

ETAP[®]12.5

Análisis de Cortocircuito en Corriente Alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia

*Diego Moitre, M. Sc.
Ingeniero Mecánico Electricista
Matricula Profesional N° 10.333 - CIEC
Senior Member, PES – IEEE
RAIEN ARGENTINA S.A. Congreso 2171 – 6° Piso
Código Postal: C1428 BVE
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ARGENTINA
Fijo: (54) 11 4701-9316
Móvil: (54) 358-156000104
dmoitre@raien.com.ar
dmoitre@gmail.com*

Análisis de Cortocircuito en Sistemas Eléctricos de Potencia



- ☐ Introducción al Análisis de CC.
- ☐ Nivel de Falla (Potencia de CC).
- ☐ Métodos Computacionales de análisis de CC equilibrados.
- ☐ Matriz de Impedancias de Barras Z_{barras} .
- ☐ Redes de Secuencia.
- ☐ Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados
- ☐ Técnicas para análisis de CC.
- ☐ Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE.
- ☐ Análisis de Cortocircuito según IEC.
- ☐ Editor de Estudio de CC ETAP®12.5
- ☐ Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®12.5

Bibliografía

- N. Tleis ***Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice***. Newnes, Elsevier. 2.008.
- J. C. Das. ***Power Systems Analysis: Short-Circuit, Load Flow and Harmonics***. CRC Press, 2002.
- P. M. Anderson ***Analysis of Faulted Power Systems***. The Iowa State University Press. 1973.
- J. Lewis Blackburn ***Symmetrical Components for Power Systems Engineering***. CRC Press, 1993.
- J. Arrillaga & C.P. Arnold ***Computer Analysis of Power Systems***. Wiley, 1990.
- A. R. Bergen & V. Vittal ***Power Systems Analysis***. Second Edition. Prentice -Hall, 2000.
- O. I. Elgerd. ***Electric Energy Systems Theory***. Second Edition. McGraw-Hill, 1983.
- J. J. Grainger & W. D. Stevenson ***Power Systems Analysis***. McGraw-Hill, 1994.

Bibliografía

- **IEEE Violet Book** (IEEE Std 551TM – 2006: *Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*)
- **IEEE Brown Book** (IEEE Std 399TM – 1997: *Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*)
- **IEEE Red Book** (IEEE Std 141TM – 1993: *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*)
- **IEEE C37.5-1979** Guide for Calculation of Fault Currents for Application of AC High - Voltage Circuit Breakers Rated on a Total Current Basis.
- **IEEE C37.04** – 1979 (1988) : Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements.
- **IEEE C37.04f** – 1990: Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements.
- **IEEE C37.04g** – 1986: Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements.

Bibliografía

- **IEEE C37.04h** – 1990 : Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements.
- **IEEE C37.04i** – 1991: Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements.
- **IEEE C37.04** – 1999 : Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements.
- **IEEE C37.010** – 1979 (1988) : IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Basis and Supplements.
- **IEEE C37.010b** – 1985 : IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Basis and Supplements.
- **IEEE C37.010e** – 1985 : IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Basis and Supplements.
- **IEEE C37.010** – 1999: IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Basis and Supplements.

Bibliografía

- **IEEE C37.13** – 1990: Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.
- **IEEE C37.013** – 1997: Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.
- **IEEE C37.20.1** – 2002: Standard for Metal Enclosed Low-Voltage Power Circuit Breakers Switchgear.
- **IEC 60909- 0** Ed. 1.0 2001-0. Short-circuit currents in three-phase a.c systems – Part 0: Calculation of Currents .
- **IEC 60909- 1** Ed. 2.0 2002-0. Short-circuit currents in three-phase a.c systems – Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0.
- **IEC 60909- 2** Ed. 2.0 2008-11. Short-circuit currents in three-phase a.c systems – Part 2: Data of Electrical Equipment for short-circuit currents calculations.
- **IEC 60909- 3** Ed. 3.0 2009-03. Short-circuit currents in three-phase a.c systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short-circuits and partial short-circuit currents flowing through earth.

Bibliografía

- **IEC 60909- 4** Ed. 1.0 2000-07. Short-circuit currents in three-phase a.c systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents.
- **IEC 61363- 1** Ed. 1.0 1998-02. Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units – Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.
- **IEC 60947- 1** Ed. 5.0 2007-06. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General Rules.
- **IEC 60947- 2** Ed. 4.1 Consol. With am1 2009-05. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-Breakers.
- **IEC 60282- 1** Ed. 7.0 2009-10. High-voltage Fuses – Part 1: Current-limiting Fuses.
- **IEC 60282- 2** Ed. 3.0 2008-04. High-voltage Fuses – Part 1: Expulsion Fuses
- **IEC 62271-SER** Ed. 1.0 2010-06. High-voltage switchgear and controlgear. ALL PARTS
- C. Hartman *Understanding Asymmetry*. **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. IA-21, No.4, July/August 1985, pp. 842–848.

Bibliografía

- A. Berizzi, S. Massucco, A. Silvestri, D. Zaninelli *Short-Circuit Current Calculation: A Comparison between Methods of IEC and ANSI Standards using dynamic simulation as reference.* **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. 30, No.4, July/August 1994, pp. 1099–1106.
- B. Bridger *All Amperes Are Not Created Equal: A Comparison of Current Ratings of High-Voltage Circuit Breakers Rated According to ANSI and IEC Standards.* **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. 29, No.1, January-February 1993, pp. 195–201.
- J. Dunki-Jacobs, B. Lam, R. Stratford *A Comparison of ANSI-Based and Dynamically Rigorous Short-Circuit Current Calculation Procedures.* **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. 24, No.6, November/December 1988, pp. 1180–1194.
- G. Knight, H. Sieling *Comparison of ANSI and IEC 909 Short-Circuit Current Calculation Procedures.* **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. 29, No.3, May/June 1993, pp. 625–630.
- A. Rodolakis *A Comparison of North American (ANSI) and European (IEC) Fault Calculation Guidelines.* **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. 29, No.3, May/June 1993, pp. 515–521.

Bibliografía

- O. Roennspiess, A. Efthymiadis *A Comparison of Static and Dynamic Short-Circuit Analysis Procedures*. **IEEE Trans. On Industry Applications**, Vol. 26, No.3, May/June 1990, pp. 463–475.
- **ETAP[®] 12.5 User Guide**

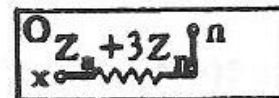
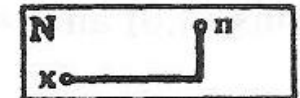
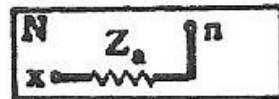
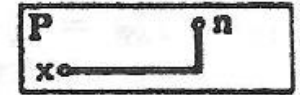
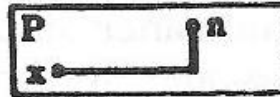
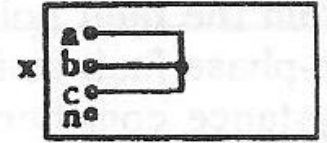
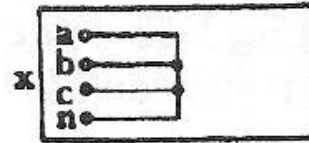
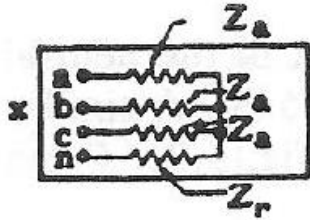
Tipos de fallas

Una falla es cualquier condición de desequilibrio en la red.

- ❑ **Falla Shunt**: es un desequilibrio entre fases o entre fase y neutro. Por ejemplo, cortocircuitos.
- ❑ **Falla Serie**: es un desequilibrio en las impedancias de las líneas de transmisión (o cables) y no involucra el neutro o tierra. Por ejemplo, rotura de un conductor de fase.
- ❑ **Fallas Simultaneas**: cualquier combinación de las anteriores. Por ejemplo, en un banco de transformadores trifásico, en forma simultanea rotura de un conductor de fase en el lado de baja tensión y cortocircuito fase-tierra del lado de alta tensión.

E. L. Harder "Sequence Network Connections for Unbalanced Load and Fault Conditions" ***The Electrical Journal***, December 1937.

Fallas Shunt

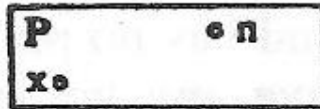
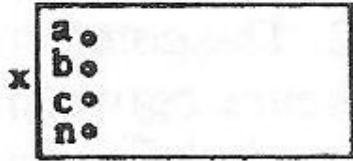


Cortocircuito trifásico a tierra a través de impedancias

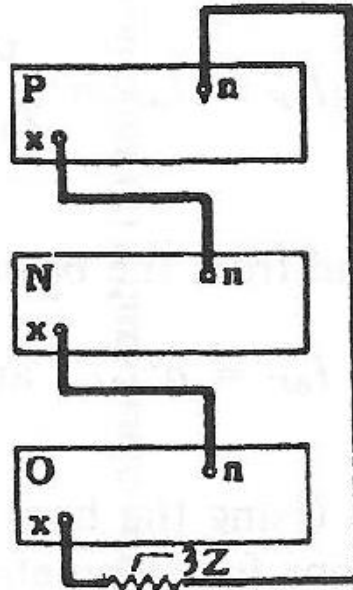
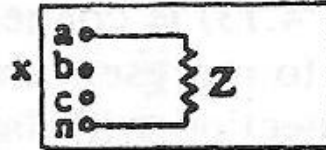
Cortocircuito trifásico franco a tierra

Cortocircuito trifásico franco

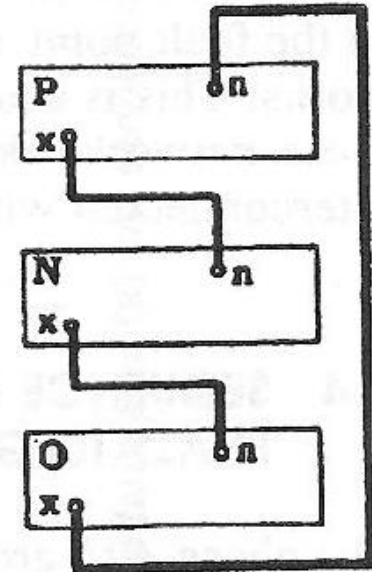
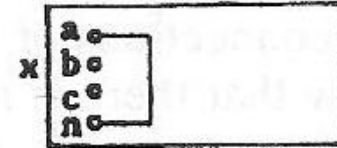
Fallas Shunt



Circuito abierto shunt

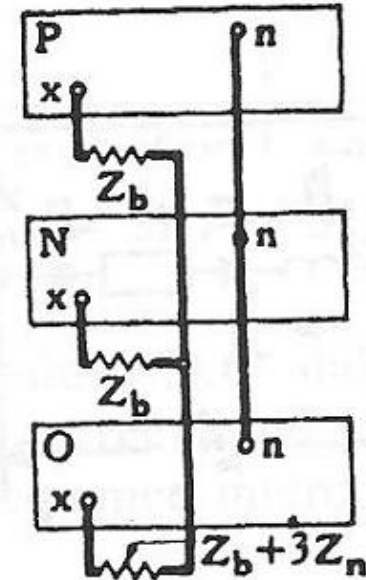
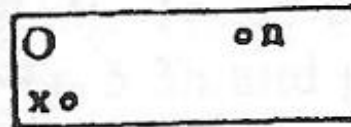
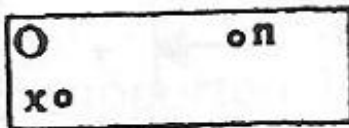
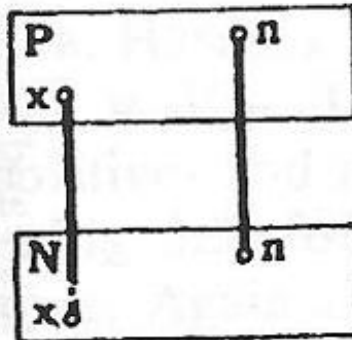
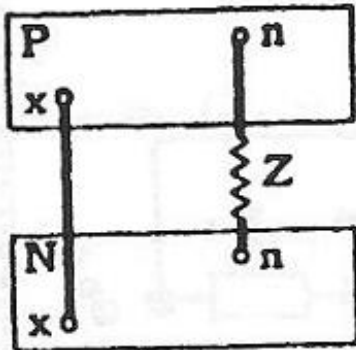
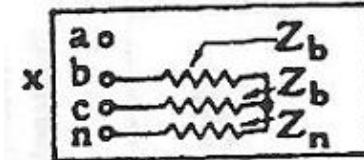
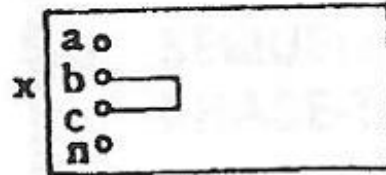
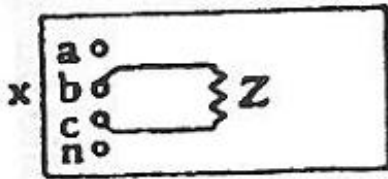


Cortocircuito fase a tierra a través de impedancia



Cortocircuito fase a tierra franco

Fallas Shunt

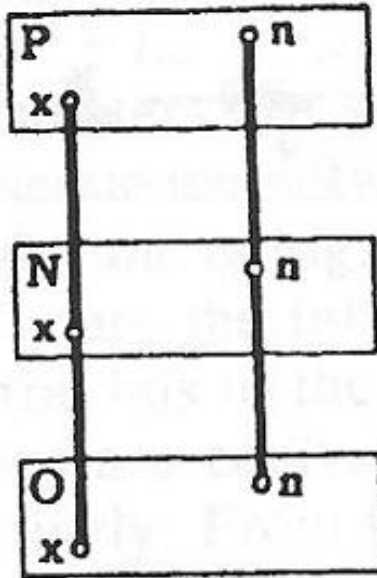
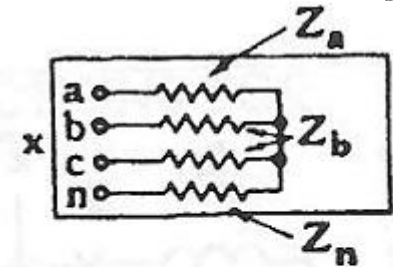
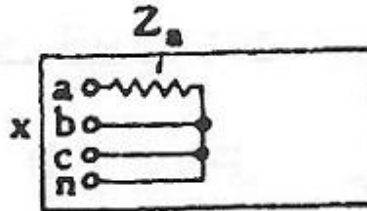
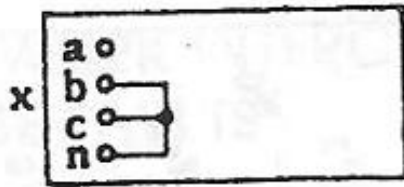


Cortocircuito bifásico a través de impedancia

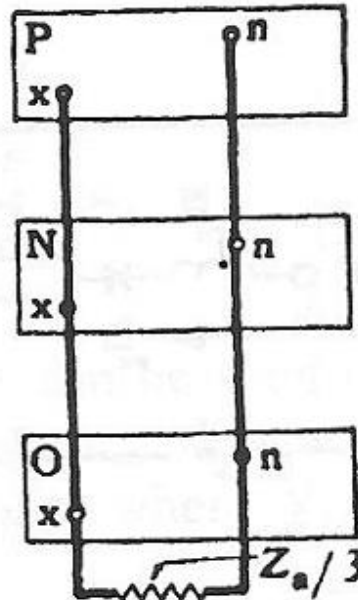
Cortocircuito bifásico franco

Cortocircuito bifásico a tierra a través de impedancias

Fallas Shunt

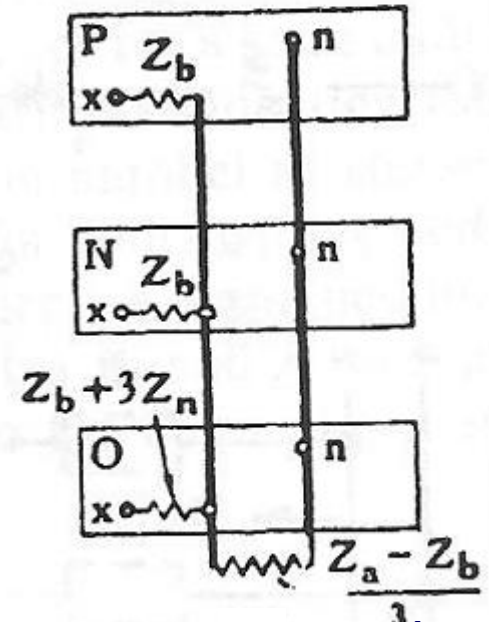


Cortocircuito bifásico a tierra franco



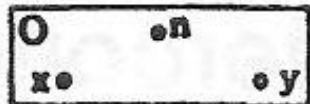
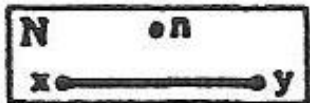
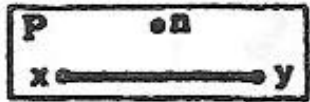
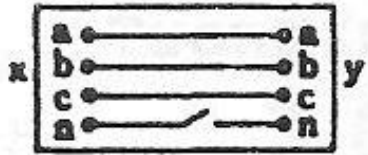
Cortocircuito trifásico a tierra con impedancia en fase a

Cortocircuito

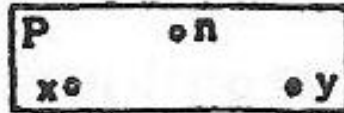
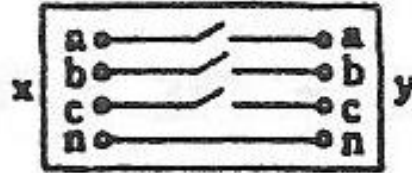


Cortocircuito trifásico a tierra con impedancias desequilibradas

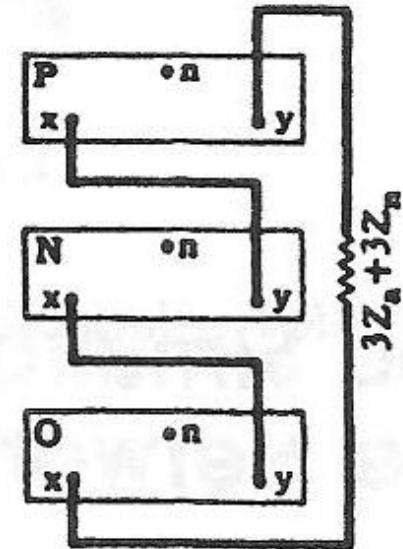
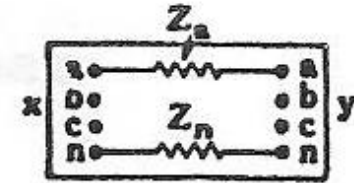
Fallas Serie



Neutro abierto

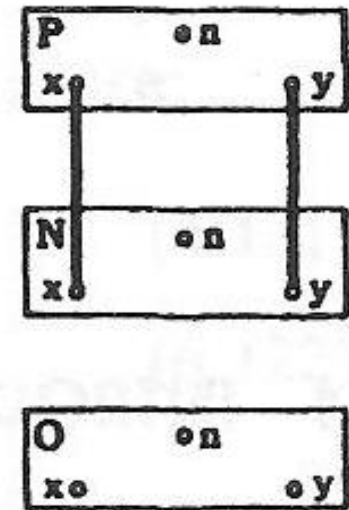
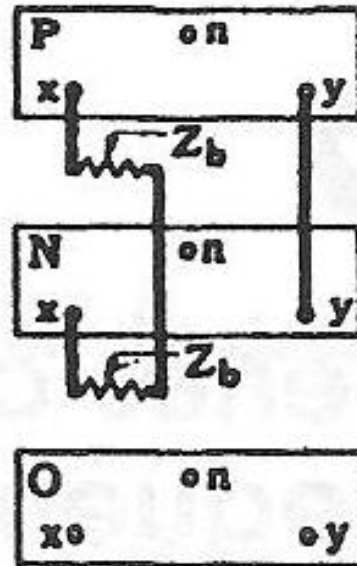
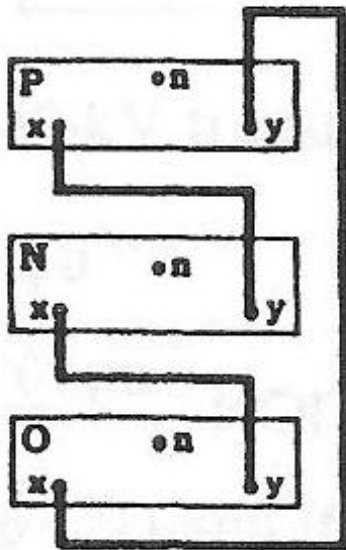
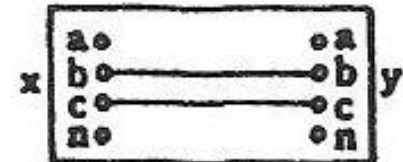
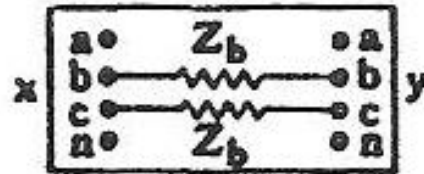
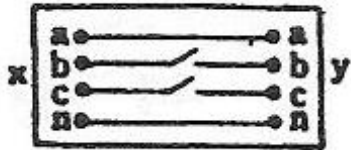


Tres fases abiertas



Fases b y c abiertas,
fase a y neutro con
impedancias

Fallas Serie

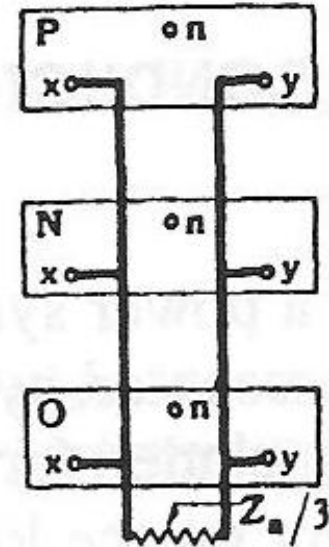
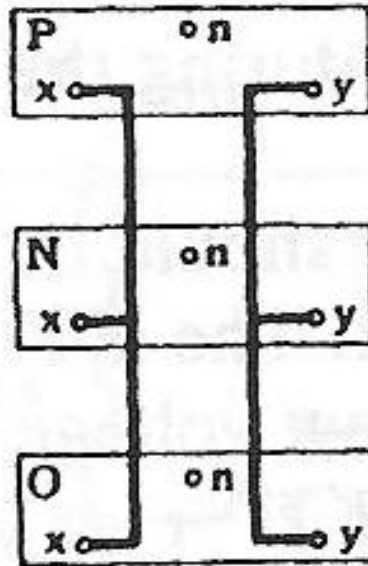
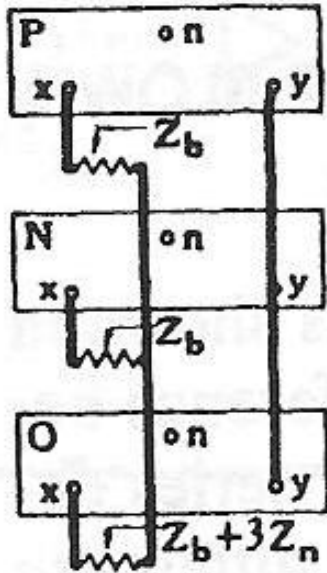
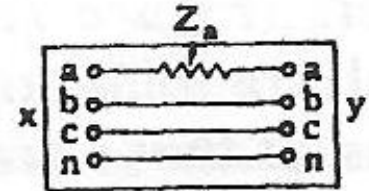
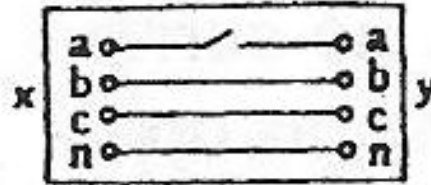
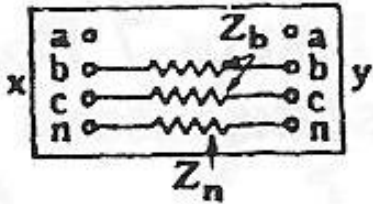


Fases b y c abiertas

Fases a y neutro
abiertas, fases b y c con
impedancias

Fases a y neutro
abiertas

Fallas Serie

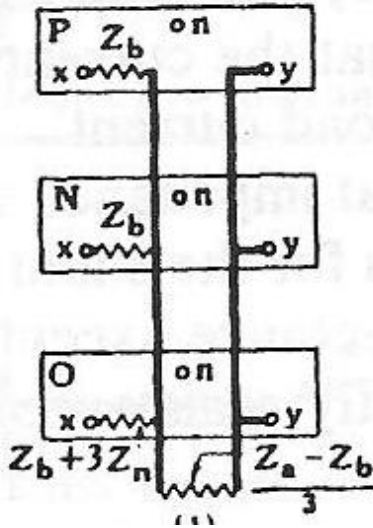
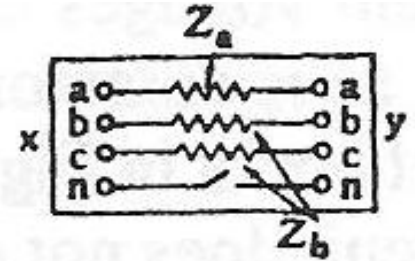
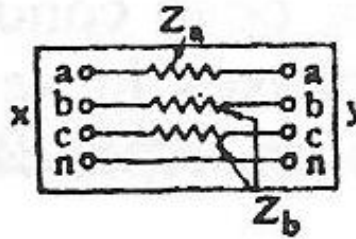
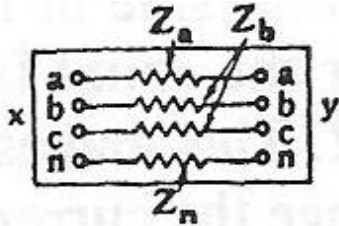


Fase a abierta, fases b,
c y neutro con
impedancias

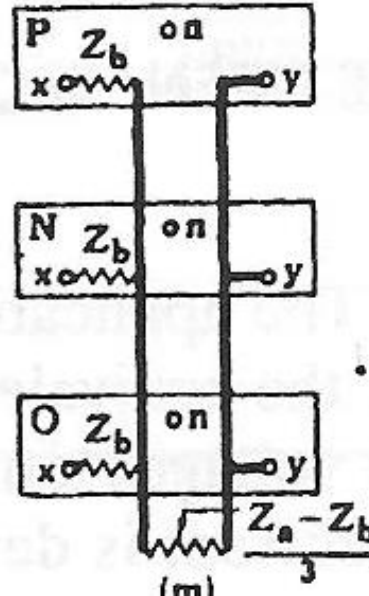
Fase a abierta

Impedancia en fase a

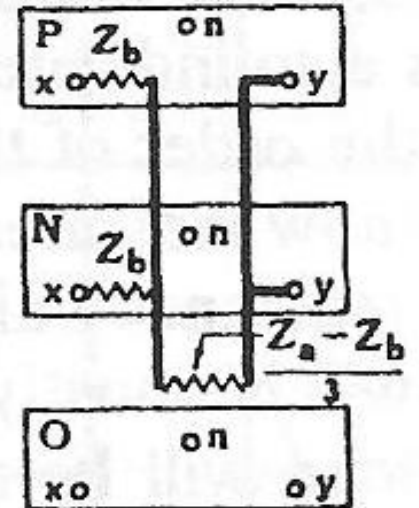
Fallas Serie



Impedancias iguales en
fases b y c; neutro con
impedancia

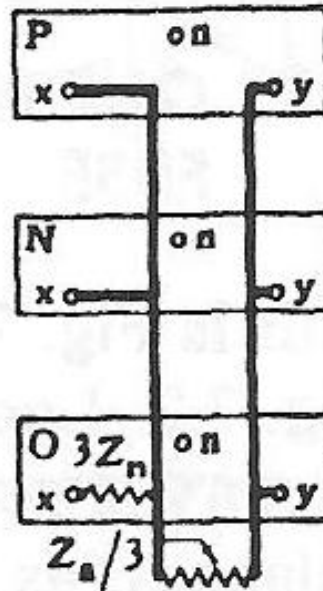
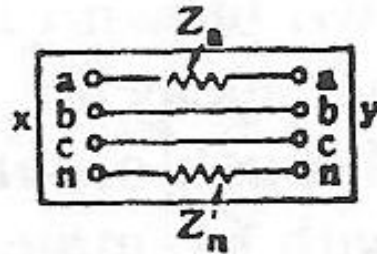


