fórmulas para calcular las corrientes de fallo como una función de los parámetros eléctricos de la instalación

Mediante la Tabla 1 y las fórmulas para las impedancias de secuencia expresadas como una función de los parámetros eléctricos de los componentes de la instalación, existe la posibilidad de calcular las diferentes corrientes de cortocircuito.

En el siguiente ejemplo, tomamos una red con un transformador MV/LV con arrollamiento primario en triángulo y arrollamiento secundario con nodo puesto a tierra, y suponemos que existe un fallo entre fases aguas abajo de la línea de distribución.

Figura 6



Aplicando el álgebra de secuencias:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_d}{(Z_d + Z_i)}$$

las impedancias relativas a las secuencias positiva y negativa objeto de examen son:

$$Z_d = Z_i = Z_{NET} + Z_T + Z_L$$

considerando que $E_d = \frac{U_r}{\sqrt{3}}$, se obtiene lo siguiente:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_d}{(Z_d + Z_i)} = \frac{U_r}{2 \cdot (Z_{NET} + Z_T + Z_L)}$$

donde:

U_r es la tensión asignada en la parte LV

Z_T es la impedancia del transformador

Z_L es la impedancia del conductor de la fase

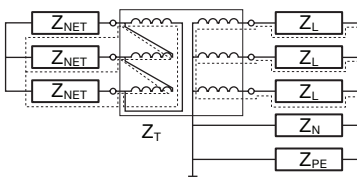
Z_{NET} es la impedancia de la red aguas arriba

Haciendo referencia al ejemplo anterior, es posible obtener la Tabla 2 que vemos a continuación, que incluye las expresiones de las corrientes de cortocircuito según las diferentes tipologías de fallos.

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

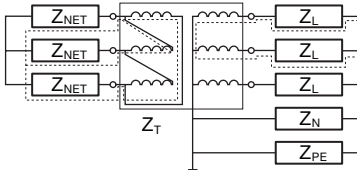
Tabla 2

Fallo trifásico
 I_{k3}



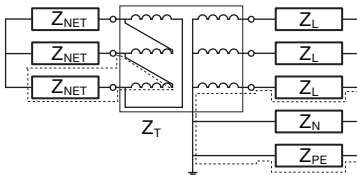
$$I_{k3} = \frac{U_r}{\sqrt{3} \cdot (Z_{NET} + Z_T + Z_L)}$$

Fallo entre fases
 I_{k2}



$$I_{k2} = \frac{U_r}{2 \cdot (Z_{NET} + Z_T + Z_L)}$$

Fallo en una fase
 I_{k1} (fase-neutro o fase a PE)



$$I_{k1} = \frac{U_r}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot Z_{NET} + Z_T + Z_L + Z_{PE} \right)}$$

$$I_{k1} = \frac{U_r}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot Z_{NET} + Z_T + Z_L + Z_N \right)}$$

Donde:

U_r es la tensión asignada en la parte LV

Z_T es la impedancia del transformador

Z_L es la impedancia del conductor de la fase

Z_{NET} es la impedancia de la red aguas arriba

Z_{PE} es la impedancia del conductor de protección (PE)

Z_N es la impedancia del conductor neutro

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

La Tabla 3, que figura a continuación, resume las relaciones de las corrientes de fallo, teniendo en cuenta la corriente arriba definida o los valores de red de potencia infinitos y la distancia del fallo desde el transformador.

Tabla 3

	Red de potencia definida aguas arriba		Red de potencia infinita aguas arriba $Z_{NET} \rightarrow 0$	
	Lejos del transformador	Cerca del transformador $Z_L \rightarrow 0, Z_{PE} \text{ (o } Z_N) \rightarrow 0$	Lejos del transformador	Cerca del transformador $Z_L \rightarrow 0, Z_{PE} \text{ (o } Z_N) \rightarrow 0$
I_{k3}	$I_{k3} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot (Z_{NET} + Z_T + Z_L)}$	$I_{k3} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot (Z_{NET} + Z_T)}$	$I_{k3} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_L)}$	$I_{k3} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot (Z_T)}$
I_{k2}	$I_{k2} = \frac{U_f}{2 \cdot (Z_{NET} + Z_T + Z_L)}$	$I_{k2} = \frac{U_f}{2 \cdot (Z_{NET} + Z_T)}$	$I_{k2} = \frac{U_f}{2 \cdot (Z_T + Z_L)}$	$I_{k2} = \frac{U_f}{2 \cdot (Z_T)}$
	$I_{k2} < I_{k3}$	$I_{k2} = 0.87 \cdot I_{k3}$	$I_{k2} = 0.87 \cdot I_{k3}$	$I_{k2} = 0.87 \cdot I_{k3}$
I_{k1}	$I_{k1} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot Z_{NET} + Z_T + Z_L + Z_{PE} \right)}$	$I_{k1} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot Z_{NET} + Z_T \right)}$	$I_{k1} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_L + Z_{PE})}$	$I_{k1} = \frac{U_f}{\sqrt{3} \cdot (Z_T)}$
	$I_{k1} > I_{k3}$ if $Z_{NET} > 3 \cdot Z_{PE}$	$I_{k1} > I_{k3}$	$I_{k1} \approx I_{k3}$	$I_{k1} = I_{k3}$

6 Cálculo de la corriente de cortocircuito

6.6 Cálculo del valor máximo de la corriente de cortocircuito

Los efectos electrodinámicos de las corrientes de cortocircuito son especialmente peligrosos para los conductos del bus, aunque también pueden dañar los cables.

La corriente máxima también es importante para evaluar el valor I_{cm} del interruptor automático.

El valor I_{cm} también está relacionado con el valor I_{cu} , según la Tabla 16 de la norma IEC 60947-1. Con referencia a la corriente de cortocircuito de la instalación, debe ser $I_{cm} > I_{kp}$.

La corriente máxima de una instalación se debe calcular a partir de la siguiente fórmula (véase la norma IEC 60909-0):

$$I_{kp} = I_k'' \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot R}{X}} \right)$$

donde:

- I_k'' es la corriente de cortocircuito (valor rms) en el momento inicial del cortocircuito
- R es el componente resistivo de la impedancia de cortocircuito en el lugar del fallo
- X es el componente reactivo de la corriente de cortocircuito en el lugar del fallo

Si se conoce el factor de potencia $\cos\varphi_k$, es posible escribir:

$$I_{kp} = I_k'' \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1.02 + 0.98 \cdot e^{-\frac{3}{\tan\varphi_k}} \right)$$