Impedancias iguales en
fases b y c



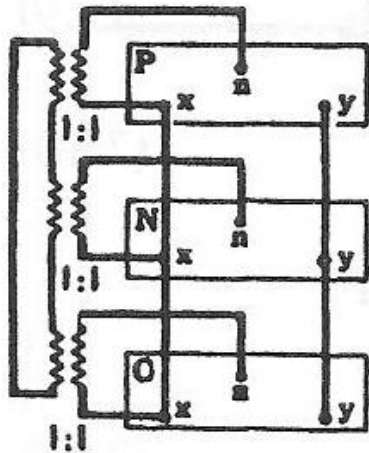
Impedancias iguales en
fases b y c; neutro
abierto

Fallas Serie

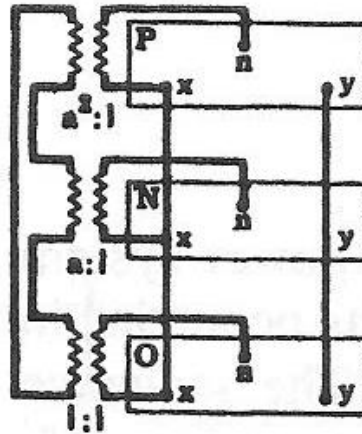


Impedancias en fases a
y neutro

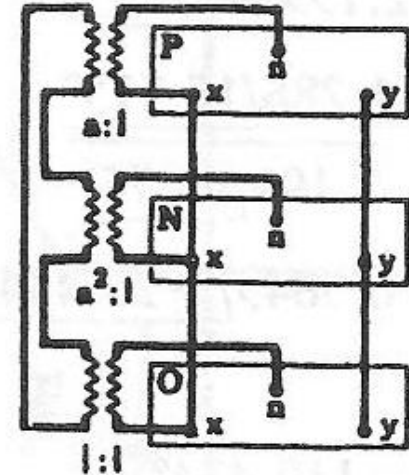
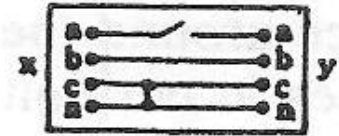
Fallas Simultaneas



Fase a abierta y
cortocircuito fase a a
tierra del lado x

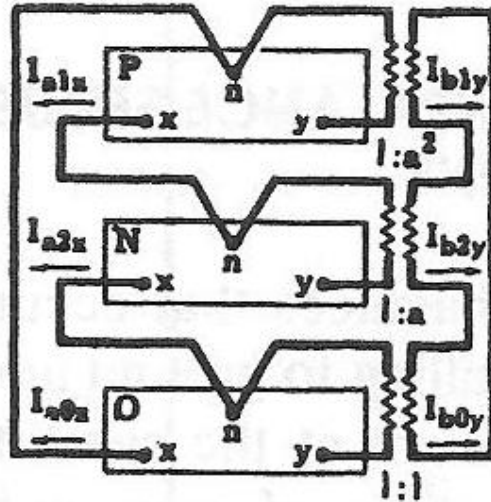
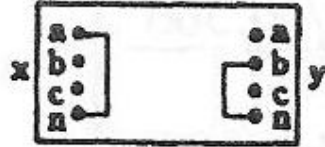


Fase a abierta y
cortocircuito fase b a
tierra del lado x

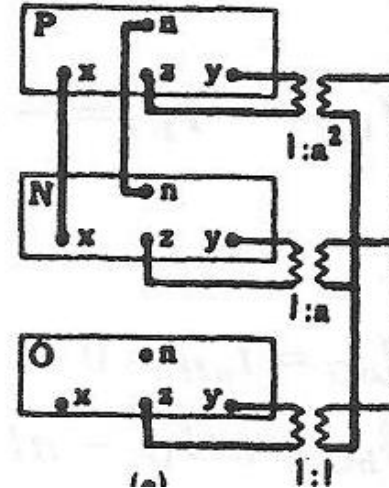
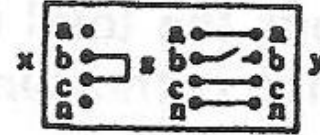


Fase a abierta y
cortocircuito fase c a
tierra del lado x

Fallas Simultaneas

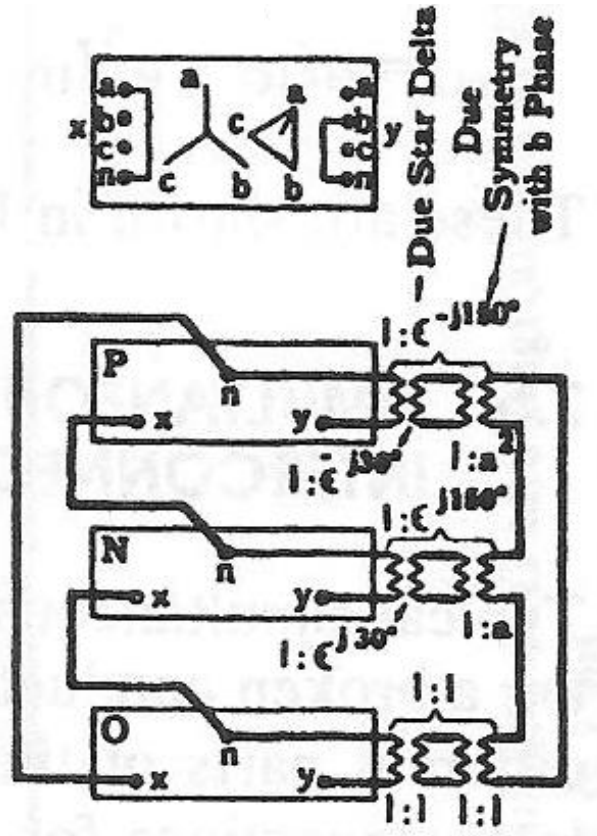


Cortocircuito fase a a tierra del lado x, y cortocircuito fase b a tierra del lado y



Cortocircuito bifásico (fases b y c) del lado x, y fase b abierta del lado y

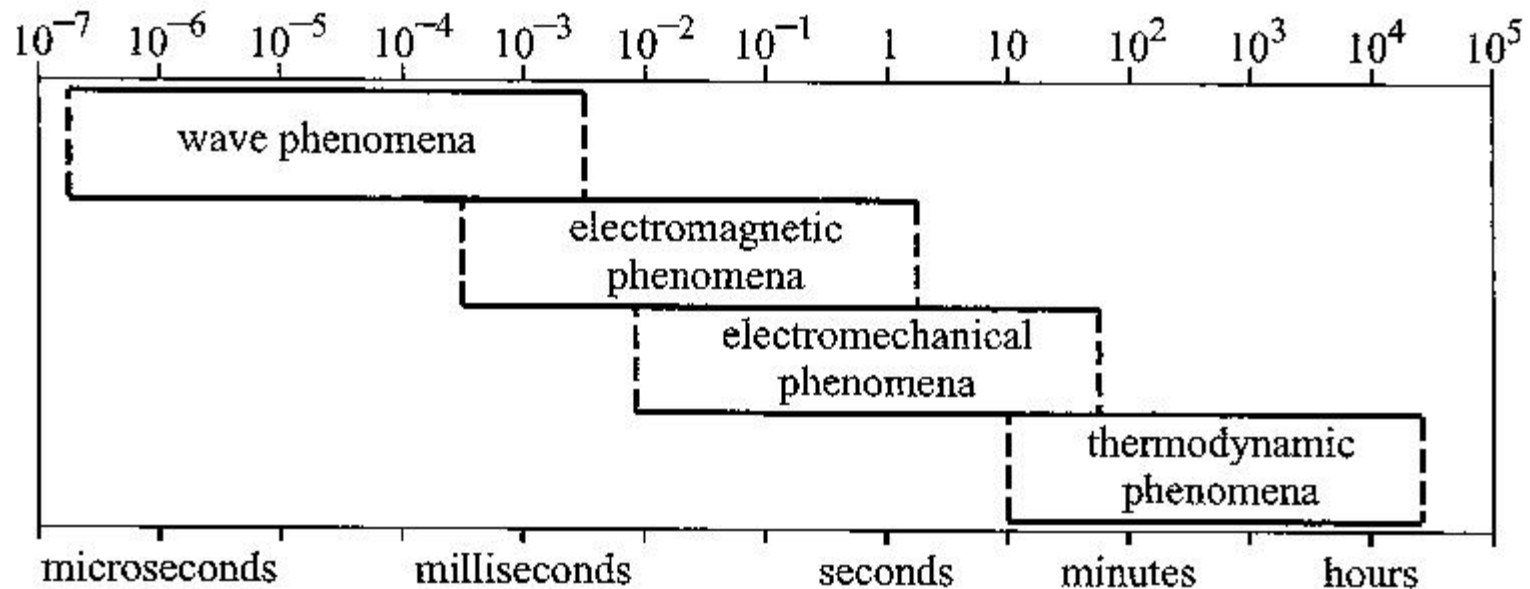
Fallas Simultaneas



Cortocircuito fase a a tierra del lado x, y cortocircuito fase b a tierra del lado y

Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia

□ Marco temporal para los fenómenos dinámicos básicos en SEP



Introducción al Análisis de Cortocircuito

- ❑ **Cortocircuito**: dos o mas puntos de una red eléctrica que en condiciones normales de operación se encuentran a distinto potencial, se ponen accidentalmente en contacto a través de una impedancia ($Z^f \neq 0$ o bien $Z^f = 0$).

- ❑ **Causas**:
 - ✓ Falla de aislamiento por envejecimiento, calentamiento, contaminación, etc.
 - ✓ Sobretensiones externas e internas.
 - ✓ Fallas mecánicas: roturas, deformaciones, desplazamientos, etc.

- ❑ **Efectos**:
 - ✓ Calentamiento de conductores por efecto Joule.
 - ✓ Esfuerzos electrodinámicos sobre el equipamiento.
 - ✓ Variación de la tensión en las distintas fases.

Introducción al Análisis de Cortocircuito

❑ Objetivos del análisis:

- ✓ En instalaciones industriales de media y baja tensión: cálculo de la máxima corriente de cortocircuito para determinar la capacidad de ruptura de interruptores y los límites térmicos y dinámicos del equipamiento y conductores de la instalación.
- ✓ En redes de alta y media tensión: cálculo de las intensidades de cortocircuito en cualquier punto de la red y ante cualquier tipo de cortocircuito para determinar las exigencias de servicio del equipamiento y el ajuste de las protecciones.

❑ Clasificación de los CC:

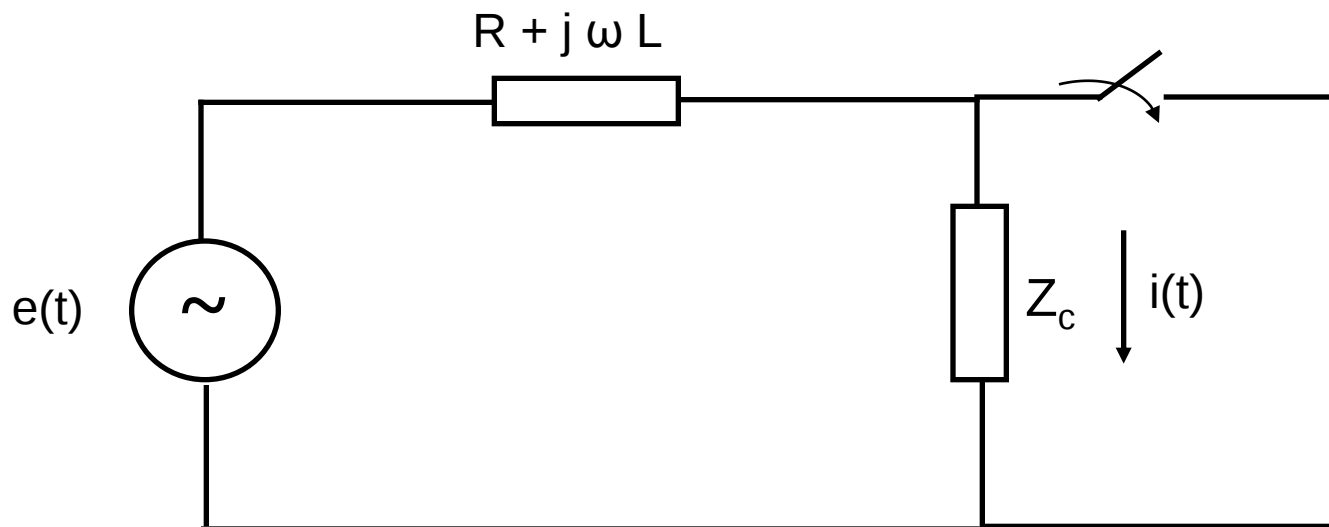
- ✓ **Equilibrados:** las tres fases están involucradas al mismo tiempo y en el mismo lugar.
- ✓ **Desequilibrados:** no todas las fases están involucradas por igual.

Introducción al Análisis de Cortocircuito

❑ Regímenes de los CC:

- ✓ **Transitorio:** el CC es un proceso electromagnético donde la red en una situación estacionaria sufre una modificación brusca de su topología. La red debería modelarse vía EDO.
- ✓ **Estacionario:** El modelo transitorio no es práctico cuando se trata con redes de cientos de barras y líneas; por ello las normas existentes especifican aproximaciones para el modelado estacionario de la red para el cálculo de CC.

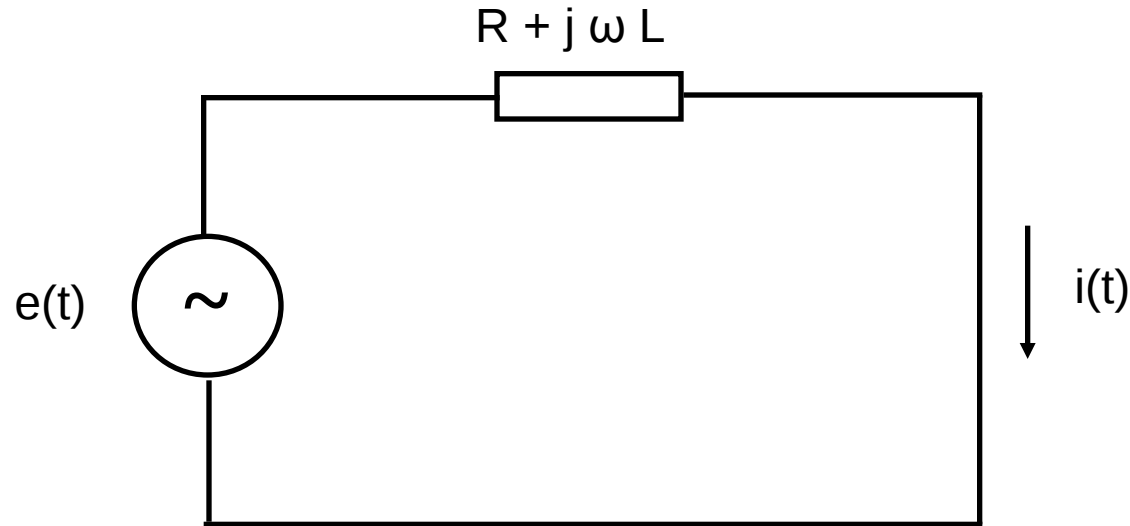
Introducción al Análisis de Cortocircuito



$$e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \theta) \Rightarrow i(t) = \sqrt{2} \frac{E}{\underbrace{\sqrt{(R + R_c)^2 + (\omega L + X_c)^2}}_{I_0}} \sin(\omega t + \theta - \varphi_0)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi_0) = \frac{\omega L + X_c}{R + R_c}$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito



$$\begin{cases} e(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \\ i(0) = \sqrt{2} I_0 \sin(\theta - \varphi_0) \end{cases}$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito

$$i(t) = \underbrace{\left[i(0) - \sqrt{2} I_{CC} \sin(\theta - \varphi) \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}_{\text{transitorio}} + \underbrace{\sqrt{2} I_{CC} \sin(\omega t + \theta - \varphi)}_{\text{permanente}}$$

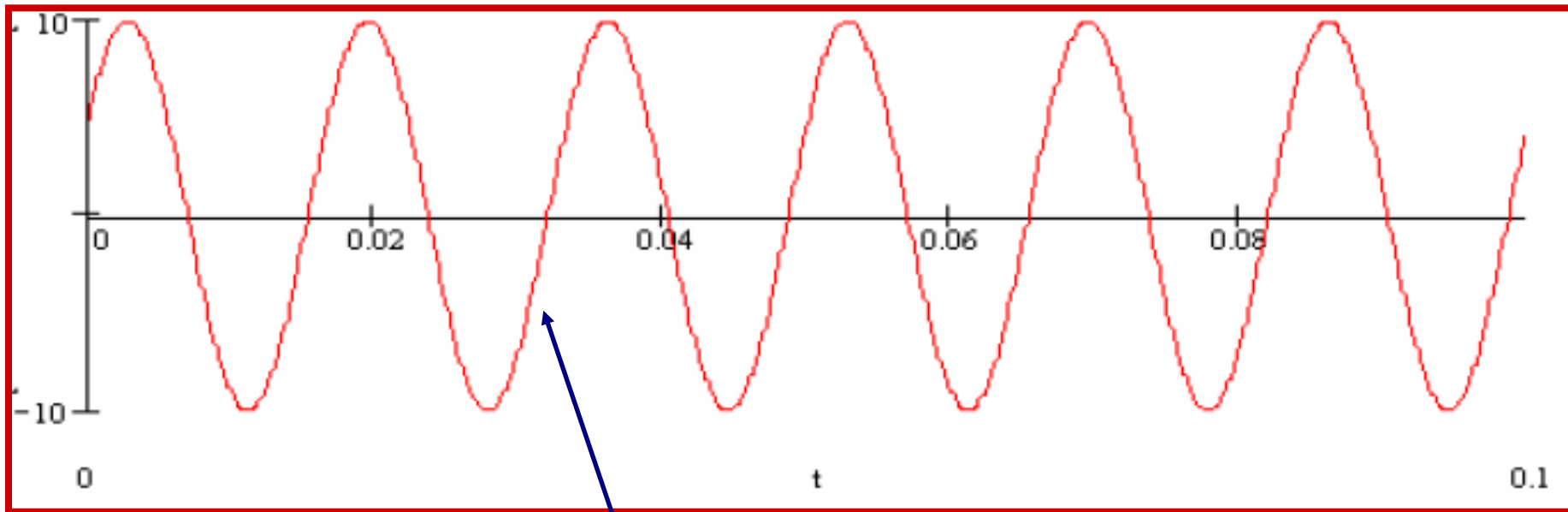
$$I_{CC} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\tan(\varphi) = \frac{\omega L}{R}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

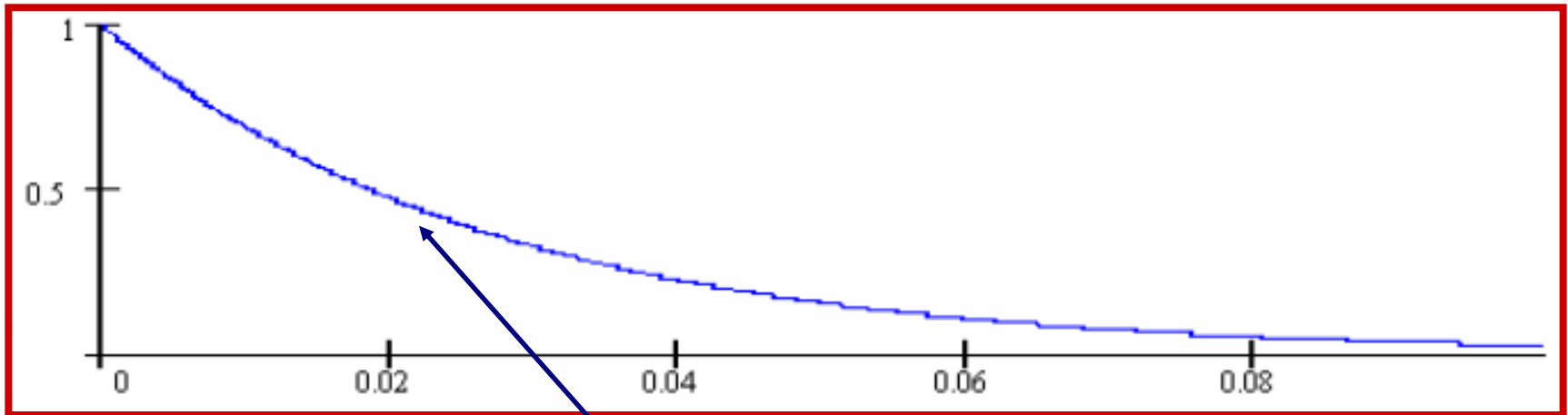
$$t = 5\tau \Rightarrow \exp(-5) = 0,0067 \Rightarrow \text{transitorio} \cong 0$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito



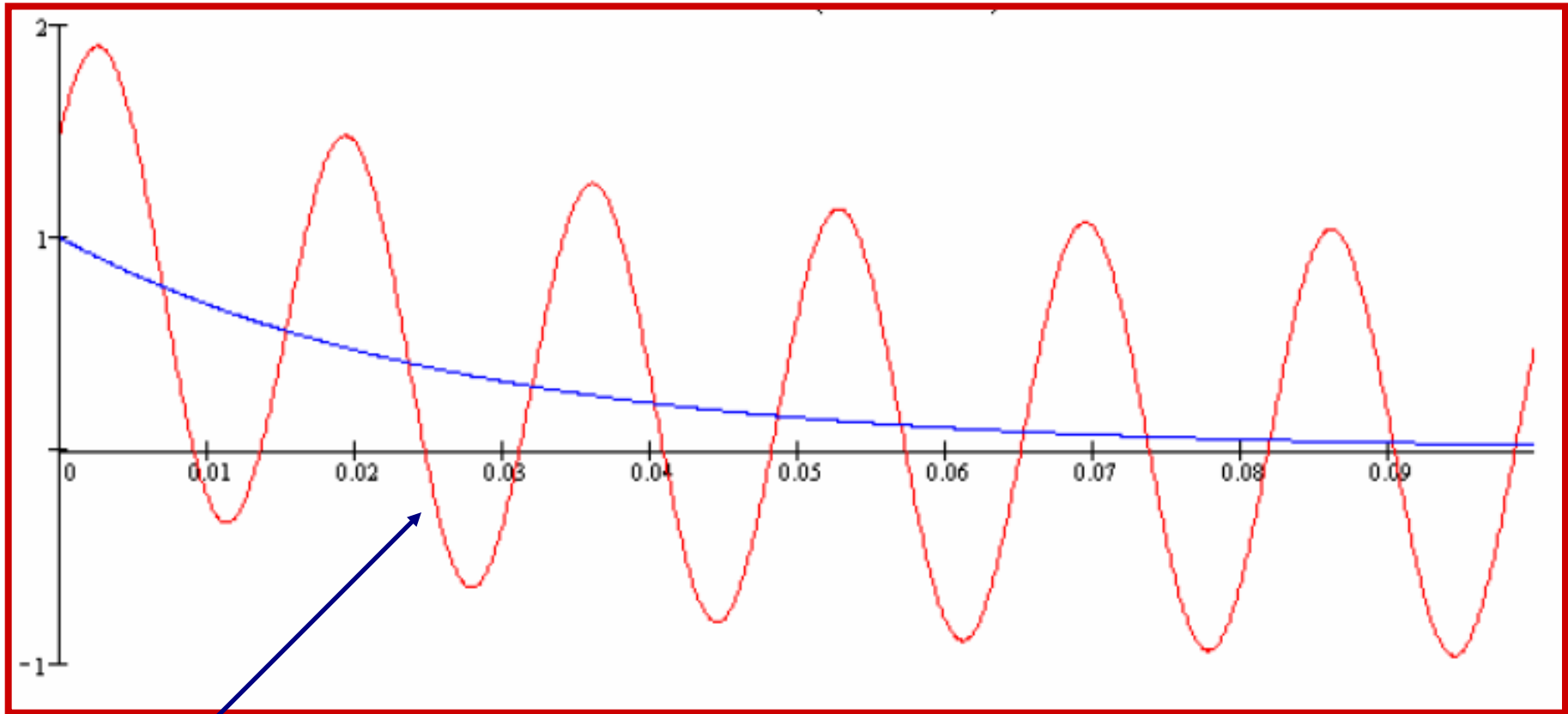
Régimen permanente

Introducción al Análisis de Cortocircuito



Régimen transitorio

Introducción al Análisis de Cortocircuito



$$i(t) = \underbrace{\left[i(0) - \sqrt{2} I_{CC} \sin(\theta - \varphi) \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}_{\text{transitorio}} + \underbrace{\sqrt{2} I_{CC} \sin(\omega t + \theta - \varphi)}_{\text{permanente}}$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito

$$|R + j\omega L| \ll |Z_C| \Rightarrow I_0 = \frac{E}{\sqrt{(R + R_C)^2 + (\omega L + X_C)^2}} \ll I_{CC} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$



Corriente de prefalla despreciable
frente a la de falla

$$i(t) \cong \underbrace{-\sqrt{2} I_{CC} \sin(\theta - \varphi) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}_{\text{continua}} + \underbrace{\sqrt{2} I_{CC} \sin(\omega t + \theta - \varphi)}_{\text{alterna}}$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito

$$R = 0; \quad \theta - \varphi = -\frac{\pi}{2}; \quad \omega t = (2k + 1)\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow i_{\text{Max}}(t) = i(0) + 2\sqrt{2} I_{\text{CC}}$$

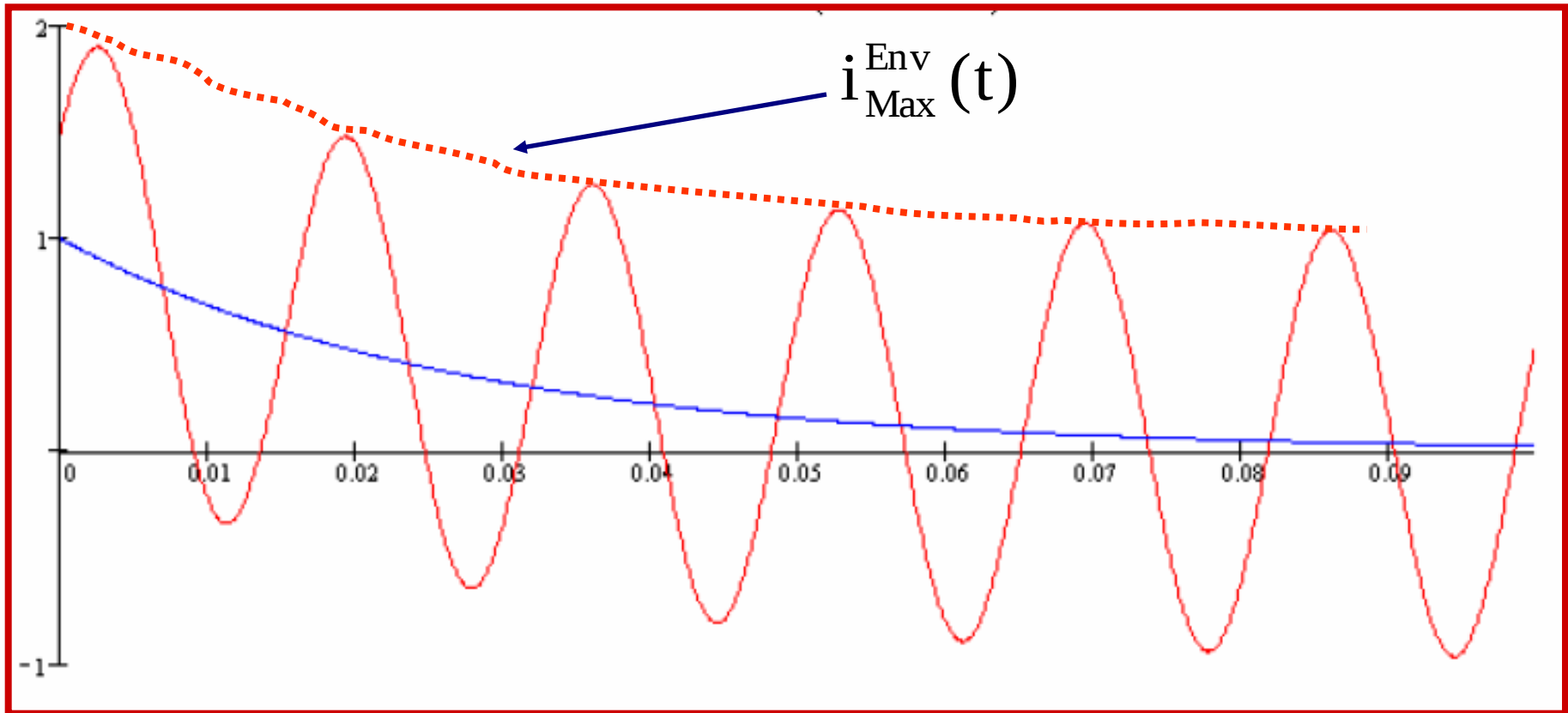
$$\text{si } \omega L \gg R \Rightarrow \text{tg}(\varphi) \rightarrow +\infty \Rightarrow \varphi \cong \frac{\pi}{2} \Rightarrow \theta \cong 0$$

Para $\theta=0$ la envolvente de las intensidades máximas será:

$$i_{\text{Max}}^{\text{Env}}(t) \cong i(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \sqrt{2} I_{\text{CC}} \text{sen}(\varphi) \left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

$$i_{\text{Max}}^{\text{Env}}(t) \cong \sqrt{2} I_{\text{CC}} \text{sen}(\varphi) \left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito



Introducción al Análisis de Cortocircuito

Su valor eficaz será:

$$I_{\text{Max}}^{\text{Env}}(t) \cong I_{\text{CC}} \sin(\varphi) \left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

De este modo se evalúa la intensidad de corriente transitoria máxima producida por un cortocircuito a partir de la intensidad de corriente de cortocircuito en régimen permanente.

Introducción al Análisis de Cortocircuito

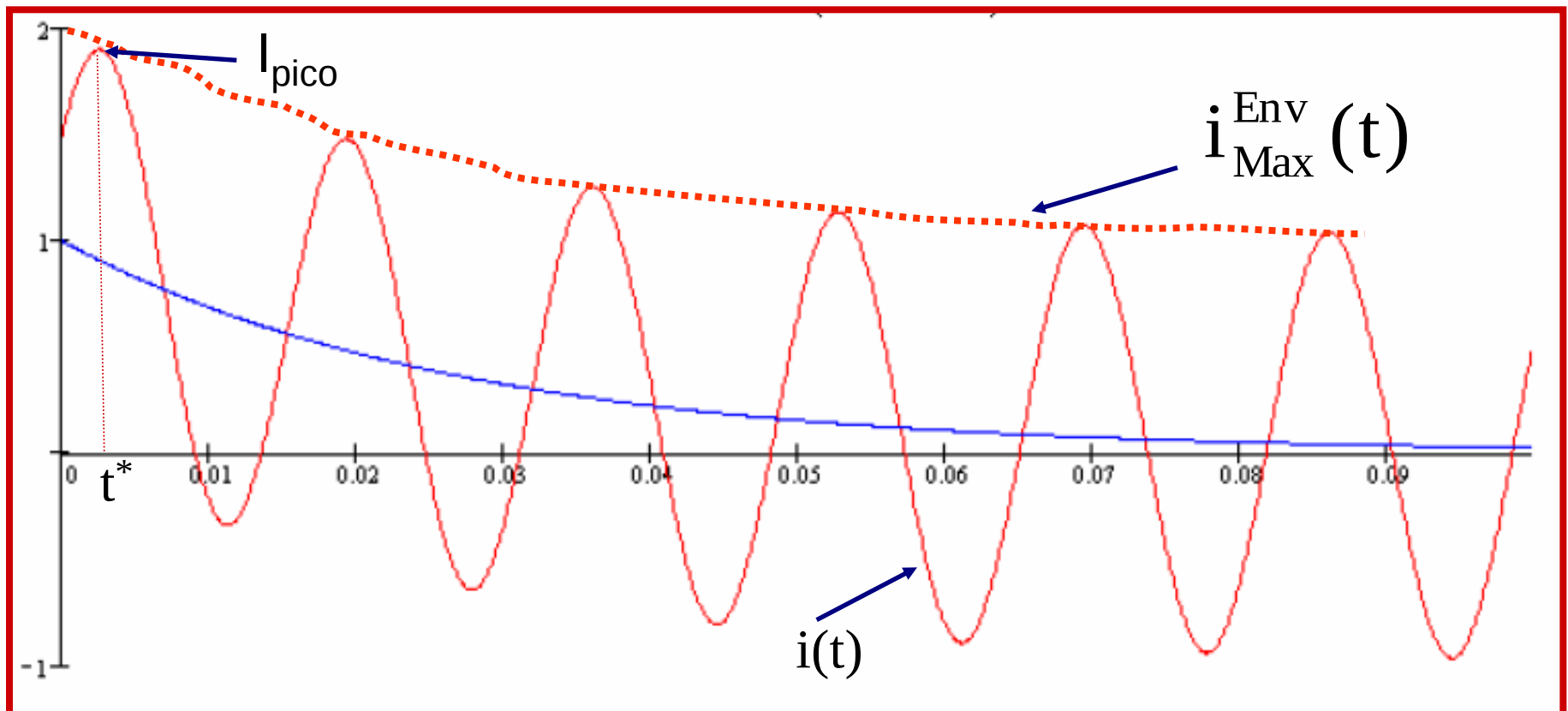
Para una red eléctrica general esta expresión adopta la forma:

$$I_{\text{Max}}^{\text{Env}}(t) \cong I_{\text{CC}} \sin(\varphi_{\text{eq}}) \left[1 + \exp\left(-\frac{R_{\text{eq}}}{X_{\text{eq}}} \omega t\right) \right]$$

Donde R_{eq} , X_{eq} y φ_{eq} son la resistencia, la reactancia y la fase equivalentes vistas desde la falla, que se obtienen a partir de la matriz de impedancias de barras (impedancia de Thevenin vista desde la falla)

Introducción al Análisis de Cortocircuito

La intensidad de corriente de pico (de cresta o de choque) es el mayor valor de la intensidad de corriente máxima en el tiempo:



Introducción al Análisis de Cortocircuito

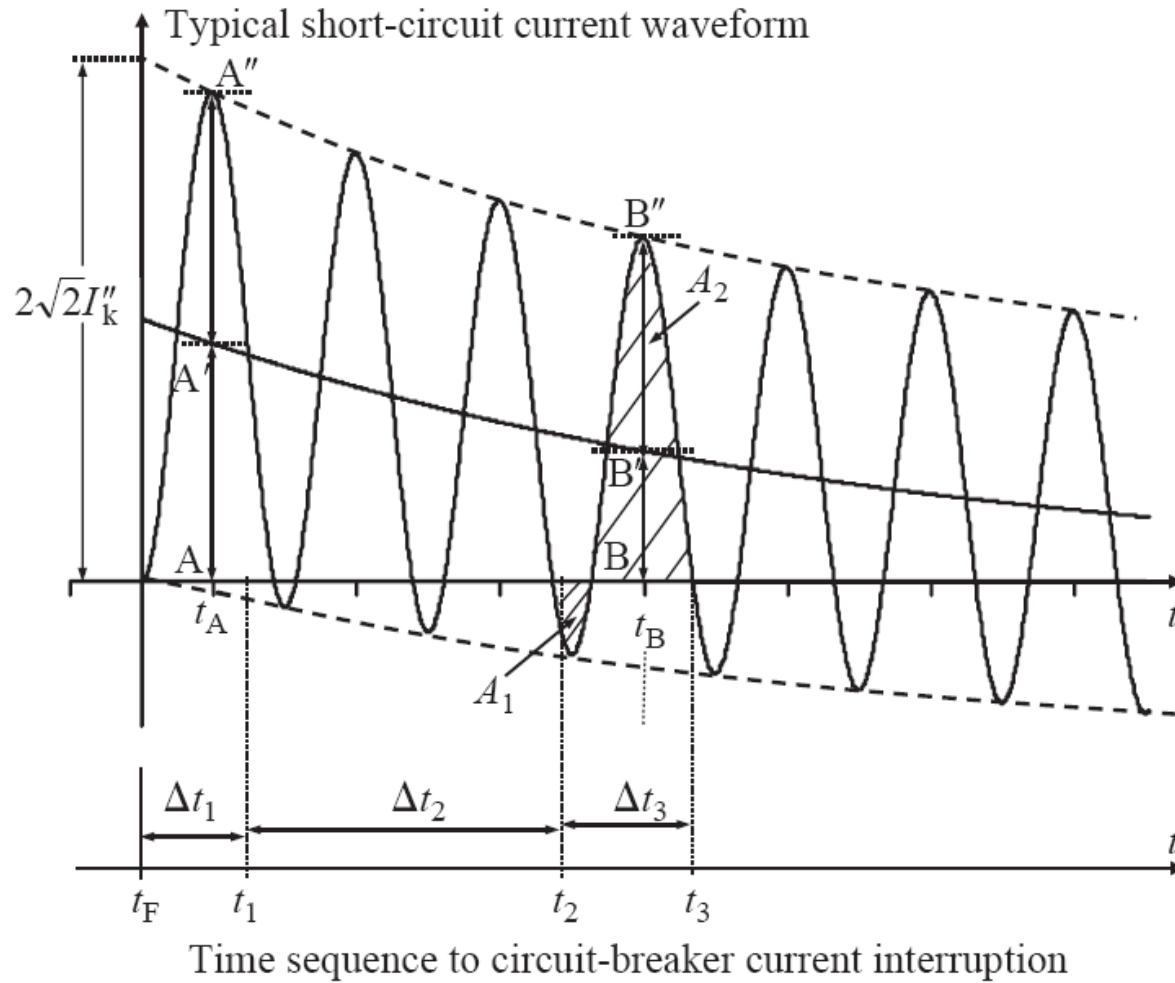
La intensidad de corriente de pico se obtiene en el tiempo t^* cuando:

$$I_{\text{pico}} = i(t^*) = i_{\text{Max}}^{\text{Env}}(t^*) \Rightarrow \omega t^* = \pi \Rightarrow$$

$$t^* = \frac{1}{2f} = \frac{1}{100} [\text{s}] = 10 \text{ ms } (1/2 \text{ ciclo})$$

$$I_{\text{pico}} \cong \sqrt{2} I_{\text{CC}} \sin(\varphi) \left[1 + \exp\left(-\frac{R}{X} \pi\right) \right]$$

Introducción al Análisis de Cortocircuito



Introducción al Análisis de Cortocircuito

t_F = Instant of short-circuit fault.

Δt_1 = Protection relay time.

t_A = Instant of 'initial peak' of short-circuit current.

t_1 = Instant of energisation of circuit-breaker trip circuit.

Δt_2 = Circuit-breaker opening time.

t_2 = Instant of circuit-breaker contact separation = instant of arc initiation.

Δt_3 = Circuit-breaker current arcing time.

t_3 = Instant of final arc extinction = instant of short-circuit current interruption.

t_B = Instant of peak of major current loop just before current interruption.

$2\sqrt{2}I''_k = 2.828I''_k$ = Theoretical current at the instant of short-circuit fault t_F where I''_k is the rms short-circuit current at $t = t_F$.

Introducción al Análisis de Cortocircuito

AA'' = 'Initial peak' short-circuit current at $t = t_A$ and is denoted i_p . i_p is also termed '½ cycle peak' current, 'peak make' current or 'making' current. $AA'' = AA' + A'A''$ where AA' = magnitude of dc current component at $t = t_A$ and $A'A''$ = peak ac current component at $t = t_A$ and is equal to $\sqrt{2} \times$ rms current at $t = t_A$.

BB'' = Peak short-circuit current at $t = t_B$ and is denoted i_b . $BB'' = BB' + B'B''$ where BB' = magnitude of dc current component at $t = t_B$ and $B'B''$ = peak ac current component at $t = t_B$ and is equal to $\sqrt{2} \times I_b$, where I_b is rms current at $t = t_B$.

Percentage dc current component at $t = t_B$ given by $(BB' \times 100)/B'B''$.

$A_1 + A_2$ = Area that corresponds to the arc energy measured from instant of contact separation or arc initiation t_2 to instant of final arc extinction or current interruption t_3 .

Introducción al Análisis de Cortocircuito

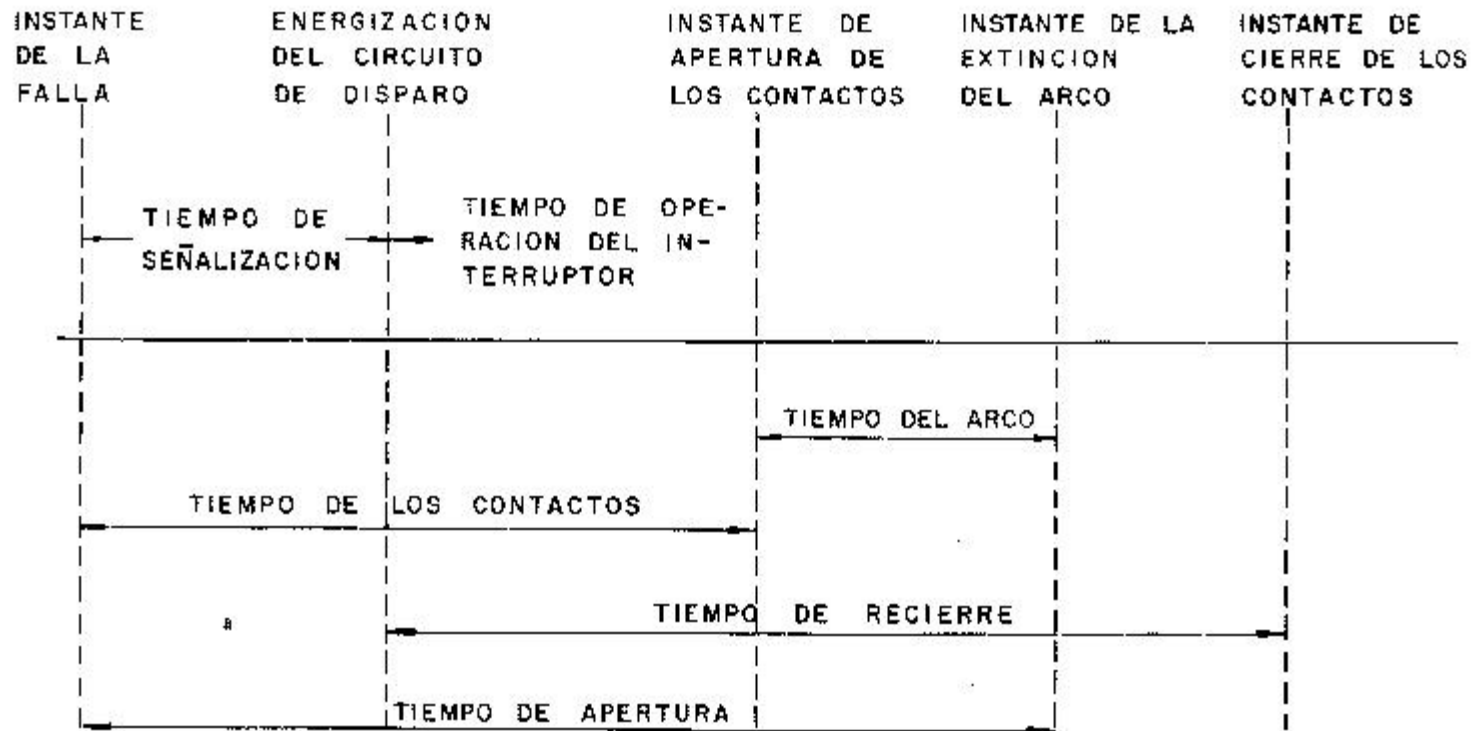
Interruptor en SF_6



Contacts and arc-quenching mechanism

Introducción al Análisis de Cortocircuito

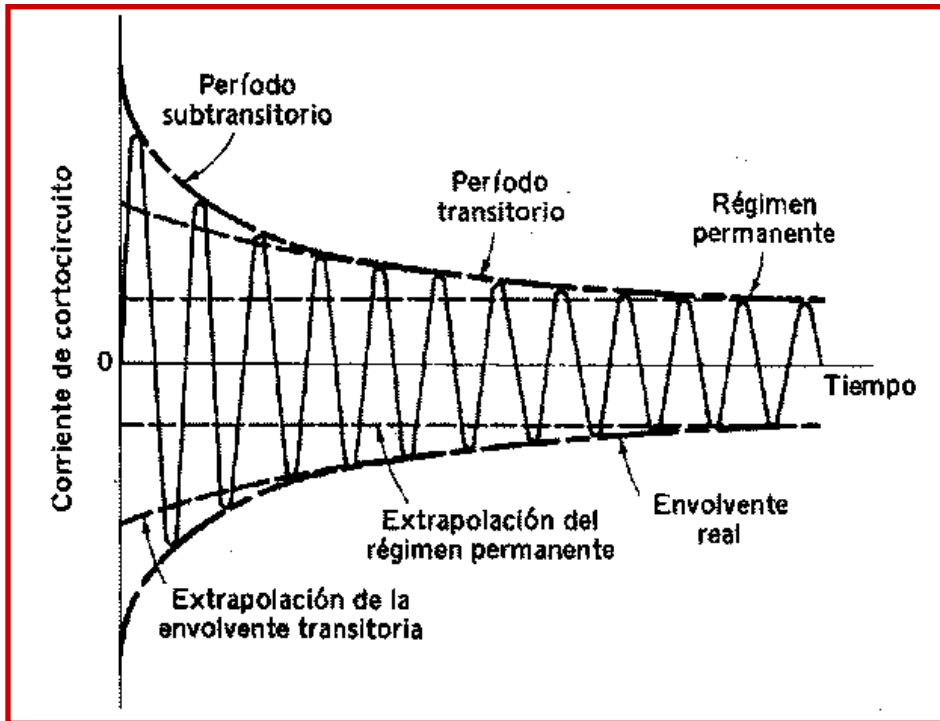
Tiempos de operacion de un Interruptor



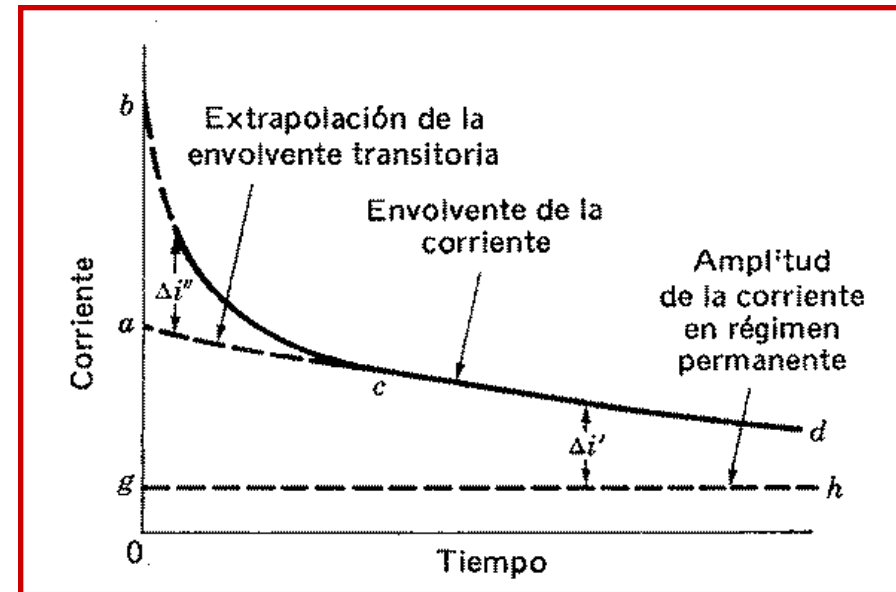


Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

❑ Generador Síncrono en vacío



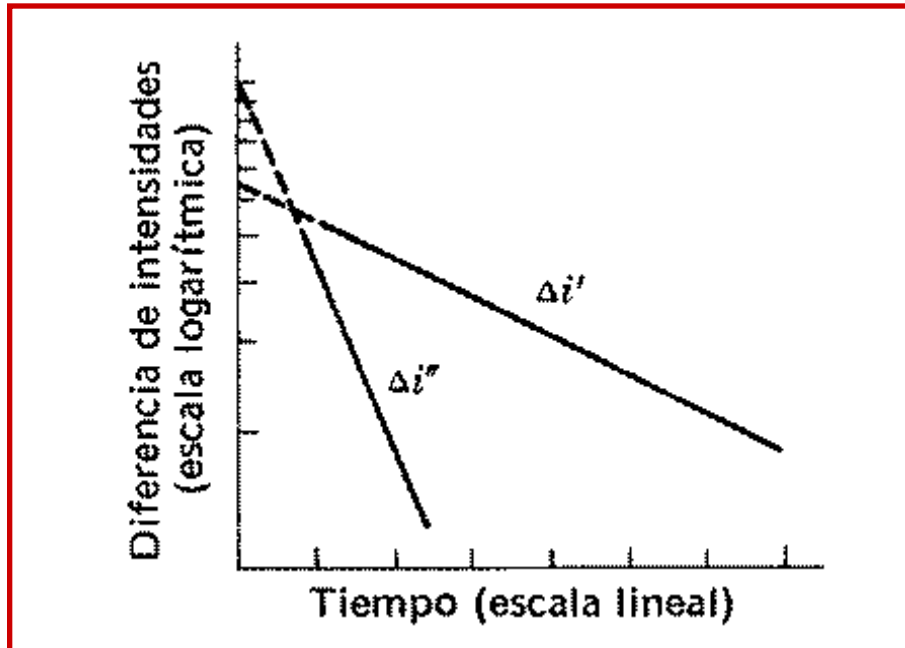
Corriente simétrica en una fase de CC trifásico a bornes de un GS en vacío



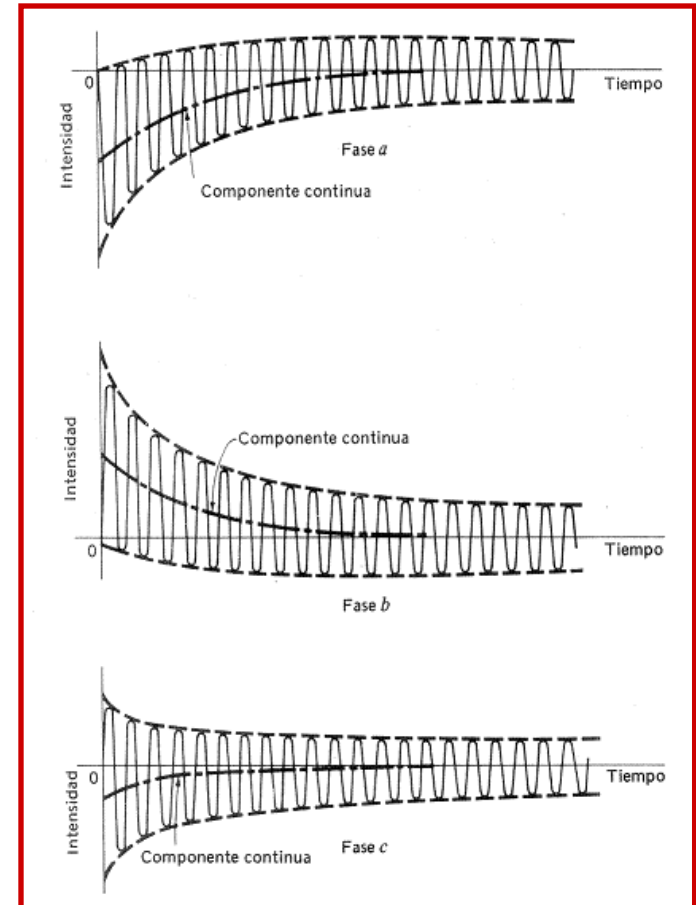
Envolvente de la corriente simétrica en una fase de CC trifásico a bornes de un GS en vacío

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

□ Generador Síncrono en vacío



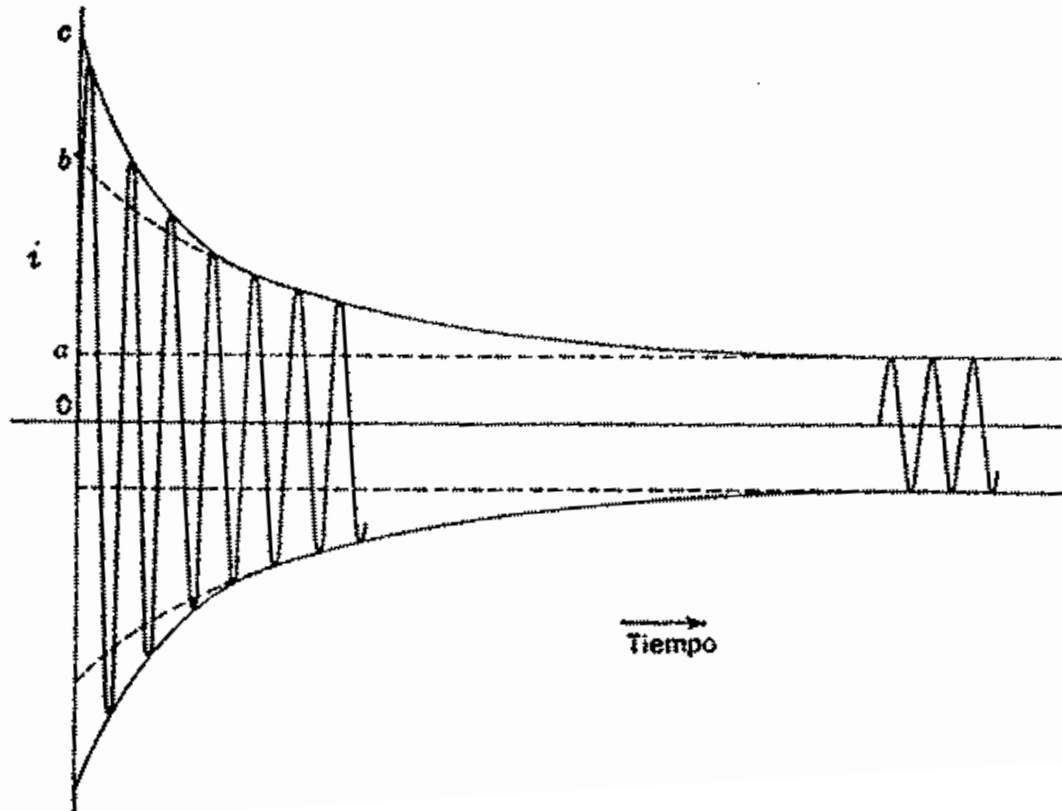
Diferencias de corriente simétrica en una fase de CC trifásico a bornes de un GS en vacío



Corrientes de CC trifásico a bornes de un GS en vacío

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

❑ Generador Síncrono en vacío



Corriente en una fase de CC trifásico a bornes de un GS en vacío (componente transitoria eliminada)

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

$$I_a = \sqrt{2} I_{CC}$$

donde I_{CC} es la corriente de cortocircuito de régimen permanente

$$I_{CC} = \frac{E_g}{X_d}$$

donde:

E_g : valor eficaz de la tensión fase-neutro en vacío

X_d : reactancia síncrona de eje directo

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

$$0b : \sqrt{2} I'_{CC}$$

donde I'_{CC} es la corriente de cortocircuito transitoria

$$I'_{CC} = \frac{E_g}{X'_d}$$

donde:

E_g : valor eficaz de la tensión fase-neutro en vacío

X'_d : reactancia transitoria de eje directo

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

$I_{cc} : \sqrt{2} I''_{CC}$ donde I''_{CC} es la corriente de cortocircuito subtransitoria

$$I''_{CC} = \frac{E_g}{X''_d}$$

donde:

E_g : valor eficaz de la tensión fase-neutro en vacío

X''_d : reactancia subtransitoria de eje directo

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2} E_g}{X_d} \cos(\omega t + \theta_0) +$$
$$\sqrt{2} E_g \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_d'}\right) \cos(\omega t + \theta_0) +$$
$$\sqrt{2} E_g \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_d''}\right) \cos(\omega t + \theta_0)$$

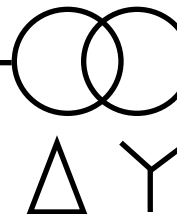
Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Ejemplo: Dos GS están conectados en paralelo al lado de baja tensión de un transformador trifásico de dos devanados.

50 MVA 13,8kV $X_d'' = 25\%$



75 MVA 13,8/69 kV $X_d'' = 10\%$



25 MVA 13,8kV $X_d'' = 25\%$

Antes de la falla, la tensión en el lado de alta del trafo es de 66 kV. El trafo no tiene carga y no circula corriente entre los generadores.

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado



Consideramos los valores de bases siguientes:

$$V_{\text{base}}^{\text{AT}} = 69 \text{ kV}$$

$$V_{\text{base}}^{\text{BT}} = 13,8 \text{ kV}$$

$$S_{\text{base}}^{3\Phi} = 75 \text{ MVA}$$

En valores pu resulta para el Generador 1:

$$X_d'' \text{G1} = 0,25 \times \frac{75.000}{50.000} = 0,375$$

$$E_{g1} = \frac{66}{69} = 0,9565$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado



En valores pu resulta para el Generador 2:

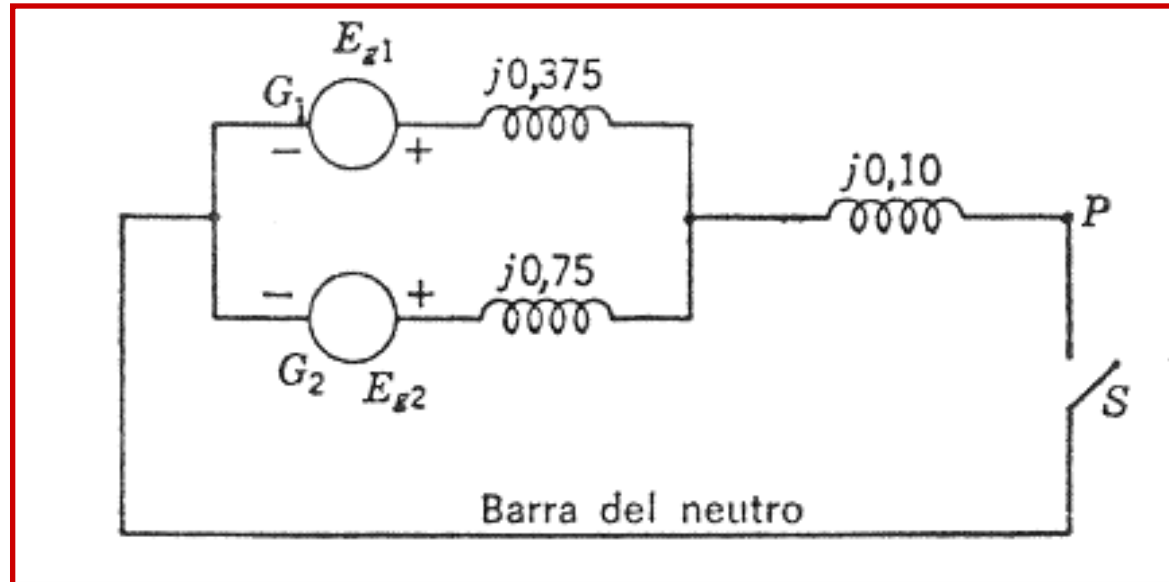
$$X_d'' G2 = 0,25 \times \frac{75.000}{25.000} = 0,750$$

$$E_{g2} = \frac{66}{69} = 0,9565$$

En valores pu resulta para el trafo: $X_{TR} = 0,10$.

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Diagrama de reactancias antes de la falla



La reactancia subtransitoria en paralelo es:

$$X_d'' // = \frac{0,375 \times 0,75}{0,375 + 0,75} = 0,25$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

La corriente de cortocircuito subtransitoria del lado de alta tensión del trafo será:

$$I_{CC}''_{TR} = \frac{E_g}{X_d'' //} = \frac{0,9565}{j 0,25 + j 0,10} = -j 2,7329$$

y en los generadores:

$$I_{CC}''_{G1} = \frac{X_d''_{G2}}{X_d''_{G1} + X_d''_{G2}} \times I_{CC}''_{TR} = \frac{j 0,75}{j 0,375 + j 0,75} \times j 2,7329 = -j 1,819$$

$$I_{CC}''_{G2} = \frac{X_d''_{G1}}{X_d''_{G1} + X_d''_{G2}} \times I_{CC}''_{TR} = \frac{j 0,375}{j 0,375 + j 0,75} \times j 2,7329 = -j 0,911$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

La intensidad de corriente de cortocircuito subtransitoria de los generadores, expresada en [A]:

$$I''_{CC} G1 = 1,819 \times \frac{75.000}{\sqrt{3} 13,8} = 5.707,6 \text{ [A]}$$

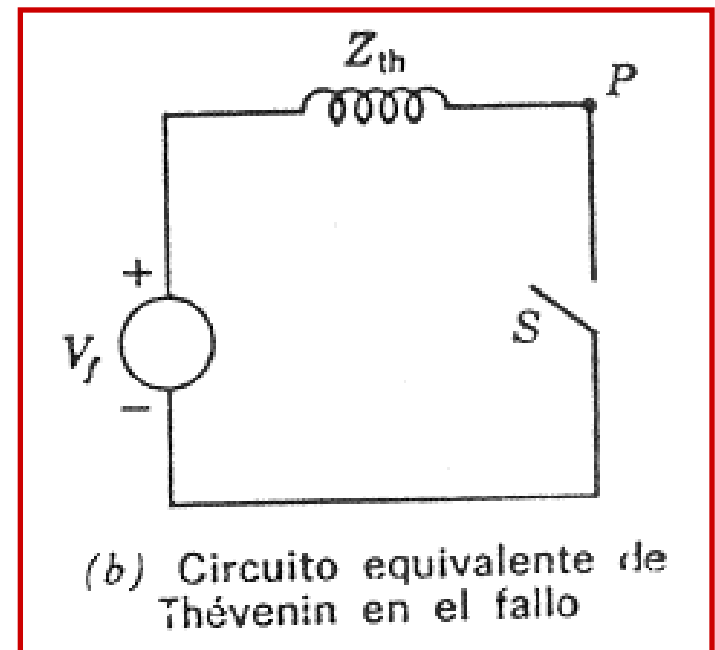
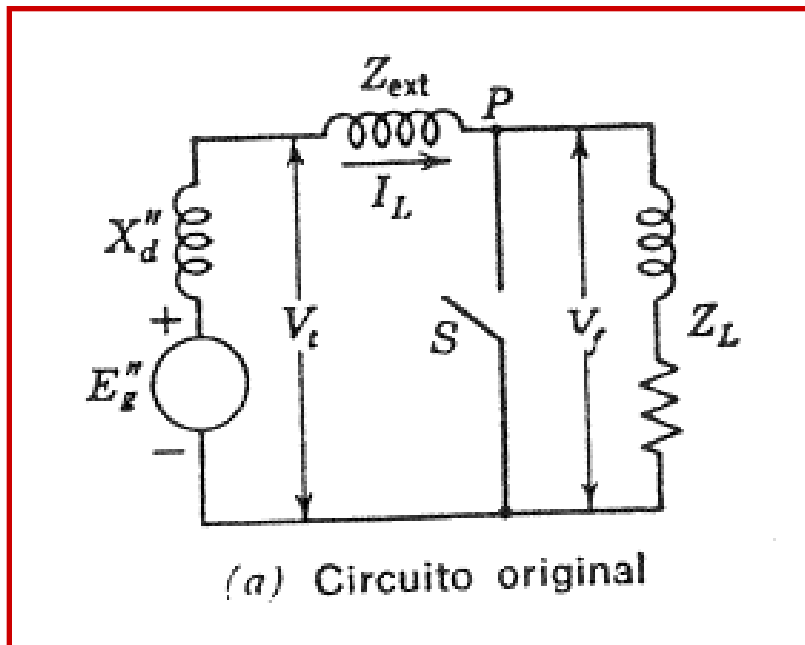
$$I''_{CC} G2 = 0,911 \times \frac{75.000}{\sqrt{3} 13,8} = 2.858,5 \text{ [A]}$$



Aunque las reactancias no son constantes de las máquinas síncronas, ya que dependen del grado de saturación del circuito magnético, sus valores están normalmente dentro de ciertos limites para cada tipo de máquina.

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

❑ Generador Síncrono en carga



Circuitos de un GS abasteciendo una carga trifásica equilibrada

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

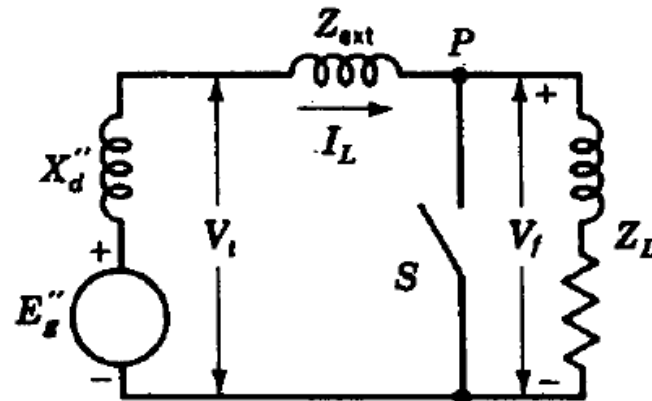
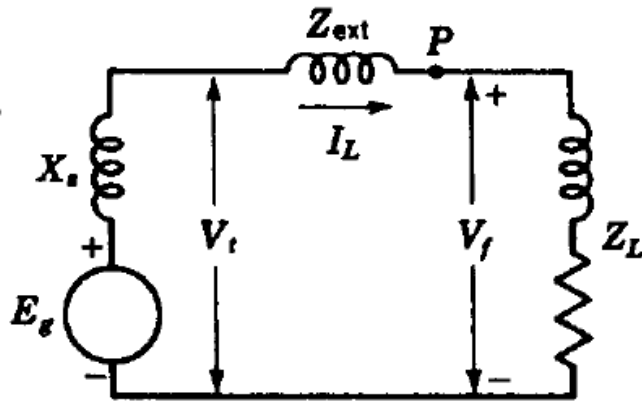
Impedancia de Thevenin

$$Z_{Th} = \frac{(Z_{ext} + jX_d'') \times Z_L}{Z_{ext} + jX_d'' + Z_L}$$

Corriente de cortocircuito subtransitoria en la falla

$$I_{CC}'' = \frac{V_f}{Z_{Th}} = \frac{V_f \times (Z_{ext} + jX_d'' + Z_L)}{(Z_{ext} + jX_d'') \times Z_L}$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado



$$I_{CC}'' = \frac{V_f}{Z_{Th}} \quad y \quad I_{CC}'' = \frac{E}{Z_{ext} + jX_d''} \Rightarrow$$

$$E'' = V_f \frac{(Z_{ext} + jX_d'')}{Z_{Th}} = V_f \frac{(Z_{ext} + jX_d'' + Z_L)}{Z_L} \Rightarrow$$

$$E'' = I_L \times (Z_{ext} + jX_d'' + Z_L) \Rightarrow E'' = \underbrace{I_L \times Z_{ext}}_{V_t} + I_L \times jX_d'' + \underbrace{I_L \times Z_L}_{V_f=0}$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Tensión (interna) detrás de la reactancia subtransitoria de un GS

$$E_g'' = V_t + I_L \times jX_d''$$

Tensión (interna) detrás de la reactancia transitoria de un GS

$$E_g' = V_t + I_L \times jX_d'$$

Tensión (interna) detrás de la reactancia síncrona de un GS

$$E_g = V_t + I_L \times jX_d$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

❑ Motor Síncrono

Tensión (interna) detrás de la reactancia subtransitoria de un MS

$$E''_m = V_t - I_L \times jX''_d$$

Tensión (interna) detrás de la reactancia transitoria de un MS

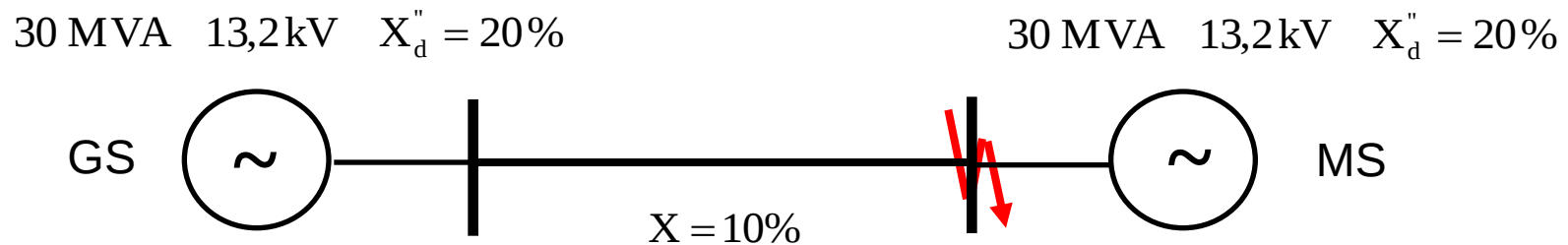
$$E'_m = V_t - I_L \times jX'_d$$

Tensión (interna) detrás de la reactancia síncrona de un MS

$$E_m = V_t - I_L \times jX_d$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Ejemplo: Un GS abastece a un MS a través de una línea.



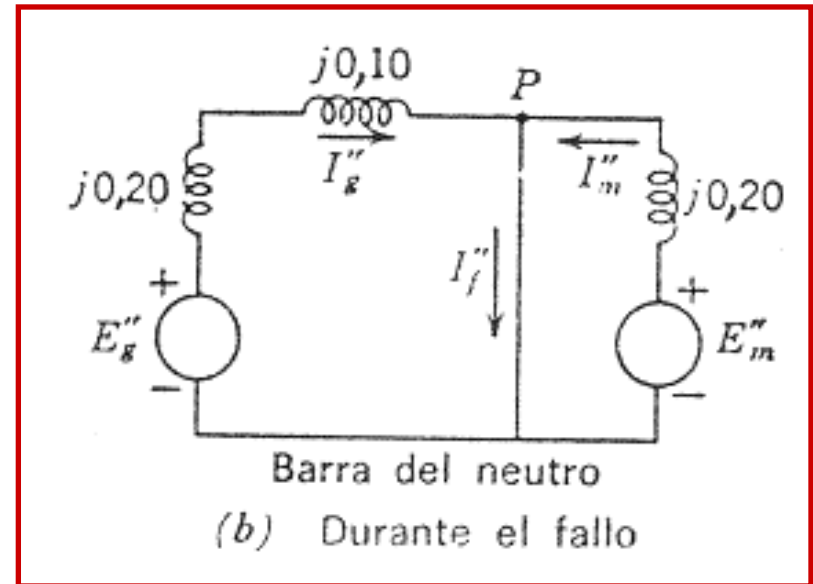
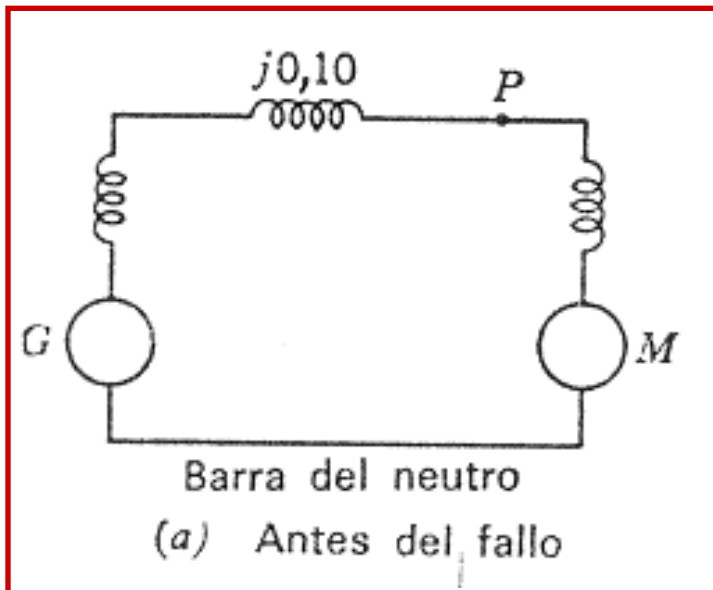
La reactancia de la línea esta expresada sobre la base de las máquinas. El motor esta consumiendo 20 MW con un factor de potencia de 0,8 en atraso (positivo), y una tensión en bornes de 12,8 kV al producirse una falla trifásica en sus terminales.

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Consideramos los valores de bases siguientes:

$$V_{\text{base}} = 13,2 \text{ kV}$$

$$S_{\text{base}}^{3\Phi} = 30 \text{ MVA}$$



Circuitos equivalentes

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

$$V_f = \frac{12,8}{13,2} = 0,9697 \angle 0^\circ \text{ [pu]}$$

$$I_{\text{base}} = \frac{30.000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 13,2 \text{ kV}} = 1.312 \text{ [A]}$$

$$I_L = \frac{20.000 \text{ kW}}{0,8 \times \sqrt{3} \times 12,8 \text{ kV}} = 1.127,6 \angle 36,87^\circ \text{ [A]}; \text{ pues } \cos^{-1}(0,8) \cong 36,87^\circ$$

$$I_L = \frac{1.127,6 \angle 36,87^\circ \text{ [A]}}{1.312 \text{ [A]}} = 0,8594 \angle 36,87^\circ \text{ [pu]}$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Para el generador:

$$V_t = 0,9697 \angle 0^\circ + 0,8594 \angle 36,87^\circ \times j 0,10 \text{ [pu]} = \\ = 0,9181 + j 0,0687 \text{ [pu]} = 0,9207 \angle 4,28^\circ \text{ [pu]}$$

$$E_g'' = 0,9207 \angle 4,28^\circ \text{ [pu]} + 0,8594 \angle 36,87^\circ \times j 0,20 \text{ [pu]} = 0,8407 \angle 14,20^\circ \text{ [pu]}$$

$$I_g'' = \frac{0,8407 \angle 14,20^\circ}{j 0,20 + j 0,10} \text{ [pu]} = 2,8023 \angle -75,8^\circ \text{ [pu]}$$

$$I_g'' = 2,8023 \angle -75,8^\circ \text{ [pu]} \times 1.312 \text{ [A]} = 3.676,62 \angle -75,8^\circ \text{ [A]}$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Para el motor:

$$V_t = V_f = 0,9697 \angle 0^\circ \text{ [pu]}$$

$$E_m'' = 0,9697 \angle 0^\circ \text{ [pu]} - 0,8594 \angle 36,87^\circ \times j 0,20 \text{ [pu]} = 1,0816 \angle -7,30^\circ \text{ [pu]}$$

$$I_m'' = \frac{1,0816 \angle -7,30^\circ}{j 0,20} \text{ [pu]} = 5,408 \angle -97,30^\circ \text{ [pu]}$$

$$I_m'' = 5,408 \angle -97,30^\circ \text{ [pu]} \times 1.312 \text{ [A]} = 7.095,3 \angle -97,30^\circ \text{ [A]}$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

En la falla:

$$I_f'' = I_m'' + I_g'' = 5,408 \angle -97,30^\circ + 2,8023 \angle -75,80^\circ \quad [\text{pu}]$$

$$I_f'' \cong 8,081 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}]$$

$$I_f'' = 8,081 \angle -90^\circ [\text{pu}] \times 1.312 [\text{A}] \cong 10.602,1 \angle -90^\circ [\text{A}]$$

Contribución del Generador en MVA:

$$S_g^{3\Phi} = V_t I_g''^* = 0,9207 \angle 4,28^\circ \times 2,8023 \angle 75,8^\circ [\text{pu}] \cong 2,58 \angle 80,08^\circ [\text{pu}]$$

$$S_g^{3\Phi} = 2,58 \angle 80,08^\circ [\text{pu}] \times 30 [\text{MVA}] \cong 77,4 \angle 80,08^\circ [\text{MVA}]$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado



Contribución del Motor en MVA:

$$S_m^{3\Phi} = V_t I_m^{''*} = 0,9697 \angle 0^\circ \times 5,408 \angle 97,3^\circ [\text{pu}] \cong 5,2441 \angle 97,3^\circ [\text{pu}]$$

$$S_m^{3\Phi} = 5,2441 \angle 97,3^\circ [\text{pu}] \times 30 [\text{MVA}] \cong 157,32 \angle 97,3^\circ [\text{MVA}]$$

Falla total en MVA:

$$S_f^{3\Phi} = V_f I_f^{''*} = 0,9697 \angle 0^\circ \times 8,081 \angle 90^\circ [\text{pu}] \cong 7,8361 \angle 90^\circ [\text{pu}]$$

$$S_f^{3\Phi} = 7,8361 \angle 90^\circ [\text{pu}] \times 30 [\text{MVA}] \cong 235,1 \angle 90^\circ [\text{MVA}]$$



Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Ejemplo: resolver el ejemplo anterior utilizando el Teorema de Thevenin

$$Z_{Th} = \frac{j 0,30 \times j 0,20}{j 0,30 + j 0,20} = j 0,12$$

$$V_f = 0,9697 \angle 0^\circ \quad [pu]$$

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{Th}} = \frac{0,9697 \angle 0^\circ}{j 0,12} \cong 8,081 \angle -90^\circ \quad [pu] \quad \text{☺}$$

Esta corriente es la que sale del circuito en la falla al reducirse a cero la tensión en el punto. Si esta corriente originada por la falla se divide entre los circuitos paralelos de las máquinas síncronas inversamente a sus impedancias, los valores resultantes son las corrientes de cada máquina, debidas exclusivamente al **cambio** de la tensión en el punto de falla.

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

$$I_g'' \Delta = \frac{j 0,20}{j 0,50} \times 8,081 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}] \cong 3,2324 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}]$$

$$I_m'' \Delta = \frac{j 0,30}{j 0,50} \times 8,081 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}] \cong 4,8486 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}]$$

A las corrientes de falla de cada máquina se deben sumar las corrientes de prefalla correspondientes para obtener las corrientes de falla totales.

$$I_g'' = I_L + I_g'' \Delta$$

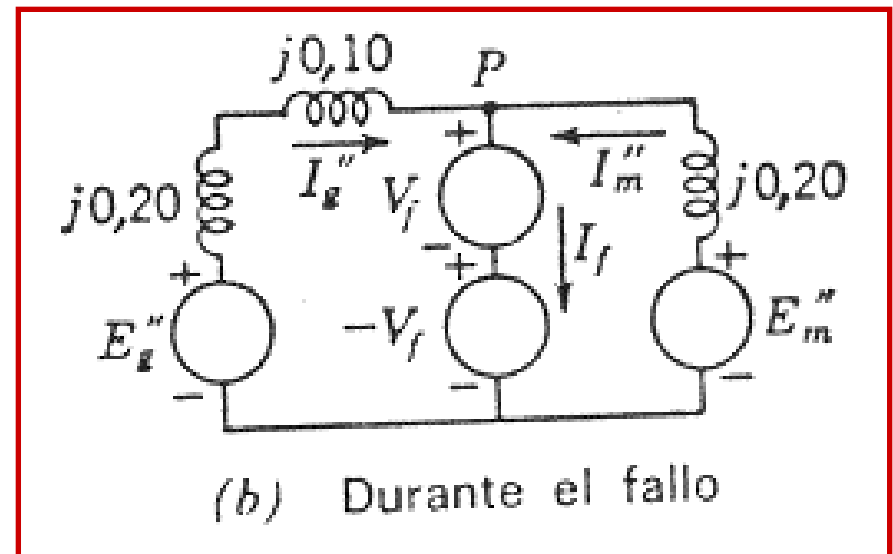
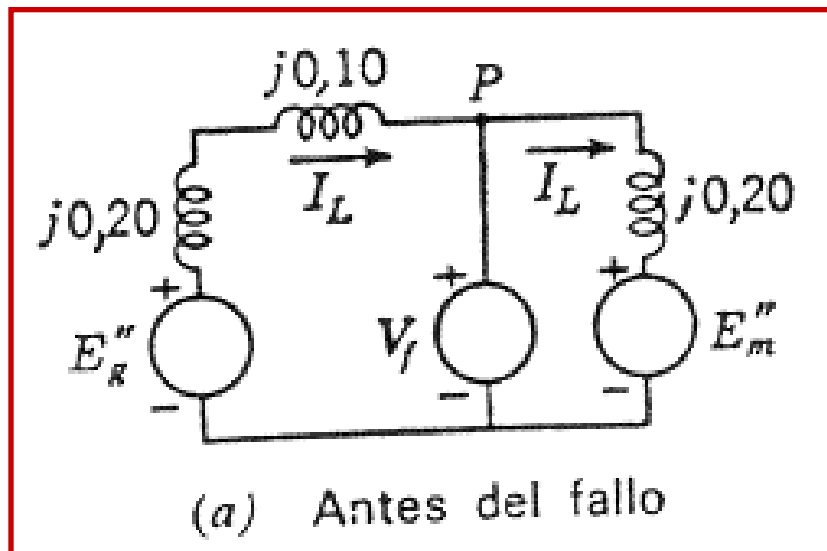
$$I_g'' = 0,8594 \angle 36,87^\circ + 3,2324 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}] \cong 2,8024 \angle -75,8^\circ \quad [\text{pu}]$$

$$I_m'' = -I_L + I_m'' \Delta$$

$$I_m'' = -0,8594 \angle 36,87^\circ + 4,8486 \angle -90^\circ \quad [\text{pu}] \cong 5,4081 \angle -97,3^\circ \quad [\text{pu}]$$

Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado

Teorema de Superposición



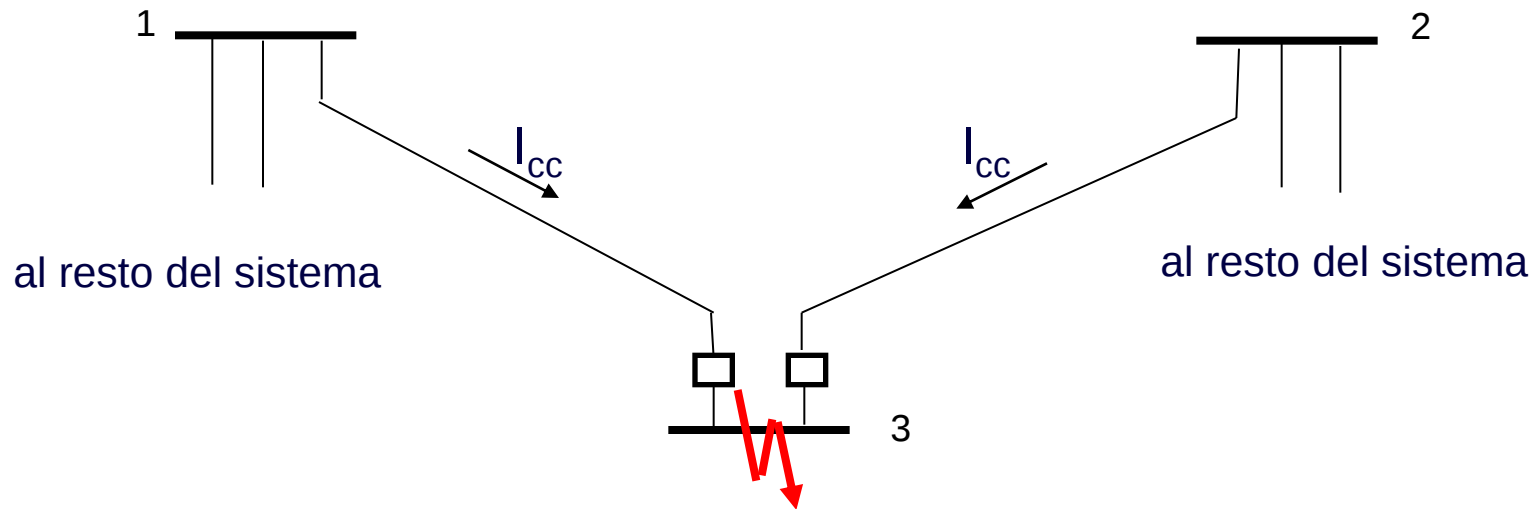
Comportamiento de la máquina síncrona frente a un CC equilibrado



Teorema de Superposición

- 1) Cortocircuitando E''_g , E''_m , V_f , con $-V_f$ en el circuito, se obtienen las corrientes de falla en las máquinas debidas al cambio de la tensión en el punto de falla.
- 2) Cortocircuitando $-V_f$, con E''_g , E''_m , V_f en el circuito, se obtienen las corrientes de prefalla en las máquinas.
- 3) Sumando los dos valores de corriente se obtienen las corrientes de falla totales en cada una de las máquinas.

Nivel de Falla (Potencia de CC)



La potencia de CC (Short-Circuit Capacity) de una barra se define por:

$$|SCC^{3\Phi}| = |V_{prefalla}| \times |I_{falla}| [pu]$$

$$|SCC^{3\Phi}| = \sqrt{3} \times |V_{prefalla}| \times |I_{falla}| [MVA]$$

Nivel de Falla (Potencia de CC)

Si consideramos como tensión de prefalla su valor nominal, resulta:

$$\left| \text{SCC}^{3\Phi} \right| \cong \left| I_{\text{falla}} \right| [\text{pu}]$$

Si aplicamos el Teorema de Thevenin a la barra 3:

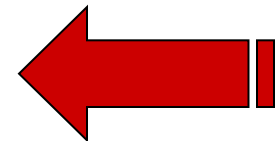
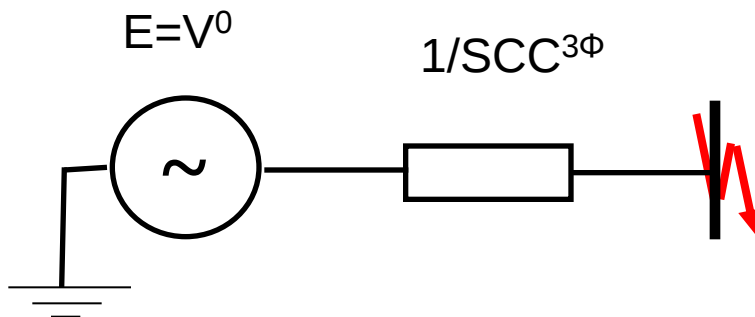
$$I_{\text{falla}} = \frac{V_3^0}{Z^f + Z_{\text{Th}}} \quad \text{si } Z^f \neq 0$$

$$I_{\text{falla}} = \frac{V_3^0}{Z_{\text{Th}}} \quad \text{si } Z^f = 0 \quad (\text{CC rigido a tierra})$$

Nivel de Falla (Potencia de CC)

Si consideramos como tensión de prefalla su valor nominal, resulta:

$$|Z_{Th}| \approx \frac{1}{|SCC^{3\Phi}|}$$



Sistema
visto desde
la falla

Nivel de Falla (Potencia de CC)

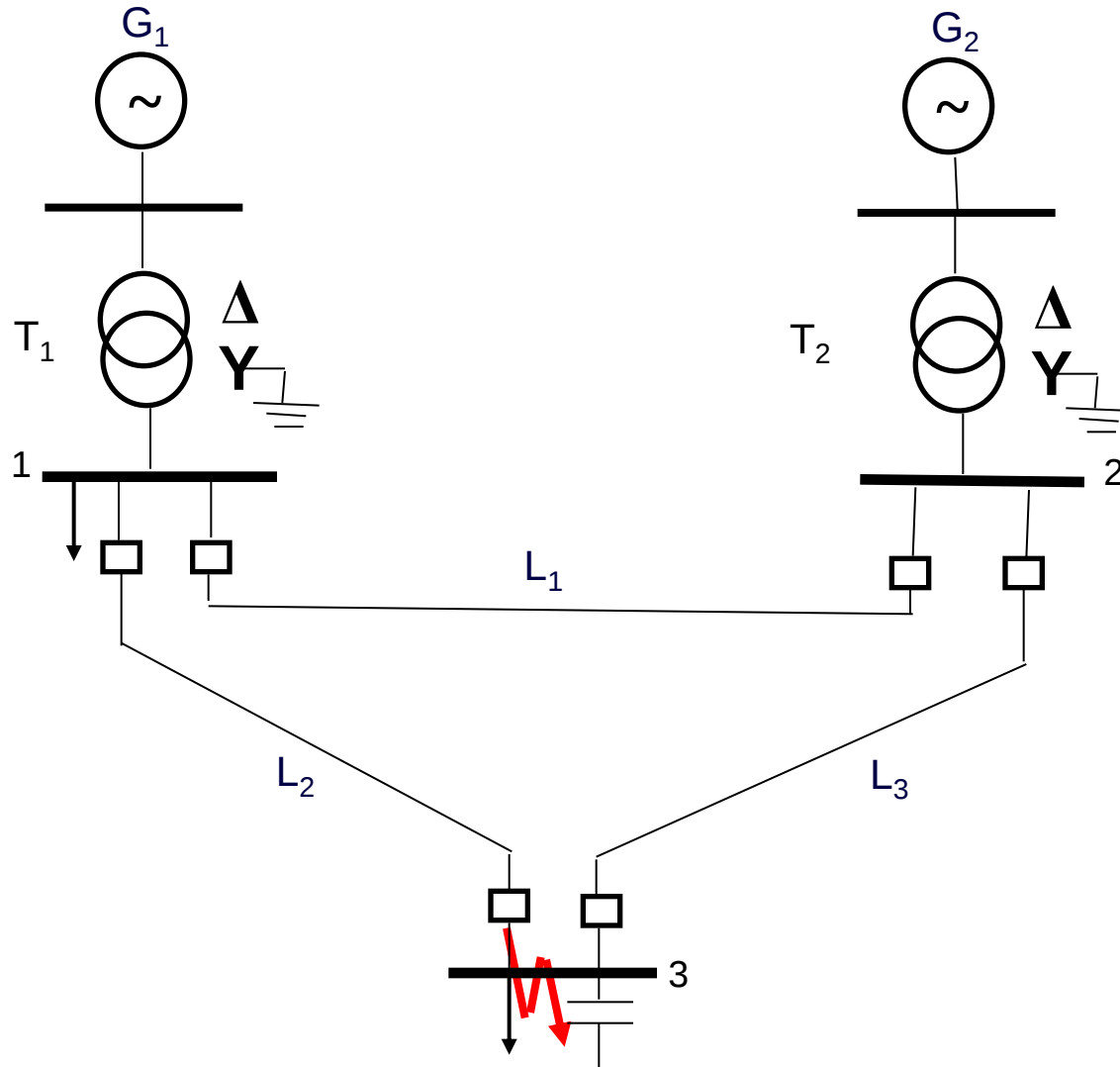
- o Para todo propósito práctico, la Z_{Th} es *reactiva*.
- o Para todo propósito práctico, los MVA de CC en el caso de un CC rígido a tierra es *potencia reactiva (inductiva)*.
- o Debido a las variaciones que experimenta la corriente de CC aportada por las maquinas síncronas, la Z_{Th} no es constante; asume un valor mínimo inmediatamente después del CC y luego eventualmente aumenta.
- o La “*firmeza*” de una barra es directamente proporcional a su $SCC^{3\Phi}$; esto es, cuando su $SCC^{3\Phi}$ aumenta, la impedancia interna del sistema vista desde la barra Z_{Th} disminuye. La habilidad de la barra para mantener su tensión cuando se produce un CC en otras barras en consecuencia aumenta. Obsérvese, sin embargo, que si el CC ocurre en la barra, un $SCC^{3\Phi}$ elevado implica elevadas corrientes de CC (en la barra). Esto somete a esfuerzos a los interruptores; esto explica la razón de insertar reactores en la barra para disminuir artificialmente su $SCC^{3\Phi}$.

Nivel de Falla (Potencia de CC)

- Obsérvese que los MVA de CC a los que es sometido un interruptor, esto es el $SCC^{3\Phi}$ de la barra correspondiente, es una mejor medida de la sollicitación del interruptor, más que la corriente de CC que debe interrumpir.
- En ocasiones, a los fines de simplificar el análisis, se supone que una barra es “*infinitamente firme*”. Esto significa que suponemos que la barra tiene un $SCC^{3\Phi}$ arbitrariamente elevado. Puesto que esto implicaría una impedancia interna del sistema Z^{Th} nula, concluimos que una tal barra mantendrá constante su tensión, excepto para un CC sobre si misma.
- Finalmente, en grandes sistemas de potencia, los $SCC^{3\Phi}$ pueden alcanzar valores del orden de los 50.000 MVA; a 500 kV corresponde a corrientes de CC del orden de los 60 kA.

Ejemplo de Análisis de CC

Ejemplo:



Cortocircuito

Ejemplo de Análisis de CC



Un CC trifásico rígido a tierra se desarrolla en la barra 3. Para determinar la solicitud de los interruptores y fijar los tiempos de actuación de los relevadores, se requieren los datos siguientes:

1. Corriente de falla en barra 3, calculadas de tres a cuatro ciclos posteriores al CC trifásico.
2. $SCC^{3\Phi}$ de la barra 3.
3. Corrientes de falla en la red.
4. Tensiones en barras 1 y 2, calculadas de tres a cuatro ciclos posteriores al CC trifásico.

Ejemplo de Análisis de CC

❑ METODOLOGIA DE ANALISIS

- 1) Conformación del diagrama de red equivalente para la condición de prefalla.
- 2) Determinación del estado de prefalla de la red (Flujo de Potencia).
- 3) Determinación de las variaciones de corrientes y tensiones en la red causadas por el CC.
- 4) Superposición de las variaciones de corrientes y tensiones en la red calculadas en el paso 3 con las corrientes y tensiones de prefalla en la red calculadas en el paso 2 para obtener las corrientes y tensiones de falla. (Principio de Superposición)

Ejemplo de Análisis de CC

Paso 1: Diagrama de red equivalente para la condición de prefalla.

- Representación de las líneas de transmisión: impedancias en p.u. referidas a 50 MVA - 120 kV.
- Representación de generadores y transformadores:

G1: 100 MVA $X'_d = 20\%$

G2: 200 MVA $X'_d = 20\%$

T1: 100 MVA $X = 10\%$

T2: 200 MVA $X = 10\%$

Cambiando la base

$$Z [\text{pu}]_{\text{base2}} = Z [\text{pu}]_{\text{base1}} \times \left(\frac{V_{\text{base1}}}{V_{\text{base2}}} \right)^2 \times \frac{S_{\text{base2}}}{S_{\text{base1}}}$$



$$X'_d G1 = 0,20 \times \frac{50.000 \text{ kVA}}{100.000 \text{ kVA}} = 0,10 [\text{pu}]$$

$$X'_d G2 = 0,20 \times \frac{50.000 \text{ kVA}}{200.000 \text{ kVA}} = 0,05 [\text{pu}]$$

$$XT1 = 0,10 \times \frac{50.000 \text{ kVA}}{100.000 \text{ kVA}} = 0,05 [\text{pu}]$$

$$XT2 = 0,10 \times \frac{50.000 \text{ kVA}}{200.000 \text{ kVA}} = 0,025 [\text{pu}]$$

Ejemplo de Análisis de CC

- Representación de las demandas en barras 1 y 3:

$$S_{D1}=1+ j \, 0,5 \text{ [pu]}$$

$$S_{D3}=0,5+ j \, 0 \text{ [pu]}$$

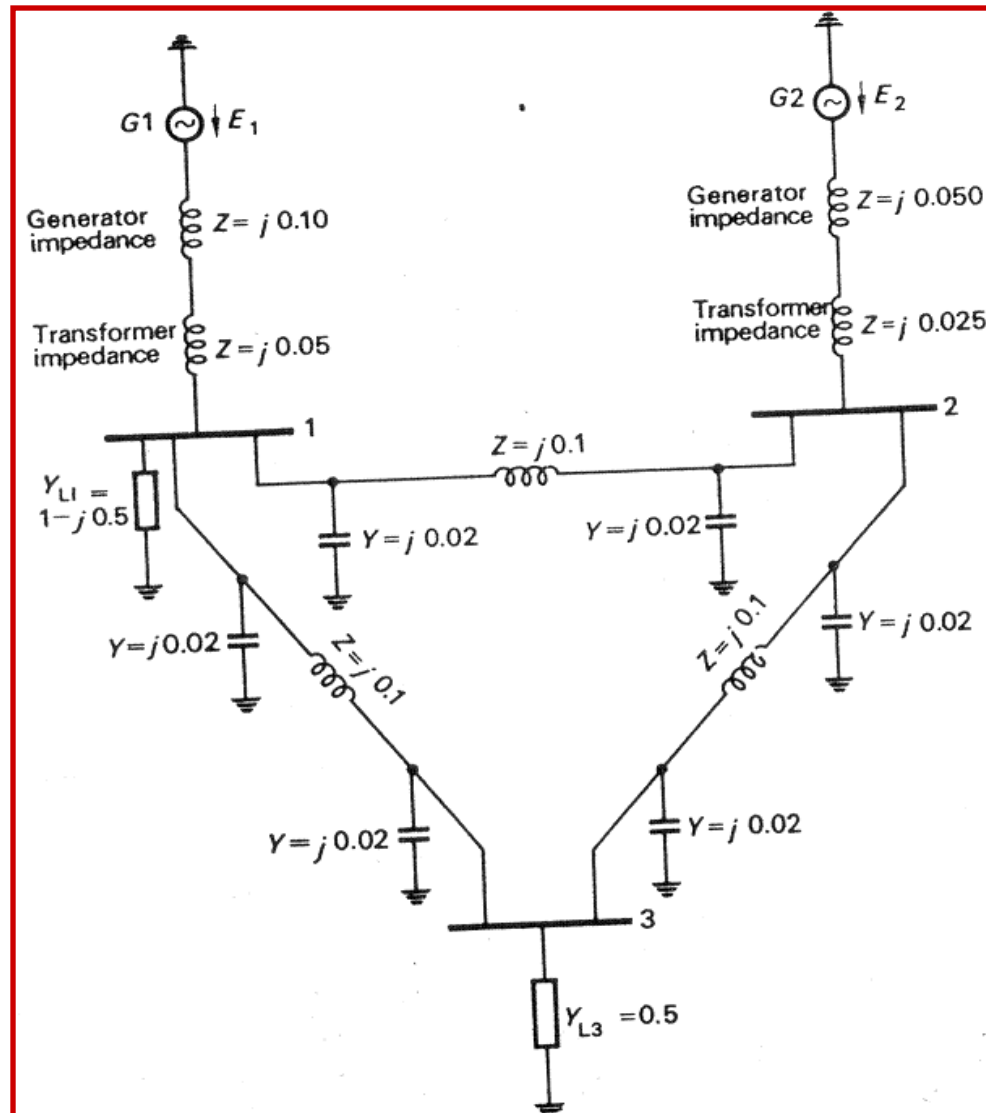
Si suponemos que las tensiones de prefalla en ambas barras son los nominales, entonces de $S=|V|^2 Y^*$ obtenemos:

$$1+ j \, 0,5 \text{ [pu]} = |1.0|^2 Y_{D1}^* \rightarrow Y_{D1} = 1 - j \, 0,5 \text{ [pu]}$$

$$0,5+ j \, 0 \text{ [pu]} = |1.0|^2 Y_{D3}^* \rightarrow Y_{D2} = 0,5 \text{ [pu]}$$

Con el objeto de preservar la linealidad de la red para poder aplicar el Teorema de Thevenin en el paso 3, suponemos que las admitancias equivalentes de carga son independientes de la tensión.

Ejemplo de Análisis de CC



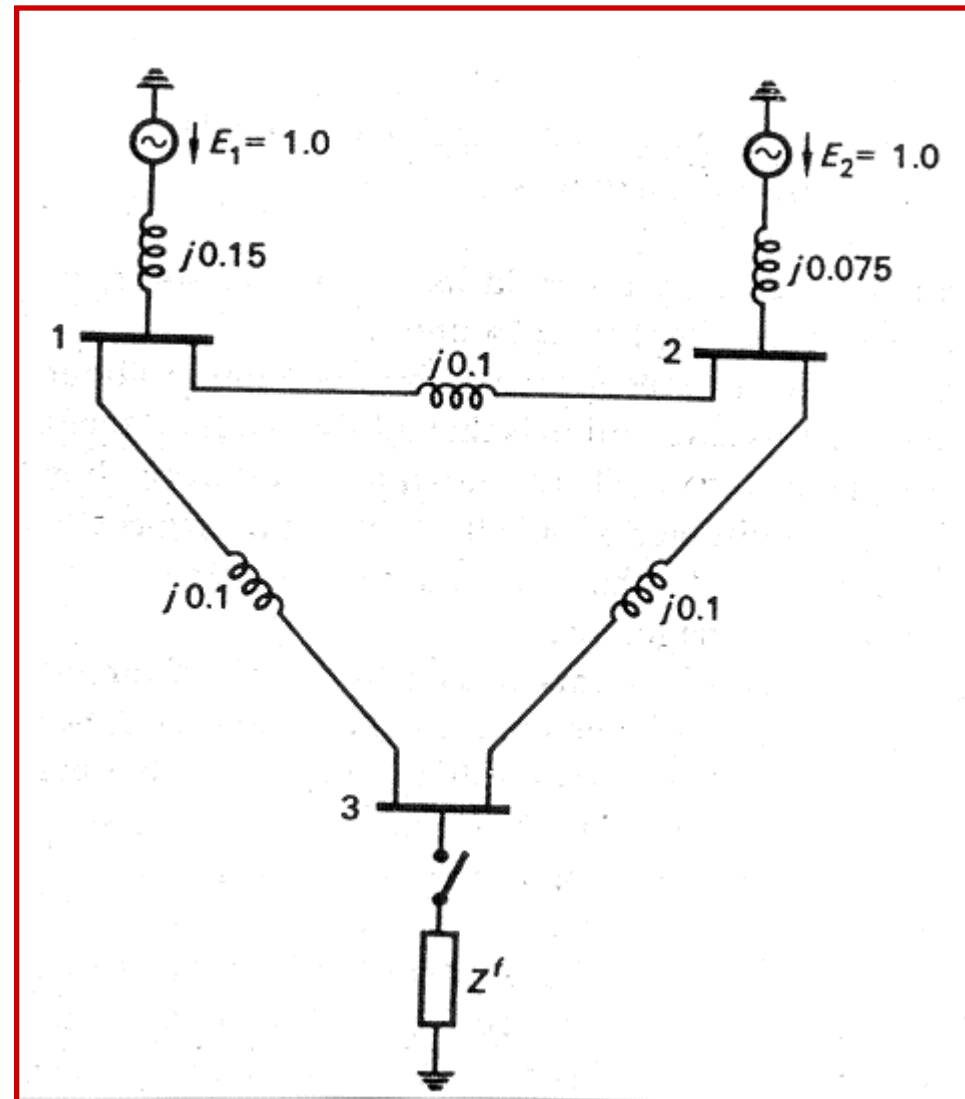
Ejemplo de Análisis de CC

Paso 2. Determinación del estado de prefalla de la red (Flujo de Potencia)

En nuestro ejemplo supondremos que:

- ✓ Todas las tensiones de prefalla tienen magnitud 1.0
- ✓ Todas las corrientes de prefalla son nulas.

Estas suposiciones implican que todas las admitancias en paralelo se desprecian, por lo tanto el diagrama de red equivalente se simplifica.

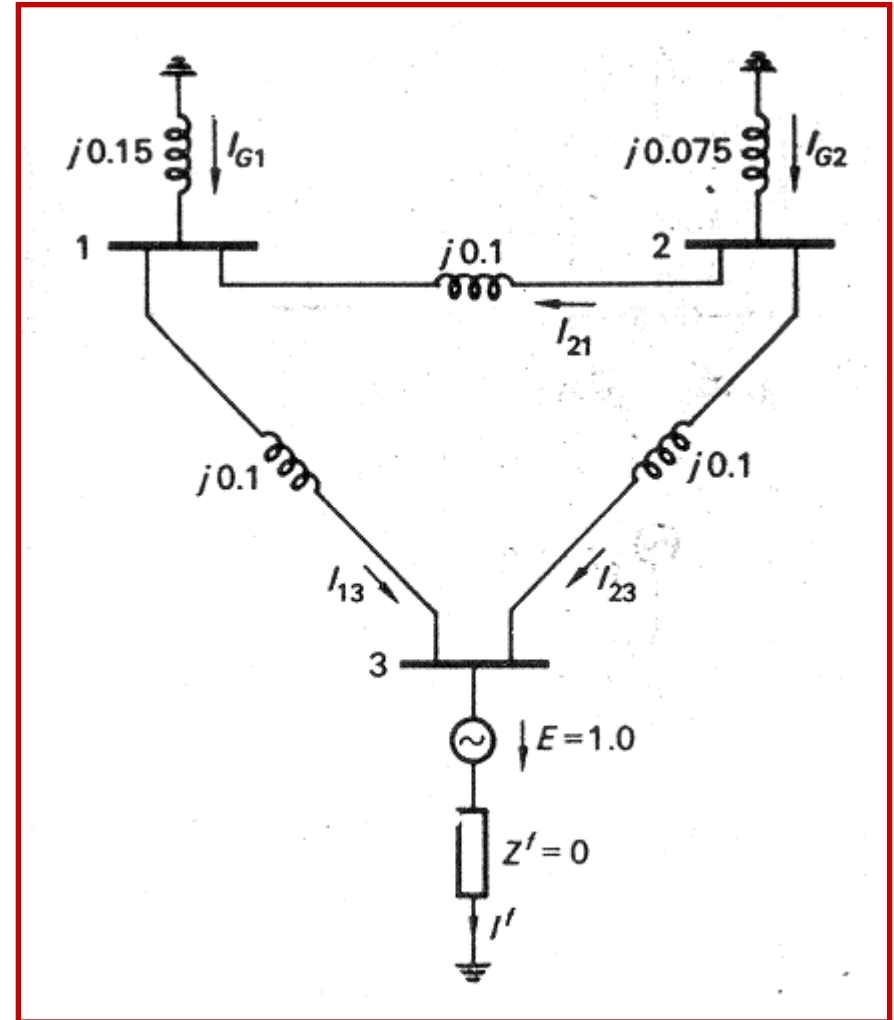


Ejemplo de Análisis de CC

Paso 3. Determinación de las variaciones de corrientes y tensiones en la red causadas por el CC

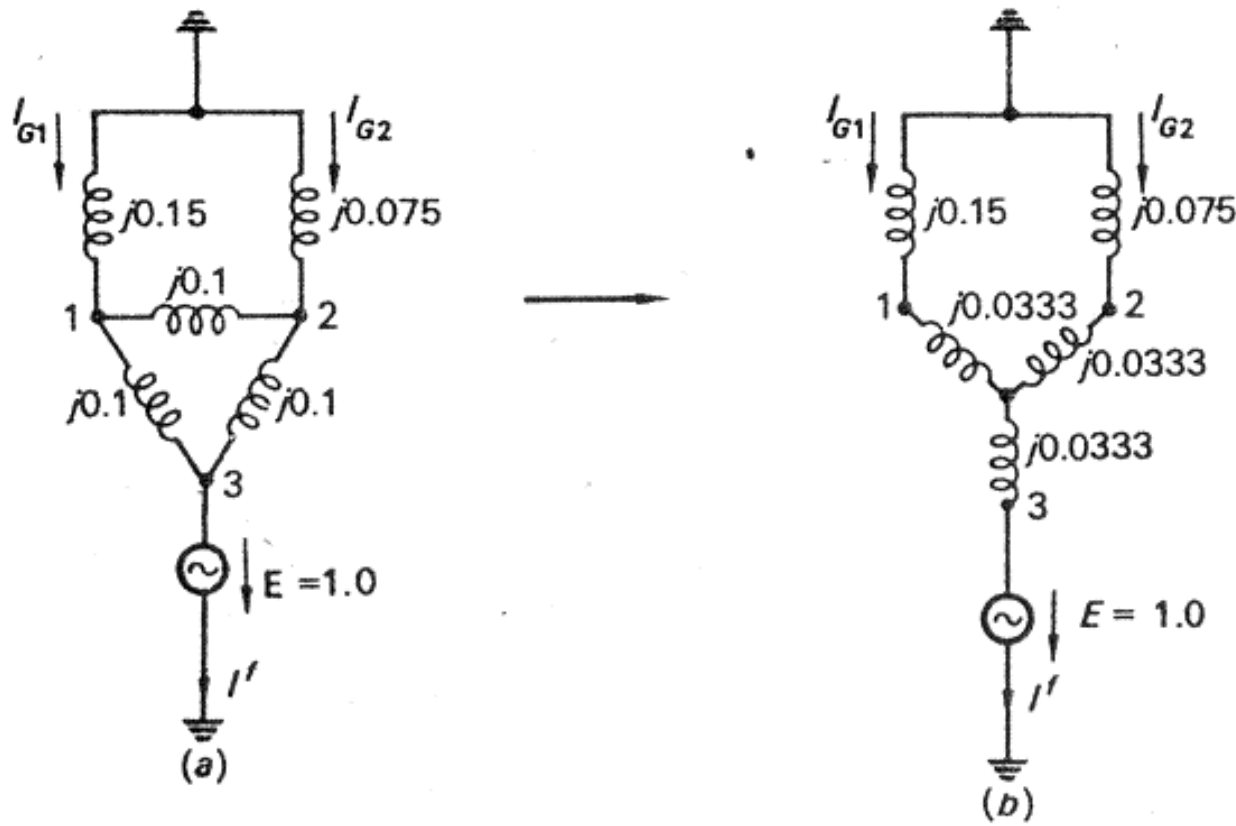
El efecto del CC es equivalente a conectar una impedancia de falla Z^f entre la barra y tierra. Si el CC es rígido, entonces $Z^f = 0$.

El Teorema de Thevenin afirma que los cambios en las corrientes y tensiones de red causados por el agregado de una impedancia de falla Z^f son equivalentes a aquellos causados al agregar un fem $E=V_0^3$ con todas las otras fuentes de tensión cortocircuitadas.

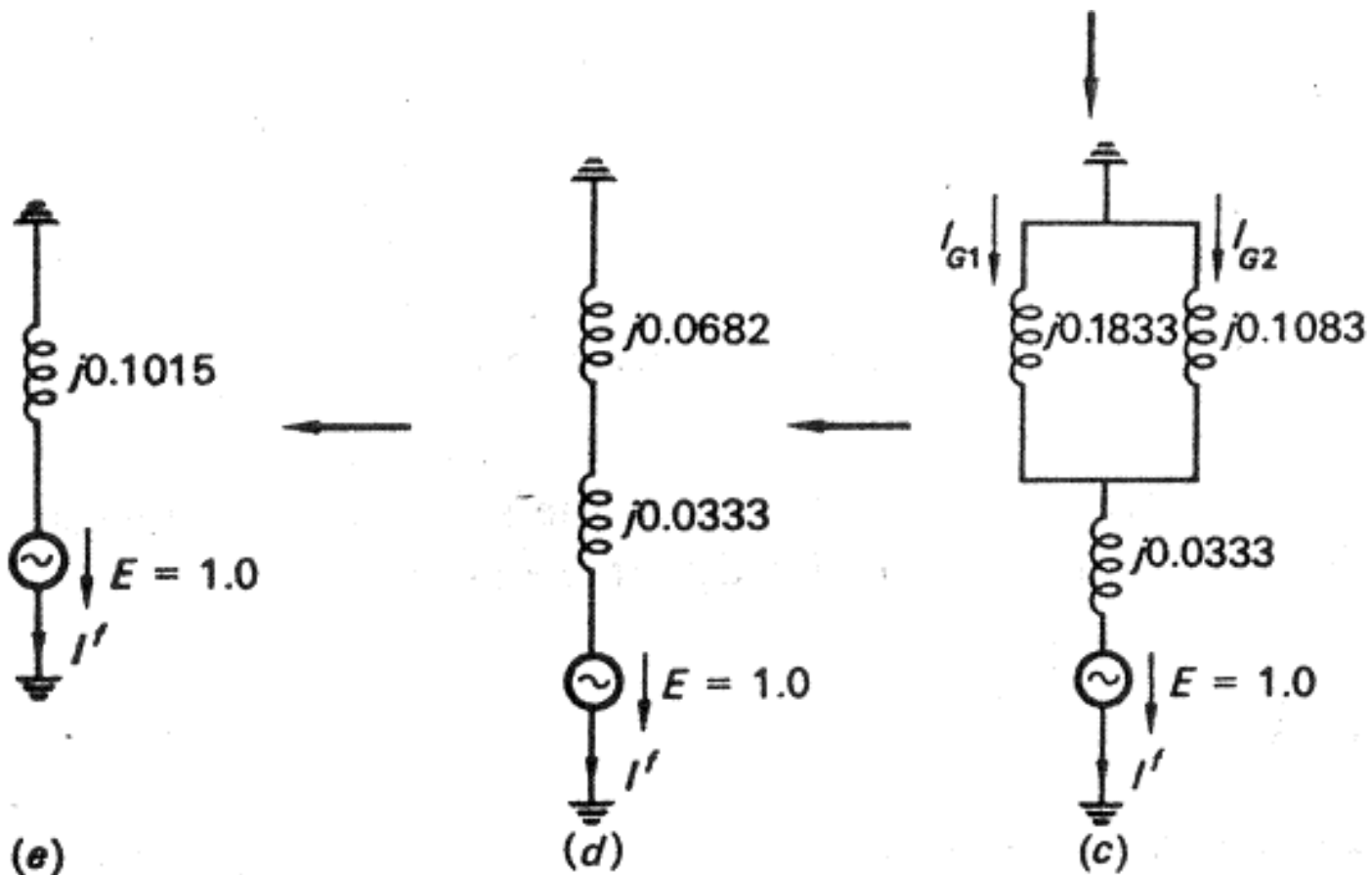


Ejemplo de Análisis de CC

Para calcular los *cambios* en las corrientes y tensiones de red en este ejemplo procedemos a reducirla:



Ejemplo de Análisis de CC



Ejemplo de Análisis de CC

De la red equivalente e) calculamos la corriente en la falla:

$$I_f = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{0,1015 \angle 90^\circ} = -j9,85 \text{ [pu]}$$

De la red equivalente c) calculamos la corriente de falla se divide entre los generadores:

$$I_{G1} = \frac{j 0,1083}{j 0,1083 + j 0,1883} I_f = -j3,67 \text{ [pu]}$$

$$I_{G2} = \frac{j 0,1883}{j 0,1083 + j 0,1883} I_f = -j6,18 \text{ [pu]}$$

Ejemplo de Análisis de CC

De la red equivalente a) calculamos los cambios en las tensiones de las barras 1 y 2:

$$V_1 = 0 - (j 0,15) \times (-j 3,67) = -0,550 \text{ [pu]}$$

$$V_2 = 0 - (j 0,075) \times (-j 6,18) = -0,463 \text{ [pu]}$$

El cambio en las tension de la barra 3 es: $V_3 = -1.0 \text{ [pu]}$

El vector de tension de barras de Thevenin es:

$$V_T = \begin{bmatrix} -0,550 \\ -0,463 \\ -1,0 \end{bmatrix}$$

Ejemplo de Análisis de CC

Conocidos los cambios en las tensiones de las barras, finalmente calculamos los cambios en las corrientes de las líneas:

$$I_{21} = \frac{V_2 - V_1}{j 0,1} = -j0,87 \text{ [pu]}$$

$$I_{13} = \frac{V_1 - V_3}{j 0,1} = -j4,50 \text{ [pu]}$$

$$I_{23} = \frac{V_2 - V_3}{j 0,1} = -j5,37 \text{ [pu]}$$

Paso 4. Determinación del estado de falla de la red

$$V_1^f = |V_1^0 + V_1| = |1,0 - 0,550| = 0,450 \text{ [pu]}$$

$$V_2^f = |V_2^0 + V_2| = |1,0 - 0,463| = 0,537 \text{ [pu]}$$

$$V_3^f = 0 \text{ [pu]}$$

Ejemplo de Análisis de CC

$$I^f = 9,85 \text{ [pu]}$$

$$I_1^f = |I_1^0 + I_1| \approx |0 - j 3,67| \approx 3,67 \text{ [pu]}$$

$$I_2^f = |I_2^0 + I_2| \approx |0 - j 6,18| \approx 6,18 \text{ [pu]}$$

$$I_{21}^f = |I_{21}^0 + I_{21}| = |? - j 0,87| = ? \text{ [pu]} \quad \leftarrow$$

Observemos que para calcular I_{21}^f necesitamos conocer I_{21}^0

$$I_{13}^f = |I_{13}^0 + I_{13}| \approx |0 - j 4,50| \approx 4,50 \text{ [pu]}$$

$$I_{23}^f = |I_{23}^0 + I_{23}| \approx |0 - j 5,37| \approx 5,37 \text{ [pu]}$$

Finalizamos el estudio de CC calculando la Potencia de CC en barra 3

$$|SCC^{3\Phi}|_3 = 9,85 \text{ [pu]} = 9,85 \times 50 \text{ MVA} = 490 \text{ MVA}$$



Ejemplo de Análisis de CC

En los sistemas eléctricos de potencia modernos, existen distintos tipos de fuentes activas que pueden contribuir a la corriente de cortocircuito en el momento en que ocurre una falla por cortocircuito en el sistema.

Estas incluyen generadores síncronos y asíncronos, motores síncronos y asíncronos, y los convertidores electrónicos de potencia conectados a generadores.

Otros componentes del sistema, tales como las líneas aéreas, cables, reactores serie, etc, situados entre la localización de la falla por cortocircuito y las distintas fuentes de corriente afectaran la magnitud de las corrientes de cortocircuito que alimentan la falla.

En general el efecto consiste en reducir la magnitud y aumentar la tasa de decaimiento de las corrientes de cortocircuito.

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

Por el Teorema de Thevenin:

$$\underbrace{\mathbf{V}_{\text{barras}}^f}_{n \times 1} = \underbrace{\mathbf{V}_{\text{barras}}^0}_{n \times 1} + \underbrace{\mathbf{V}_T}_{n \times 1}$$

Puesto que los cambios en las tensiones de las barras ocurren como resultado de la corriente de CC I^f en la barra fallada, o equivalentemente por la inyección de la corriente $-I^f$ en la barra fallada, resulta:

$$\underbrace{\mathbf{V}_T}_{n \times 1} = \underbrace{\mathbf{Z}_{\text{barras}}}_{n \times n} \underbrace{\mathbf{I}^f}_{n \times 1}$$

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

donde:

$$\mathbf{Z}_{\text{barras}} = \mathbf{Y}_{\text{barras}}^{-1}$$

Conceptualmente es la inversa de la matriz de admitancias de barras. En la practica no se invierte $\mathbf{Y}_{\text{barras}}$ sino que se construye $\mathbf{Z}_{\text{barras}}$

$$\mathbf{I}^f = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I^f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$



q-esima componente; correspondiente a la falla en barra q.

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

Entonces:

$$\mathbf{V}_{\text{barras}}^f = \mathbf{V}_{\text{barras}}^0 + \mathbf{Z}_{\text{barras}} \mathbf{I}^f$$

O, en términos de componentes:

$$V_1^f = V_1^0 - Z_{1q} I^f$$

$$\dots = \dots \dots$$

$$V_q^f = V_q^0 - Z_{qq} I^f$$

$$\dots = \dots \dots$$

$$V_n^f = V_n^0 - Z_{nq} I^f$$

Obsérvese que en esta etapa I^f es desconocida.

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

Ahora bien, la tensión de falla de la q-esima barra esta relacionada con la corriente de falla por la ley de Ohm:

$$V_q^f = Z^f I^f$$

donde Z^f es la impedancia de falla. Reemplazando obtenemos la corriente de falla:

$$Z^f I^f = V_q^0 - Z_{qq} I^f \quad \longrightarrow \quad I^f = \frac{V_q^0}{Z^f + Z_{qq}}$$

Reemplazando ahora I^f en el sistema de ecuaciones obtenemos:

$$\begin{aligned} V_i^f &= V_i^0 - \frac{Z_{iq}}{Z^f + Z_{qq}} V_q^0 \quad i \neq q \\ V_q^f &= \frac{Z^f}{Z^f + Z_{qq}} V_q^0 \end{aligned}$$

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

Si el CC es rígido:

$$I^f = \frac{V_q^0}{Z_{qq}}$$
$$V_q^f = 0$$
$$V_i^f = V_i^0 - \frac{Z_{iq}}{Z_{qq}} V_q^0 \quad i \neq q$$

Finalmente, consideremos la línea de transmisión que conecta la barra α con la barra β . Si la impedancia de esa línea es $Z_{\alpha\beta}$ entonces la corriente de falla $I_{\alpha\beta}^f$ en la línea es:

$$I_{\alpha\beta}^f = \frac{V_{\alpha}^f - V_{\beta}^f}{Z_{\alpha\beta}}$$

Impedancia de la línea,
no de la matriz Z !!

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

Ejemplo: Retomamos el ejemplo anterior y hallamos la matriz de admitancia de barras.

$$y_{11} = \frac{1}{j0,15} + \frac{1}{j0,10} + \frac{1}{j0,10} \cong -j 26,67$$

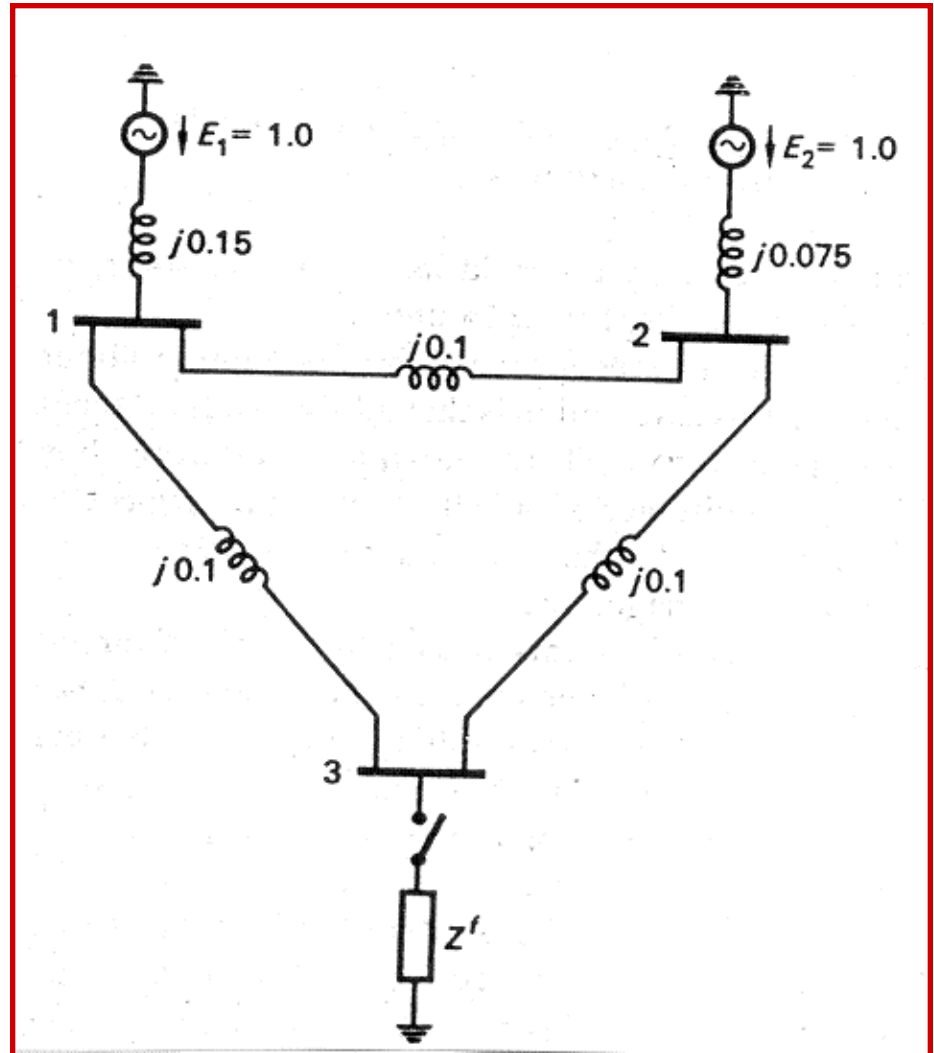
$$y_{22} = \frac{1}{j0,075} + \frac{1}{j0,10} + \frac{1}{j0,10} \cong -j 33,33$$

$$y_{33} = \frac{1}{j0,10} + \frac{1}{j0,10} \cong -j 20,00$$

$$y_{12} = y_{21} = -\frac{1}{j0,10} \cong j 10,00$$

$$y_{13} = y_{31} = -\frac{1}{j0,10} \cong j 10,00$$

$$y_{23} = y_{32} = -\frac{1}{j0,10} \cong j 10,00$$



Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

$$Y = \begin{bmatrix} -j26,67 & j10,0 & j10,0 \\ j10,0 & -j33,33 & j10,0 \\ j10,0 & j10,0 & -j20,0 \end{bmatrix} \Rightarrow Z = \begin{bmatrix} j0,0728 & j0,0386 & j0,0557 \\ j0,0386 & j0,0557 & j0,047 \\ j0,0557 & j0,047 & j0,1014 \end{bmatrix}$$

$$V_3^f = 0$$

$$V_1^f = V_1^0 - \frac{Z_{13}}{Z_{33}} V_3^0 = 1,0 - \frac{j0,0557}{j0,1014} \times 1,0 = 0,4507 \text{ [pu]}$$

$$V_2^f = V_2^0 - \frac{Z_{23}}{Z_{33}} V_3^0 = 1,0 - \frac{j0,047}{j0,1014} \times 1,0 = 0,5365 \text{ [pu]}$$

Métodos Computacionales para análisis de CC equilibrados

$$I_3^f = \frac{V_3^0}{Z_{33}} = \frac{1,0}{j0,1014} = -j9,8619$$

$$I_2^f = \frac{V_2^0}{Z_{22}} = \frac{1,0}{j0,0557} = -j17,9533$$

$$I_1^f = \frac{V_1^0}{Z_{11}} = \frac{1,0}{j0,0728} = -j13,7363$$

$$I_{12}^f = \frac{V_1^f - V_2^f}{Z_{12}} = \frac{0,4507 - 0,5365}{j0,1} = j0,8580$$

$$I_{13}^f = \frac{V_1^f - V_3^f}{Z_{13}} = \frac{0,4507 - 0}{j0,1} = -j4,507$$

$$I_{23}^f = \frac{V_2^f - V_3^f}{Z_{23}} = \frac{0,5365 - 0}{j0,1} = -j5,365$$



Redes de Secuencia

- ✓ Efecto de la TCS sobre los elementos pasivos de la red

$$\mathbf{V}_{abc} = \underbrace{\mathbf{Z}}_{3 \times 3} \mathbf{I}_{abc} \quad \mathbf{I}_{abc} = \underbrace{\mathbf{Y}}_{3 \times 3} \mathbf{V}_{abc}$$

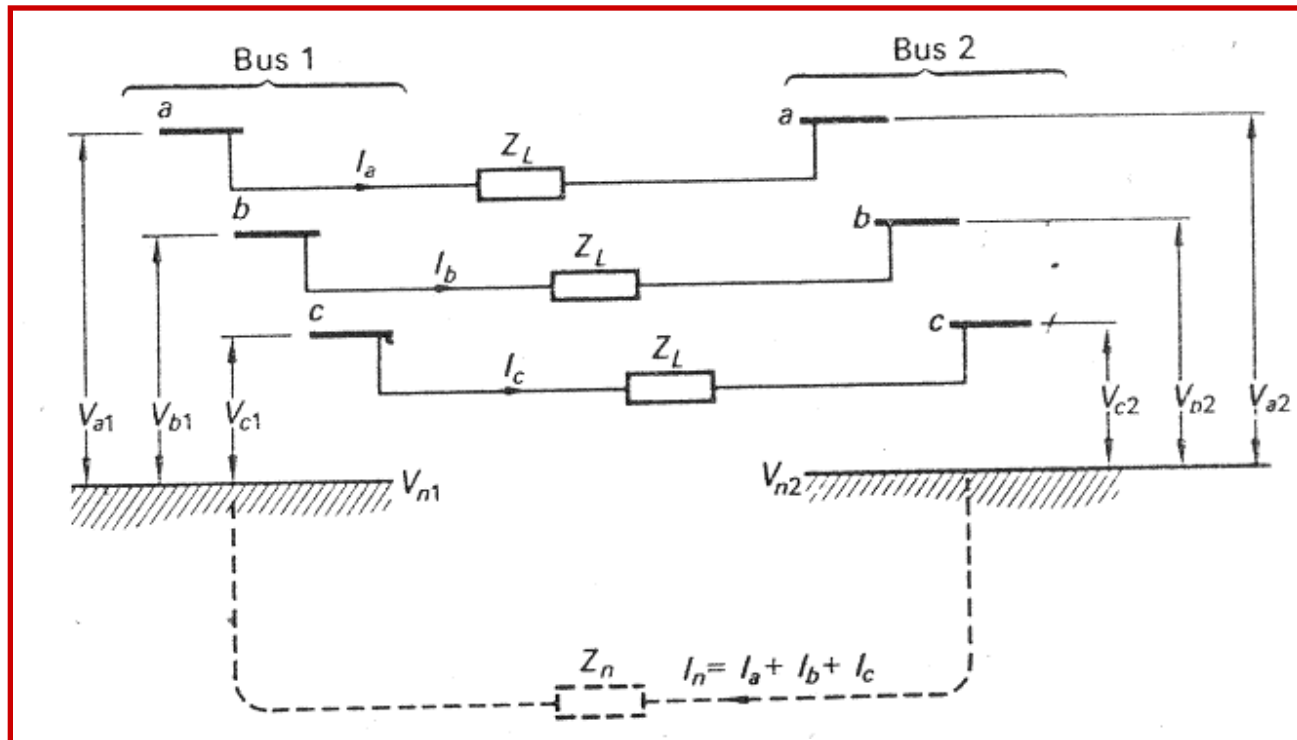


$$\mathbf{V}_{+-0} = \underbrace{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}}_{\mathbf{Z}_{+-0}} \mathbf{I}_{+-0} \quad \mathbf{I}_{+-0} = \underbrace{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}}_{\mathbf{Y}_{+-0}} \mathbf{V}_{+-0}$$

El mayor valor inherente de la TCS como herramienta de análisis está asociado al hecho de que estas matrices tienden a ser diagonales para la mayoría de los elementos ampliamente usados en SEP. En consecuencia, no existe acoplamiento entre las redes de secuencia y por lo tanto pueden tratarse separadamente.

Redes de Secuencia

Consideremos el caso de un elemento pasivo de la red en operación desequilibrada



Línea de transmisión con carga desequilibrada

Redes de Secuencia

$$V_{a1} - V_{a2} = I_a Z_L + (I_a + I_b + I_c) Z_n$$

$$V_{b1} - V_{b2} = I_b Z_L + (I_a + I_b + I_c) Z_n$$

$$V_{c1} - V_{c2} = I_c Z_L + (I_a + I_b + I_c) Z_n$$



$$\underbrace{\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{V}_{abc}} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_L + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_L + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_L + Z_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{Z}} \underbrace{\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}_{abc}}$$

Redes de Secuencia

$$\Delta \mathbf{V}_{abc} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_{abc} \longleftrightarrow \Delta \mathbf{V}_{+-0} = \underbrace{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}}_{\mathbf{Z}_{+-0}} \mathbf{I}_{+-0}$$



$$\mathbf{Z}_{+-0} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} Z_L + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_L + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_L + Z_n \end{bmatrix} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} Z_L & 0 & 0 \\ 0 & Z_L & 0 \\ 0 & 0 & Z_L + 3 Z_n \end{bmatrix}$$

Redes de Secuencia

Si definimos:

$$z_{+} = Z_L \quad \text{Impedancia de secuencia positiva}$$

$$z_{-} = Z_L \quad \text{Impedancia de secuencia negativa}$$

$$z_0 = Z_L + 3 Z_n \quad \text{Impedancia de secuencia cero}$$



$$V_{+1} - V_{+2} = z_{+} I_{+}$$

$$V_{-1} - V_{-2} = z_{-} I_{-}$$

$$V_{01} - V_{02} = z_0 I_0$$

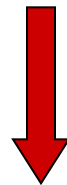
Por ser Z_{+-0} diagonal,
los componentes de
secuencia están
desacoplados!!

Redes de Secuencia

- ✓ Efecto de la TCS sobre una maquina síncrona con carga desequilibrada

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{E}_{abc} - \mathbf{Z} \mathbf{I}_{abc} \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} \mathbf{V}_{+-0} = \mathbf{E}_{abc} - \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{+-0}$$



$$\mathbf{V}_{+-0} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{E}_{abc} - \underbrace{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}}_{\mathbf{Z}_{+-0}} \mathbf{I}_{+-0}$$

Redes de Secuencia

$$\mathbf{T}^{-1}\mathbf{E}_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ \alpha^2 E_a \\ \alpha E_a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} E_a (1 + \alpha^3 + \alpha^3) \\ E_a (1 + \alpha^4 + \alpha^2) \\ E_a (1 + \alpha^2 + \alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{+0} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} (Z_1 + \alpha^2 Z_2 + \alpha Z_3) & 0 & 0 \\ 0 & (Z_1 + \alpha Z_2 + \alpha^2 Z_3) & 0 \\ 0 & 0 & (Z_1 + Z_2 + Z_3) \end{bmatrix}$$

Redes de Secuencia

Si definimos:

$$Z_+ = Z_1 + \alpha^2 Z_2 + \alpha Z_3 \quad \text{Impedancia de secuencia positiva}$$

$$Z_- = Z_1 + \alpha Z_2 + \alpha^2 Z_3 \quad \text{Impedancia de secuencia negativa}$$

$$Z_0 = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad \text{Impedancia de secuencia cero}$$



$$V_+ = E_a - Z_+ I_+$$

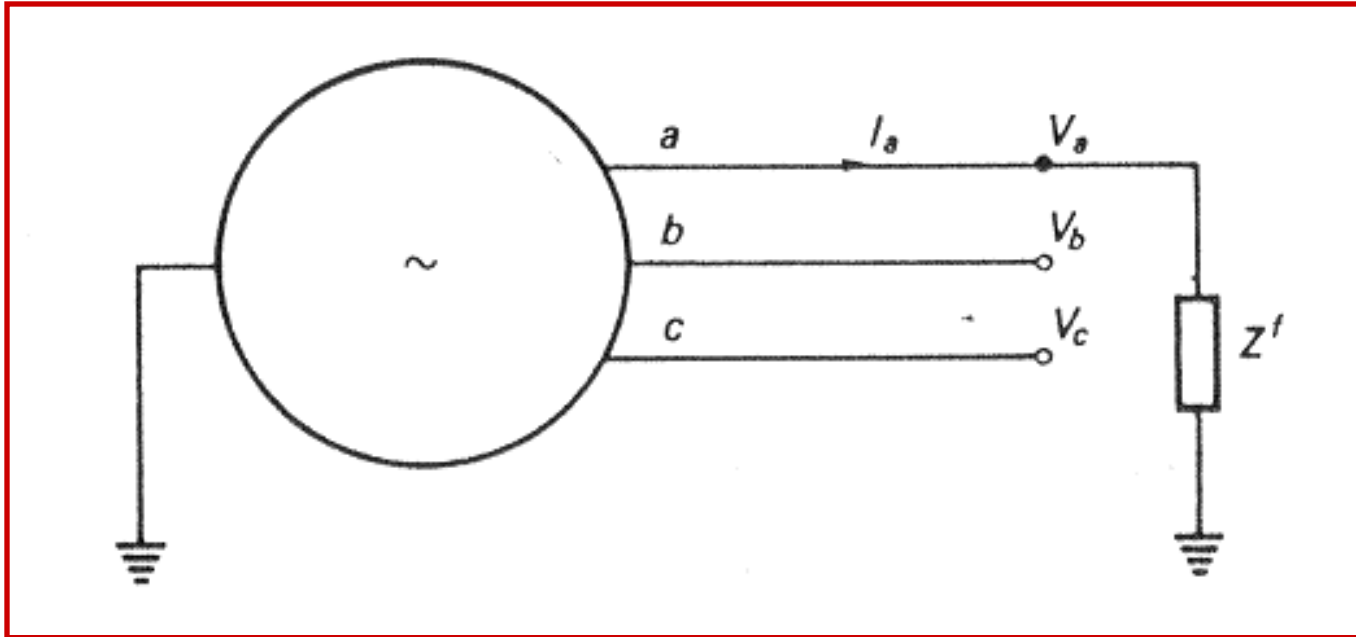
$$V_- = 0 - Z_- I_-$$

$$V_0 = 0 - Z_0 I_0$$

Por ser Z_s diagonal,
los componentes de
secuencia están
desacoplados!!

Redes de Secuencia

Ejemplo:



Generador síncrono sujeto a un CC - LT

Redes de Secuencia

$$\mathbf{I}_{abc} = \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_a}{3} \\ \frac{I_a}{3} \\ \frac{I_a}{3} \end{bmatrix} \Rightarrow I_+ = I_- = I_0 = \frac{I_a}{3}$$

$$V_+ = E_a - z_+ \frac{I_a}{3}$$

$$V_- = 0 - z_- \frac{I_a}{3}$$

$$V_0 = 0 - z_0 \frac{I_a}{3}$$

Redes de Secuencia

$$V_a = I_a Z^f = V_+ + V_- + V_0 = E_a - \frac{I_a}{3} (z_+ + z_- + z_0)$$



$$I_a = \frac{E_a}{Z^f + \frac{1}{3} (z_+ + z_- + z_0)}$$

$$V_a = E_a \frac{Z^f}{Z^f + \frac{1}{3} (z_+ + z_- + z_0)}$$

Redes de Secuencia

$$V_b = \alpha^2 V_+ + \alpha V_- + V_0 = \alpha^2 \left(E_a - z_+ \frac{I_a}{3} \right) - \alpha z_- \frac{I_a}{3} - z_0 \frac{I_a}{3}$$

$$V_b = E_a \frac{3\alpha^2 Z^f + z_- (\alpha^2 - \alpha) + z_0 (\alpha^2 - 1)}{3Z^f + (z_0 + z_- + z_+)}$$

$$V_c = \alpha V_+ + \alpha^2 V_- + V_0 = \alpha \left(E_a - z_+ \frac{I_a}{3} \right) - \alpha^2 z_- \frac{I_a}{3} - z_0 \frac{I_a}{3}$$

$$V_c = E_a \frac{3\alpha Z^f + z_- (\alpha - \alpha^2) + z_0 (\alpha - 1)}{3Z^f + (z_0 + z_- + z_+)}$$

Redes de Secuencia

✓ Impedancias de secuencia de maquinas síncronas

o Secuencia positiva

$$Z_{+} = j X_d \quad \text{para régimen permanente}$$

$$Z_{+} = j X_d'' \quad \text{para CC, 1 ciclo}$$

$$Z_{+} = j X_d' \quad \text{para CC, 3-4 ciclos}$$

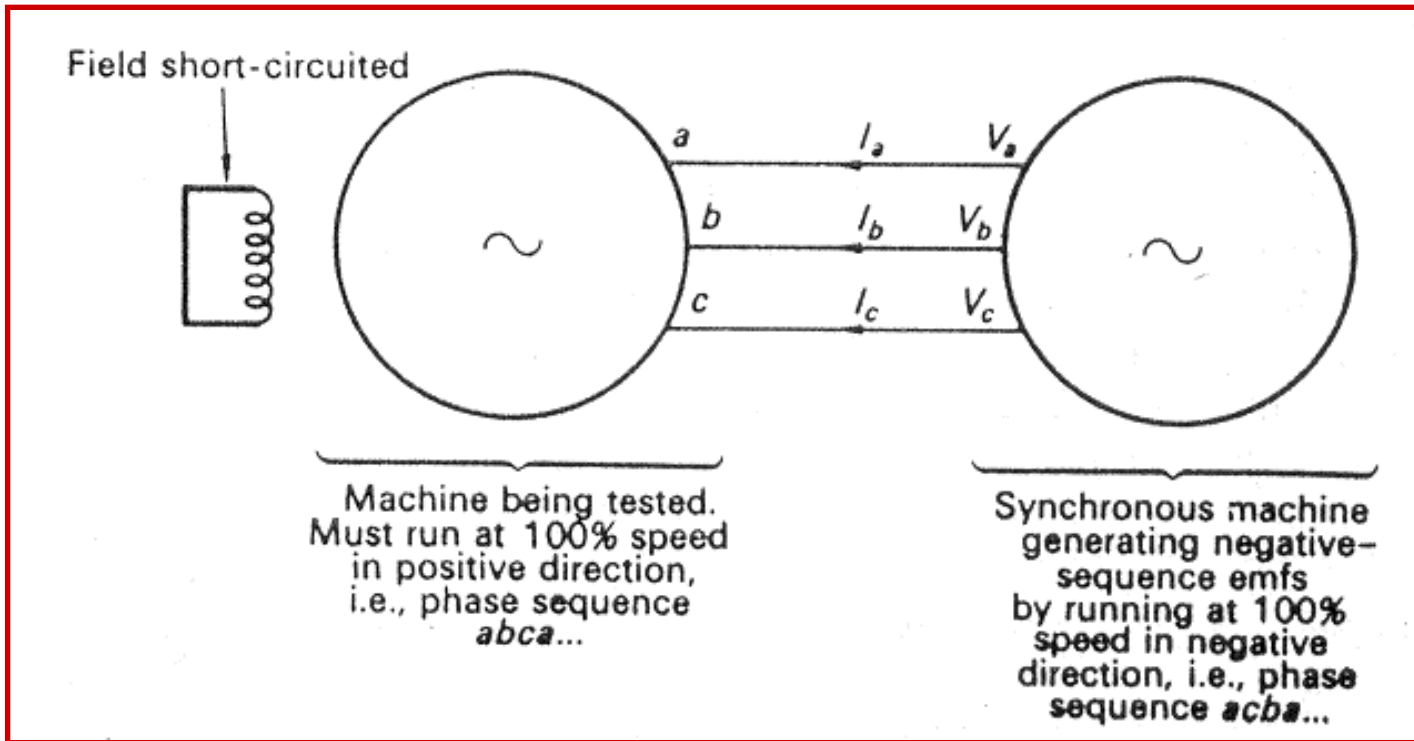
o Secuencia negativa

$$Z_{-} = j X_{-}$$

o Secuencia cero

$$Z_0 = j X_0$$

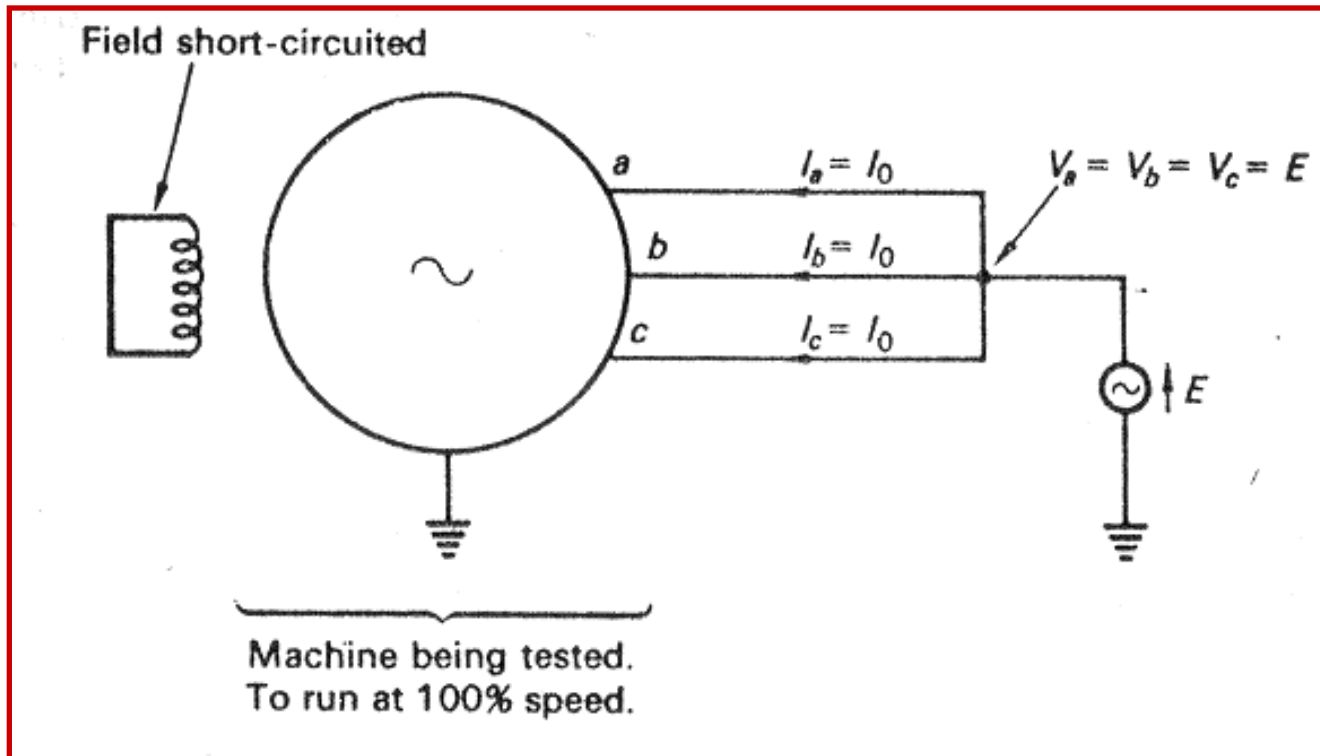
Redes de Secuencia



$$Z_- = \frac{V_a}{I_a}$$

Medición de impedancias de secuencia negativa

Redes de Secuencia



$$Z_0 = \frac{E}{I_0}$$

Medición de impedancias de secuencia nula

Redes de Secuencia

✓ Impedancias de secuencia de líneas de transmisión

Las impedancias de secuencia positiva y negativa de componentes de redes lineales, simétricos y estáticos son idénticas, porque la impedancia de tales circuitos es independiente del orden de fase, siempre que las tensiones aplicadas estén equilibradas. La impedancia de secuencia cero de una línea de transmisión es distinta (normalmente mayor) que la impedancia a las corrientes de secuencia positiva y negativa.

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



✓ Construcción de redes de secuencia del SEP

$$\underbrace{\mathbf{V}_{+barras}}_{n \times 1} = \underbrace{\mathbf{Z}_{+barras}}_{n \times n} \underbrace{\mathbf{J}_{+barras}}_{n \times 1}$$

Secuencia positiva

$$\mathbf{V}_{-barras} = \mathbf{Z}_{-barras} \mathbf{J}_{-barras}$$

Secuencia negativa

$$\mathbf{V}_{0barras} = \mathbf{Z}_{0barras} \mathbf{J}_{0barras}$$

Secuencia cero

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

$$\begin{bmatrix} V_{+1} \\ V_{-1} \\ V_{01} \\ \vdots \\ V_{+i} \\ V_{-i} \\ V_{0i} \\ \vdots \\ V_{+n} \\ V_{-n} \\ V_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{+11} & 0 & 0 & \dots & Z_{+1i} & 0 & 0 & \dots & Z_{+1n} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{-11} & 0 & \dots & 0 & Z_{-1i} & 0 & \dots & 0 & Z_{-1n} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{011} & \dots & 0 & 0 & Z_{01i} & \dots & 0 & 0 & Z_{01n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{+i1} & 0 & 0 & \dots & Z_{+ii} & 0 & 0 & \dots & Z_{+in} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{-i1} & 0 & \dots & 0 & Z_{-ii} & 0 & \dots & 0 & Z_{-in} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{0i1} & \dots & 0 & 0 & Z_{0ii} & \dots & 0 & 0 & Z_{0in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{+n1} & 0 & 0 & \dots & Z_{+ni} & 0 & 0 & \dots & Z_{+nn} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{-n1} & 0 & \dots & 0 & Z_{-ni} & 0 & \dots & 0 & Z_{-nn} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{0n1} & \dots & 0 & 0 & Z_{0ni} & \dots & 0 & 0 & Z_{0nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{+1} \\ J_{-1} \\ J_{01} \\ \vdots \\ J_{+i} \\ J_{-i} \\ J_{0i} \\ \vdots \\ J_{+n} \\ J_{-n} \\ J_{0n} \end{bmatrix}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{+-01} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{+-0i} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{+-0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{+-011} & \cdots & \mathbf{Z}_{+-01i} & \cdots & \mathbf{Z}_{+-01n} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{+-0i1} & \cdots & \mathbf{Z}_{+-0ii} & \cdots & \mathbf{Z}_{+-0in} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{+-0n1} & \cdots & \mathbf{Z}_{+-0ni} & \cdots & \mathbf{Z}_{+-0nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{+-01} \\ \vdots \\ \mathbf{J}_{+-0i} \\ \vdots \\ \mathbf{J}_{+-0n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_{+-0i} = \begin{bmatrix} V_{+i} \\ V_{-i} \\ V_{0i} \end{bmatrix} \quad \mathbf{J}_{+-0i} = \begin{bmatrix} J_{+i} \\ J_{-i} \\ J_{0i} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z}_{+-0ij} = \begin{bmatrix} Z_{+ij} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{-ij} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{0ij} \end{bmatrix}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

Matriz de impedancia de barras de componentes de secuencia

Vector de inyecciones de corrientes de secuencia en barras

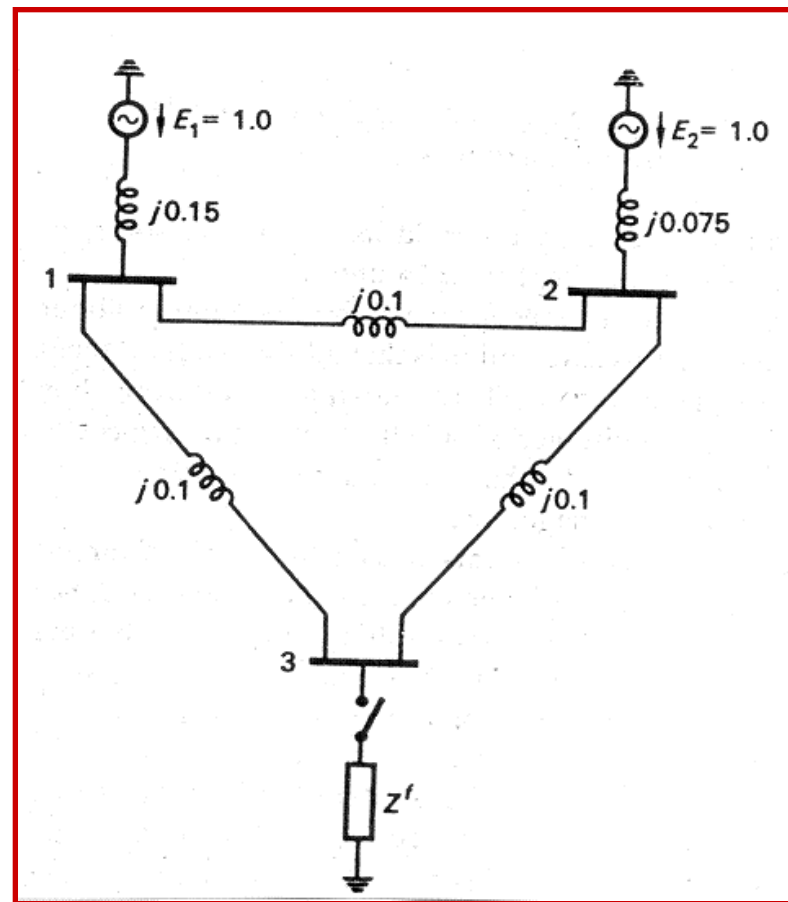
$$\underbrace{\mathbf{V}_{+-0 \text{ barras}}}_{3n \times 1} = \underbrace{\mathbf{Z}_{+-0 \text{ barras}}}_{3n \times 3n} \underbrace{\mathbf{J}_{+-0 \text{ barras}}}_{3n \times 1}$$

Vector de tensiones de secuencia de barras

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

Ejemplo: retomamos el ejemplo del SEP de tres barras.

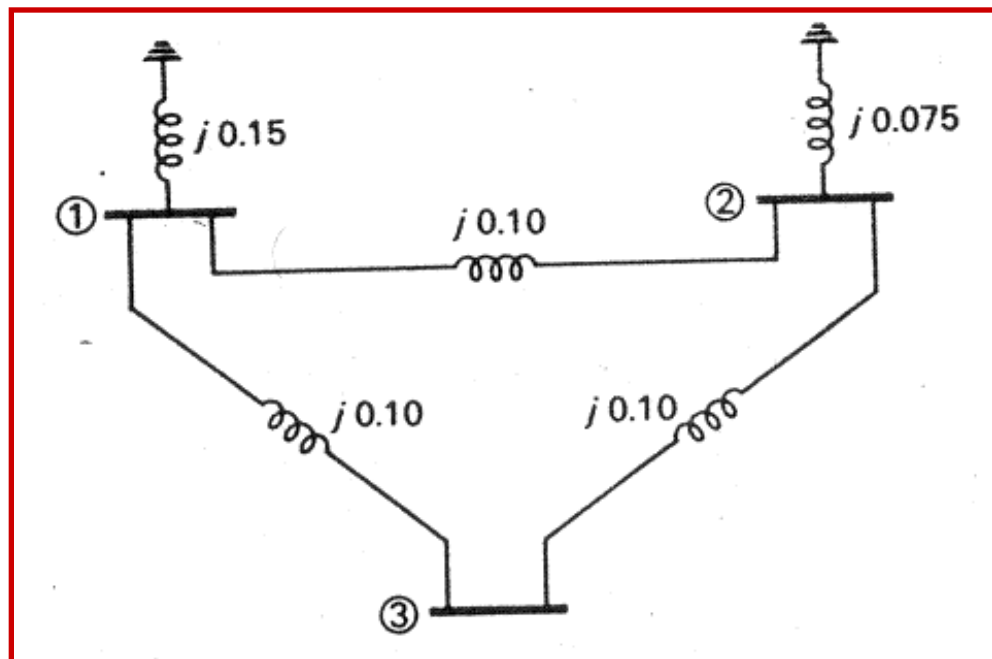
$$Z_{+barras} = \begin{bmatrix} j0,0728 & j0,0386 & j0,0557 \\ j0,0386 & j0,0557 & j0,0470 \\ j0,0557 & j0,0470 & j0,1014 \end{bmatrix}$$



Red de secuencia positiva

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

$$Z_{\text{-barras}} = \begin{bmatrix} j0,0728 & j0,0386 & j0,0557 \\ j0,0386 & j0,0557 & j0,0470 \\ j0,0557 & j0,0470 & j0,1014 \end{bmatrix}$$



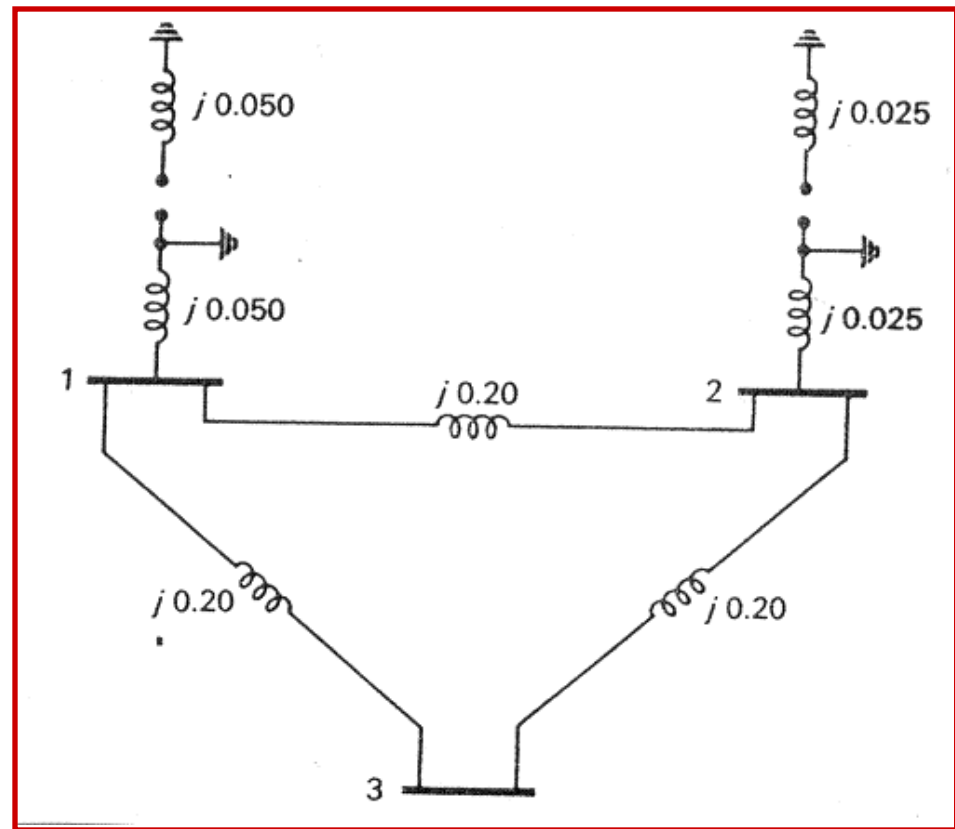
Red de secuencia negativa

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

$$Y_{0\text{barras}} = \begin{bmatrix} -j30 & j5 & j5 \\ j5 & -j50 & j5 \\ j5 & j5 & -j10 \end{bmatrix}$$

⇓

$$Z_{0\text{barras}} = \begin{bmatrix} j0,0380 & j0,0060 & j0,0220 \\ 0,0060 & j0,0220 & j0,0140 \\ j0,0220 & j0,0140 & j0,1180 \end{bmatrix}$$



Red de secuencia cero

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

$$Z_{+-0\text{barras}} = j \begin{bmatrix} 0,0728 & 0 & 0 & 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0728 & 0 & 0 & 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0380 & 0 & 0 & 0,0060 & 0 & 0 & 0,0220 \\ \hline 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0060 & 0 & 0 & 0,0220 & 0 & 0 & 0,0140 \\ \hline 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 & 0 & 0,1014 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 & 0 & 0,1014 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0220 & 0 & 0 & 0,0140 & 0 & 0 & 0,1180 \end{bmatrix}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

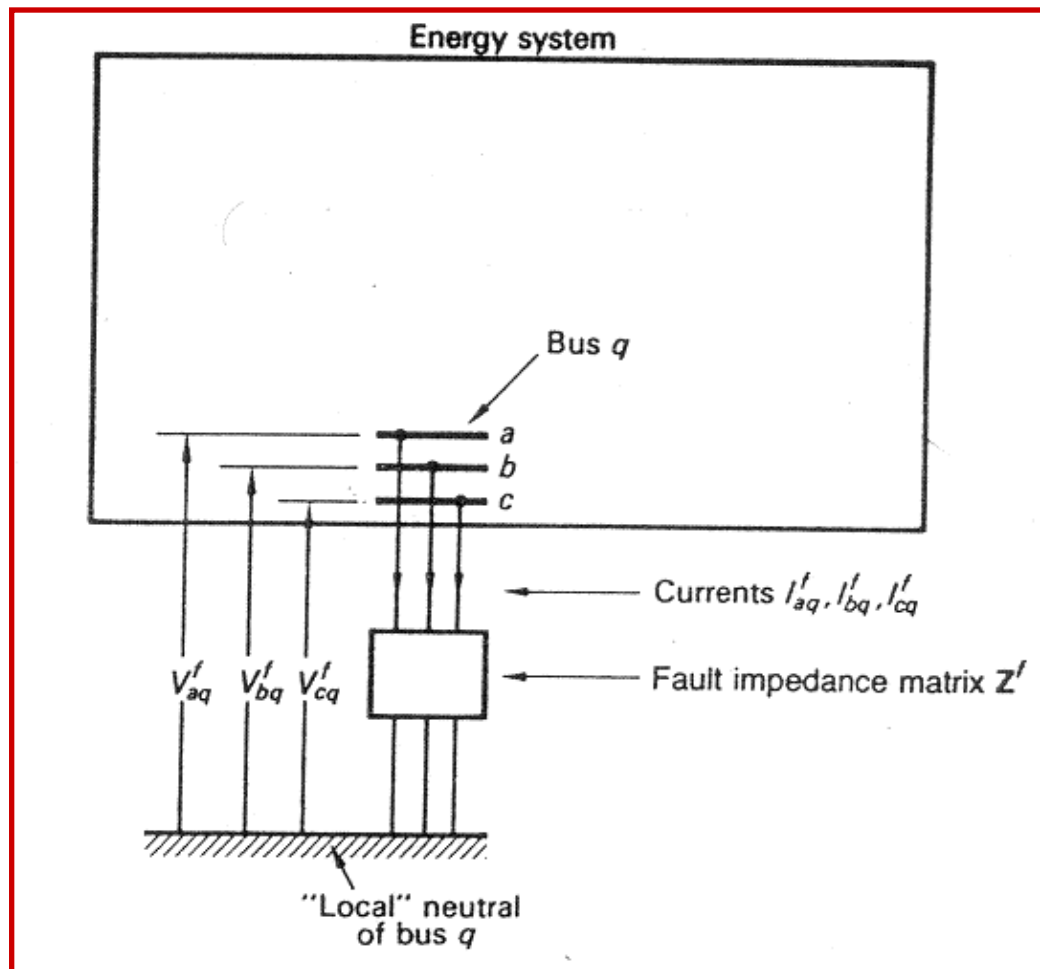
- ✓ Formulación general para tensiones y corrientes de CC

Corriente de falla en la barra q

$$\mathbf{I}_{abcq}^f = \begin{bmatrix} I_{aq}^f \\ I_{bq}^f \\ I_{cq}^f \end{bmatrix}$$

Tensión de falla en la barra q

$$\mathbf{V}_{abcq}^f = \begin{bmatrix} V_{aq}^f \\ V_{bq}^f \\ V_{cq}^f \end{bmatrix}$$



Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

$$\underbrace{\mathbf{V}_{abcq}^f}_{3 \times 1} = \underbrace{\mathbf{Z}^f}_{3 \times 3} \underbrace{\mathbf{I}_{abcq}^f}_{3 \times 1}$$

Matriz impedancia de falla

dependen del tipo de CC

$$\mathbf{I}_{abcq}^f = \mathbf{Y}^f \mathbf{V}_{abcq}^f$$

Matriz admitancia de falla

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \underbrace{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}^f \mathbf{T}}_{\mathbf{Z}_{+-0}^f} \mathbf{I}_{+-0q}^f$$

Matriz impedancia de secuencias de falla

$$\mathbf{I}_{+-0q}^f = \underbrace{\mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y}^f \mathbf{T}}_{\mathbf{Y}_{+-0}^f} \mathbf{V}_{+-0q}^f$$

Matriz admitancia de secuencias de falla

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

Por el Teorema de Thevenin:

$$\underbrace{\mathbf{V}_{+-0\text{barras}}^f}_{3n \times 1} = \underbrace{\mathbf{V}_{+-0\text{barras}}^0}_{3n \times 1} + \underbrace{\mathbf{Z}_{+-0\text{barras}}}_{3n \times 3n} \underbrace{\mathbf{I}_{+-0\text{barras}}^f}_{3n \times 1}$$

donde:

$$\mathbf{I}_{+-0\text{barras}}^f = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\mathbf{I}_{+-0q}^f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \leftarrow \text{q-esimo elemento}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

Reescribiendo la ecuación matricial anterior en forma vectorial:

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \mathbf{V}_{+-01}^f = \mathbf{V}_{+-01}^0 - \mathbf{Z}_{+-01q} \mathbf{I}_{+-0q}^f \\
 \dots\dots\dots \\
 \mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{V}_{+-0q}^0 - \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{I}_{+-0q}^f \\
 \dots\dots\dots \\
 \mathbf{V}_{+-0n}^f = \mathbf{V}_{+-0n}^0 - \mathbf{Z}_{+-0nq} \mathbf{I}_{+-0q}^f
 \end{array} \right\} 3 \times n
 \end{array}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



La corriente de falla se obtiene de:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{V}_{+-0q}^0 - \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{I}_{+-0q}^f \quad \text{y} \quad \mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{Z}_{+-0}^f \mathbf{I}_{+-0q}^f$$

despejando obtenemos:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^0 = \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\} \mathbf{I}_{+-0q}^f$$

cuya solución es:

$$\mathbf{I}_{+-0q}^f = \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



Sustituyendo la corriente de falla obtenemos:

$$\mathbf{V}_{+-0i}^f = \mathbf{V}_{+-0i}^0 - \mathbf{Z}_{+-0iq} \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0 \quad i \neq q$$

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{Z}_{+-0}^f \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



Conocidas las tensiones de falla y la corriente de falla, calculamos las corrientes en las líneas. Si la línea conecta las barras p - μ y esta caracterizada por:

$$\mathbf{Y}_{+-0\rho\mu} = \begin{bmatrix} y_+ & 0 & 0 \\ 0 & y_- & 0 \\ 0 & 0 & y_0 \end{bmatrix}$$

La corriente de falla en la línea esta dada por:

$$\mathbf{I}_{+-0\rho\mu}^f = \mathbf{Y}_{+-0\rho\mu} \left\{ \mathbf{V}_{+-0\rho}^f - \mathbf{V}_{+-0\mu}^f \right\}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



OBSERVACIONES:

- Las fórmulas son completamente generales y pueden usarse para un sistema de n barras. La falla ocurre en cualquier barra q .
- Una vez que la matriz de impedancia de barras de secuencias de falla Z_{+0} ha sido conformada y almacenada en memoria, podemos extender nuestro análisis fácilmente a cualquier tipo de falla.
- Todas las fórmulas involucran vectores de dimensión 3 y matrices de dimensión 3×3 con valores complejos. Las matrices Z_{+0ij} son diagonales, pero las matrices de impedancia de secuencias de falla Z_{+0}^f no lo son.

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



- Todas las fórmulas calculan las corrientes y tensiones de falla expresados en componentes de secuencia. Para convertirlos a valores por fase se debe aplicar la TCS inversa.
- Las tensiones de prefalla son equilibradas, por lo tanto las componentes de secuencia negativa y de secuencia nula se anulan. O sea, para toda barra q:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^0 = \begin{bmatrix} V_{+q}^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_q^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados



Las ecuaciones anteriores fueron deducidas basadas en la existencia de la matriz impedancia de secuencia de falla:

$$\mathbf{Z}_{+-0}^f$$

Dependiendo del tipo de falla, esta puede no existir, en cuyo caso existe la matriz admitancia de secuencia de falla:

$$\mathbf{Y}_{+-0}^f$$

En tal caso se deduce un nuevo conjunto de ecuaciones basadas en la matriz admitancia de secuencia de falla. De las ecuaciones:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{V}_{+-0q}^0 - \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{I}_{+-0q}^f \quad \text{y} \quad \mathbf{I}_{+-0q}^f = \mathbf{Y}_{+-0}^f \mathbf{V}_{+-0q}^f$$

obtenemos:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{V}_{+-0q}^0 - \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{Y}_{+-0}^f \mathbf{V}_{+-0q}^f$$

Métodos Computacionales de análisis de CC desequilibrados

Y de aquí:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \left\{ \mathbf{Id} + \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{Y}_{+-0}^f \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0$$

donde Id es la matriz identidad. De la ecuación:

$$\mathbf{I}_{+-0q}^f = \mathbf{Y}_{+-0}^f \mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{Y}_{+-0}^f \left\{ \mathbf{Id} + \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{Y}_{+-0}^f \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0$$

obtenemos reemplazando en: $\mathbf{V}_{+-0i}^f = \mathbf{V}_{+-0i}^0 - \mathbf{Z}_{+-0iq} \mathbf{I}_{+-0q}^f$

$$\mathbf{V}_{+-0i}^f = \mathbf{V}_{+-0i}^0 - \mathbf{Z}_{+-0iq} \mathbf{Y}_{+-0}^f \left\{ \mathbf{Id} + \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{Y}_{+-0}^f \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0 \quad i \neq q$$

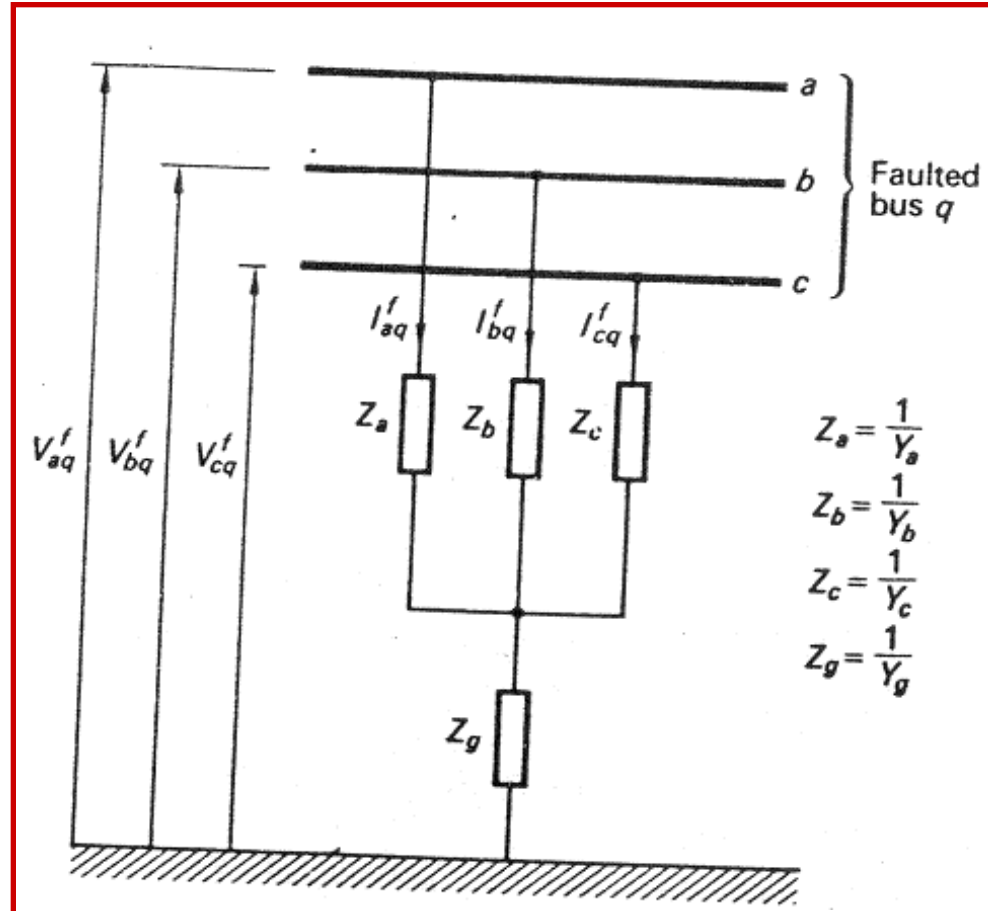
Determinación de las matrices de secuencia de falla



De la anterior discusión, debe quedar claro que la clave del análisis consiste en disponer de las matrices de impedancia y de admitancia de falla. En este sentido el análisis de CC desequilibrado es diferente y mas complicado que el caso equilibrado, donde una impedancia de falla escalar Z^f era suficiente para representar todos los casos. En el caso extremo en que el cortocircuito es rígido a tierra $Z^f = 0$; en el otro caso extremo donde $Z^f = \infty$ no hay falla.

La situación es completamente diferente en el caso desequilibrado. Siempre que tengamos un caso extremo de impedancia de falla nula o infinita en una fase la matriz de impedancia o de admitancia de falla no estará definida. Tales casos extremos son mas la regla que la excepción y es necesario aprender como manipularlos en nuestro análisis. Para ello consideramos el caso general desequilibrado siguiente:

Determinación de las matrices de secuencia de falla



Falla desequilibrada genérica

Determinación de las matrices de secuencia de falla

$$\begin{aligned}V_{aq}^f &= I_{aq}^f Z_a + \left(I_{aq}^f + I_{bq}^f + I_{cq}^f \right) Z_g \\V_{bq}^f &= I_{bq}^f Z_b + \left(I_{aq}^f + I_{bq}^f + I_{cq}^f \right) Z_g \\V_{cq}^f &= I_{cq}^f Z_c + \left(I_{aq}^f + I_{bq}^f + I_{cq}^f \right) Z_g\end{aligned}$$



$$\begin{bmatrix} V_{aq}^f \\ V_{bq}^f \\ V_{cq}^f \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_a + Z_g & Z_g & Z_g \\ Z_g & Z_b + Z_g & Z_g \\ Z_g & Z_g & Z_c + Z_g \end{bmatrix}}_{Z^f} \begin{bmatrix} I_{aq}^f \\ I_{bq}^f \\ I_{cq}^f \end{bmatrix}$$

Determinación de las matrices de secuencia de falla

Aplicando la TCS a la matriz de impedancia de falla Z^f obtenemos:

$$\mathbf{Z}_{+ - 0}^f = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}^f \mathbf{T}$$



$$\mathbf{Z}_{+ - 0}^f = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + \alpha^2 Z_b + \alpha Z_c & Z_a + \alpha Z_b + \alpha^2 Z_c \\ Z_a + \alpha Z_b + \alpha^2 Z_c & Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + \alpha^2 Z_b + \alpha Z_c \\ Z_a + \alpha^2 Z_b + \alpha Z_c & Z_a + \alpha Z_b + \alpha^2 Z_c & Z_a + Z_b + Z_c + 9Z_g \end{bmatrix}$$

Determinación de las matrices de secuencia de falla

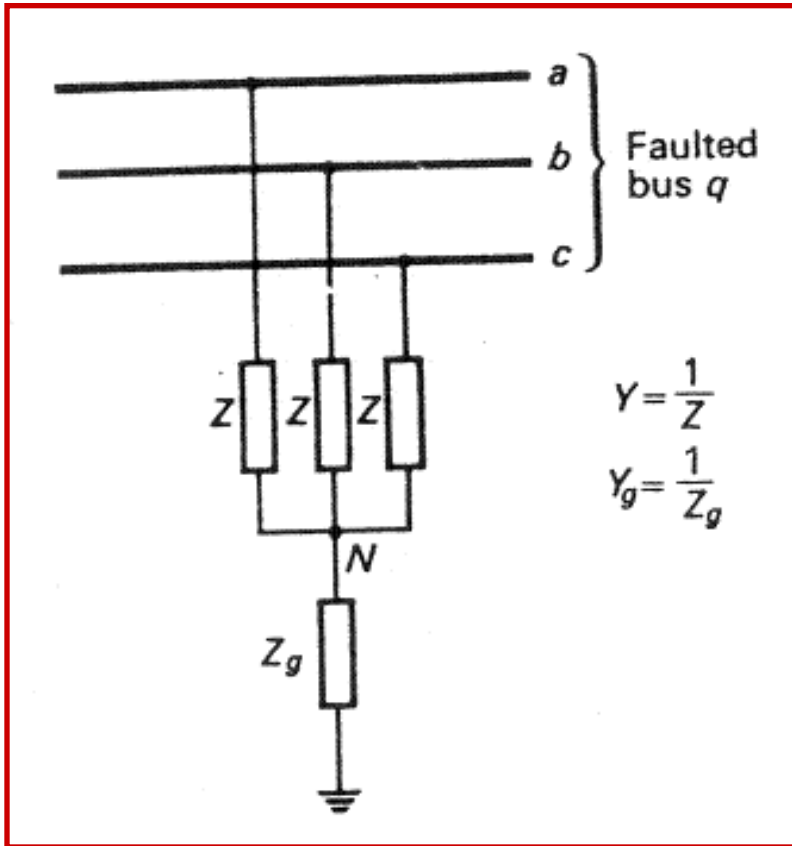
$$\begin{bmatrix} I_{aq}^f \\ I_{bq}^f \\ I_{cq}^f \end{bmatrix} = \frac{1}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_g} \underbrace{\begin{bmatrix} Y_a(Y_b + Y_c + Y_g) & -Y_a Y_b & -Y_a Y_c \\ -Y_a Y_b & Y_b(Y_a + Y_c + Y_g) & -Y_b Y_c \\ -Y_a Y_c & -Y_b Y_c & Y_c(Y_a + Y_b + Y_g) \end{bmatrix}}_{Y^f} \begin{bmatrix} V_{aq}^f \\ V_{bq}^f \\ V_{cq}^f \end{bmatrix}$$

$$Y_{+-0}^f = \frac{1}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_g}$$

$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + Y_b + Y_c) + (Y_a Y_b + Y_b Y_c + Y_c Y_a)$	$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + \alpha^2 Y_b + \alpha Y_c) - (Y_b Y_c + \alpha Y_a Y_b + \alpha^2 Y_c Y_a)$	$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + \alpha Y_b + \alpha^2 Y_c)$
$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + \alpha Y_b + \alpha^2 Y_c) - (Y_b Y_c + \alpha^2 Y_a Y_b + \alpha Y_c Y_a)$	$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + Y_b + Y_c) + (Y_a Y_b + Y_b Y_c + Y_c Y_a)$	$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + \alpha^2 Y_b + \alpha Y_c)$
$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + \alpha^2 Y_b + \alpha Y_c)$	$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + \alpha Y_b + \alpha^2 Y_c)$	$\frac{1}{3} Y_g (Y_a + Y_b + Y_c)$

Determinación de las matrices de secuencia de falla

Caso 1: CC trifásico equilibrado



$$Z_a = Z_b = Z_c = Z = \frac{1}{Y}$$

$$\mathbf{Z}_{+0}^f = \begin{bmatrix} Z & 0 & 0 \\ 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & Z + 3Z_g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_{+0}^f = \begin{bmatrix} Y & 0 & 0 \\ 0 & Y & 0 \\ 0 & 0 & \frac{YY_g}{Y_g + 3Y} \end{bmatrix}$$

Determinación de las matrices de secuencia de falla

Puesto que $\mathbf{Z}_{+-0}^f$ es diagonal y lo mismo es cierto para la matriz $\mathbf{Z}_{+-0qq}$

se deduce que la matriz $\left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1}$ también es diagonal.

Puesto que el vector de tensiones de prefalla solo tiene componentes de secuencia positiva resulta que la corriente

$$\mathbf{I}_{+-0q}^f = \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0$$

también contiene solo componentes de secuencia positiva. De hecho, lo mismo ocurre con tensiones postfalla:

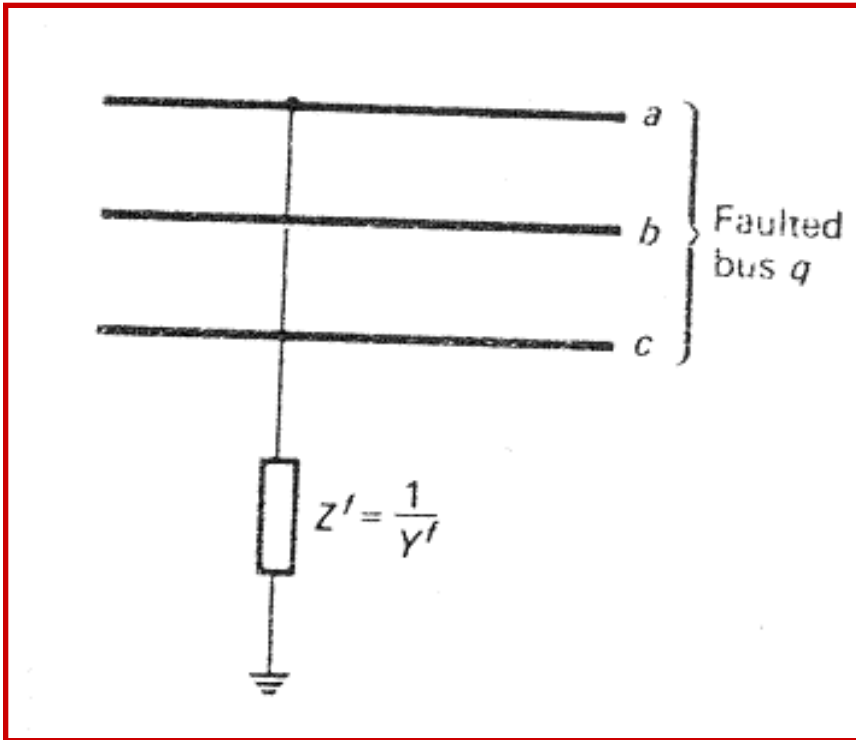
$$\mathbf{V}_{+-0i}^f = \mathbf{V}_{+-0i}^0 - \mathbf{Z}_{+-0iq} \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0 \quad i \neq q$$

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \mathbf{Z}_{+-0}^f \left\{ \mathbf{Z}_{+-0}^f + \mathbf{Z}_{+-0qq} \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^0$$

Puesto que corrientes de secuencia cero, el potencial del punto N es el de tierra local y en consecuencia no circula corriente por Z_g . ☺

Determinación de las matrices de secuencia de falla

Caso 2: CC monofásico a tierra



$$Z_b = Z_c = \infty$$

$$Z_g = 0 \quad (Y^f = \infty)$$

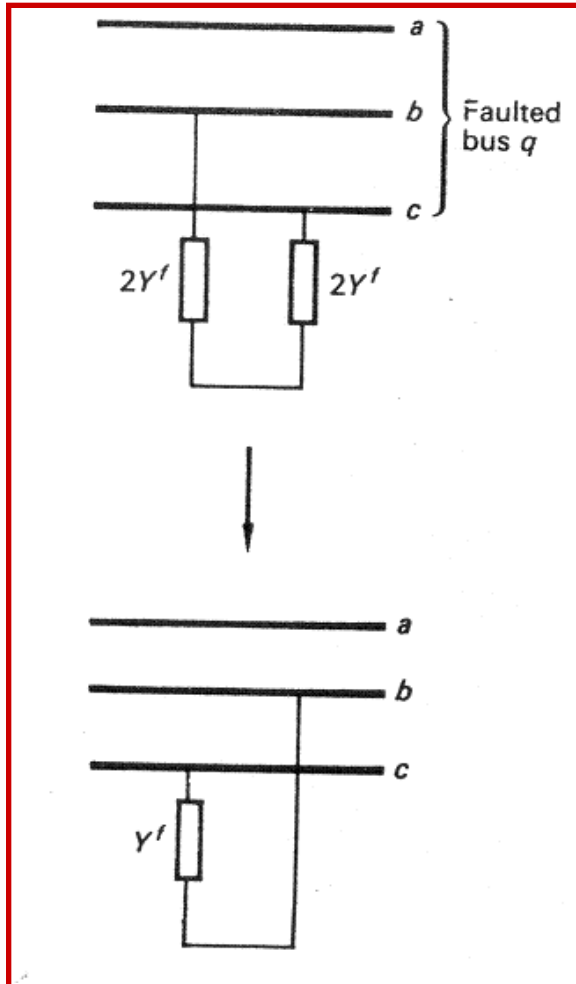
$$Z_a = Z^f = \frac{1}{Y^f}$$

$$\mathbf{Z}_{+-0}^f \quad \text{indefinida}$$

$$\mathbf{Y}_{+-0}^f = \frac{Y^f}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Determinación de las matrices de secuencia de falla

Caso 3: CC bifásico sin contacto a tierra



$$Z_a = \infty \quad (Y_a = 0)$$

$$Z_g = \infty \quad (Y_g = 0)$$

$$Y_b = Y_c = 2Y_f$$

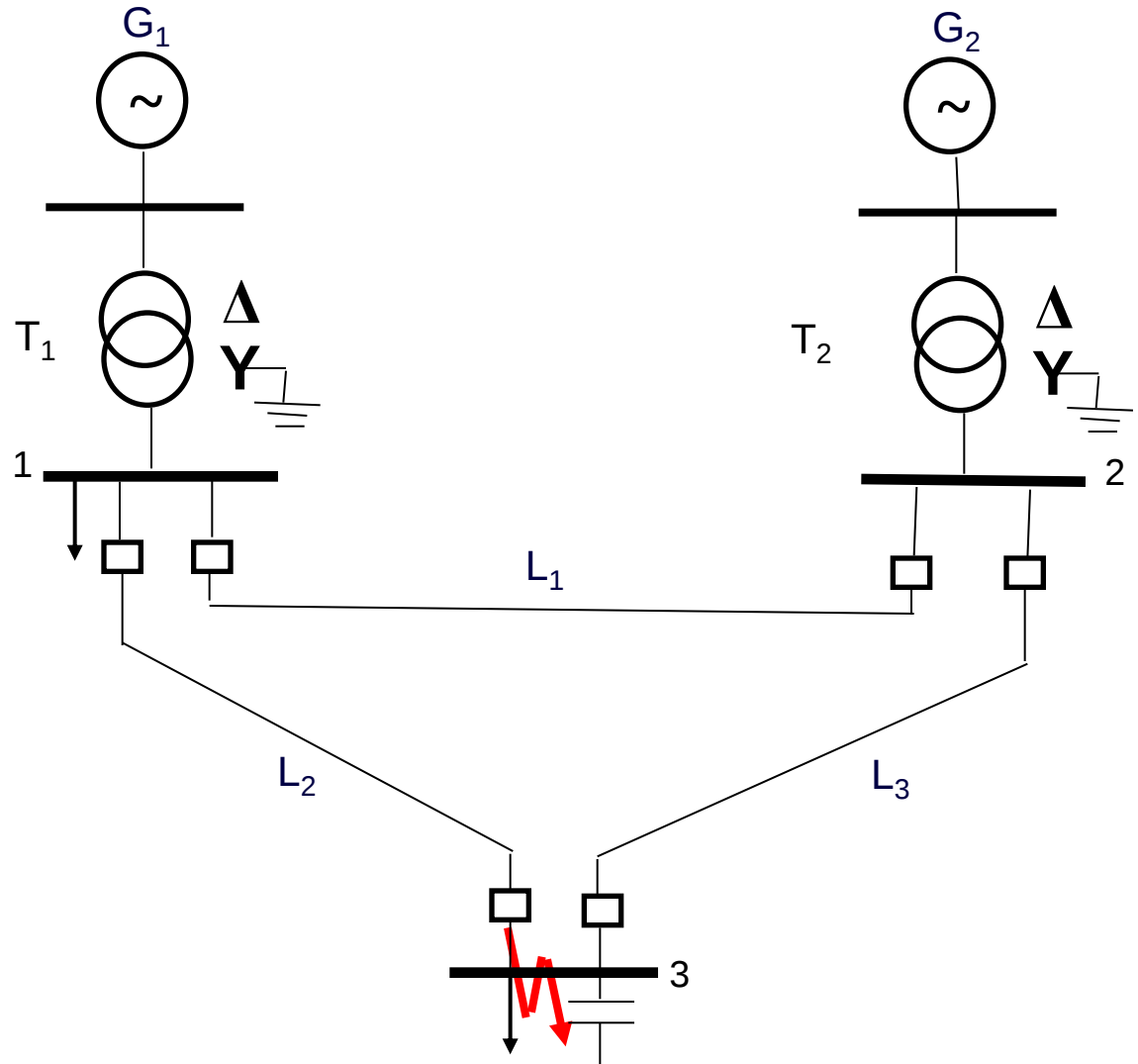
$$\mathbf{Z}_{+-0}^f \quad \text{indefinida}$$

$$\mathbf{Y}_{+-0}^f = \mathbf{Y}^f \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Ejemplo: retomamos el ejemplo del SEP de tres barras para el cual la matriz de impedancia de barras de componentes de secuencia $Z_{+-0\text{barras}}$ ya ha sido calculada. Supongamos que en la barra 3 se desarrolla un CC monofásico a tierra.



Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

$$Z_{+-0\text{barras}} = j \begin{bmatrix} 0,0728 & 0 & 0 & 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0728 & 0 & 0 & 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0380 & 0 & 0 & 0,0060 & 0 & 0 & 0,0220 \\ \hline 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0386 & 0 & 0 & 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0060 & 0 & 0 & 0,0220 & 0 & 0 & 0,0140 \\ \hline 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 & 0 & 0,1014 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0557 & 0 & 0 & 0,0470 & 0 & 0 & 0,1014 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0220 & 0 & 0 & 0,0140 & 0 & 0 & 0,1180 \end{bmatrix}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Las tensiones en la barra $q=3$ se obtienen de la ecuación:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \left\{ \mathbf{Id} + \mathbf{Z}_{+-0qq} \mathbf{Y}_{+-0}^f \right\}^{-1} \mathbf{V}_{+-0q}^f$$

De acuerdo al Caso 2:

$$\mathbf{Y}_{+-0}^f = \frac{Y^f}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

por lo tanto:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{+qq} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{-qq} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{0qq} \end{bmatrix} \frac{Y^f}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} V_q^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

calculando:

$$\mathbf{V}_{+-0q}^f = \frac{V_q^0}{1 + \frac{Y^f}{3}(Z_{+qq} + Z_{-qq} + Z_{0qq})} \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y^f}{3}(Z_{-qq} + Z_{0qq}) \\ -Z_{-qq} \frac{Y^f}{3} \\ -Z_{0qq} \frac{Y^f}{3} \end{bmatrix}$$

La corriente de CC en la barra q=3 se obtiene de la ecuación:

$$\mathbf{I}_{+-0q}^f = \mathbf{Y}_{+-0}^f \mathbf{V}_{+-0q}^f$$

$$\mathbf{I}_{+-0q}^f = V_q^0 \frac{\frac{Y^f}{3}}{1 + \frac{Y^f}{3}(Z_{+qq} + Z_{-qq} + Z_{0qq})} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Finalmente, las tensiones postfalla en barras $i \neq q$ se obtienen de la ecuación:

$$\mathbf{V}_{+-0i}^f = \mathbf{V}_{+-0i}^0 - \mathbf{Z}_{+-0iq} \mathbf{I}_{+-0q}^f$$

$$\mathbf{V}_{+-0i}^f = \begin{bmatrix} V_i^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{+iq} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{-iq} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{0iq} \end{bmatrix} \mathbf{I}_{+-0q}^f$$

$$\mathbf{V}_{+-0i}^f = \begin{bmatrix} V_i^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - V_q^0 \frac{\frac{Y^f}{3}}{1 + \frac{Y^f}{3}(Z_{+qq} + Z_{-qq} + Z_{0qq})} \begin{bmatrix} Z_{+iq} \\ Z_{-iq} \\ Z_{0iq} \end{bmatrix}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Todas las ecuaciones se simplifican si el CC es rígido a tierra:

$$\mathbf{V}_{+0q}^f = \frac{V_q^0}{(Z_{+qq} + Z_{-qq} + Z_{0qq})} \begin{bmatrix} (Z_{-qq} + Z_{0qq}) \\ -Z_{-qq} \\ -Z_{0qq} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_{+0q}^f = \frac{V_q^0}{(Z_{+qq} + Z_{-qq} + Z_{0qq})} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_{+0i}^f = \begin{bmatrix} V_i^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{V_q^0}{(Z_{+qq} + Z_{-qq} + Z_{0qq})} \begin{bmatrix} Z_{+iq} \\ Z_{-iq} \\ Z_{0iq} \end{bmatrix} \quad i \neq q$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

A los fines de calcular numéricamente, en este ejemplo $V_q^0=1$:

$$\mathbf{Z}_{+033} = \begin{bmatrix} j\,0,1014 & 0 & 0 \\ 0 & j\,0,1014 & 0 \\ 0 & 0 & j\,0,1118 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\mathbf{V}_{+03}^f = \frac{1}{j(0,1014 + 0,1014 + 0,1118)} \begin{bmatrix} j(0,1014 + 0,1014) \\ -j\,0,1014 \\ -j\,0,1118 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,685 \\ -0,317 \\ -0,369 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\mathbf{I}_{+03}^f = \frac{1}{j(0,1014 + 0,1014 + 0,1118)} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 3,12 \\ 3,12 \\ 3,12 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Ahora calculamos las tensiones postfalla en barras 1 y 2:

$$\mathbf{Z}_{+013} = \begin{bmatrix} j 0,0557 & 0 & 0 \\ 0 & j 0,0557 & 0 \\ 0 & 0 & j 0,0220 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{+023} = \begin{bmatrix} j 0,0472 & 0 & 0 \\ 0 & j 0,0472 & 0 \\ 0 & 0 & j 0,0140 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_{+01}^f = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{j (0,1014 + 0,1014 + 0,1180)} \begin{bmatrix} j 0,0557 \\ j 0,0557 \\ j 0,0220 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,826 \\ -0,174 \\ -0,069 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\mathbf{V}_{+02}^f = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{j (0,1014 + 0,1014 + 0,1180)} \begin{bmatrix} j 0,0472 \\ j 0,0472 \\ j 0,0140 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,853 \\ -0,147 \\ -0,044 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Ahora, por ejemplo, calculamos la corriente en la línea que vincula las barras 1 y 3:

$$\mathbf{I}_{+-013}^f = \mathbf{Y}_{+-013} \left\{ \mathbf{V}_{+-01}^f - \mathbf{V}_{+-03}^f \right\}$$

$$\mathbf{Z}_{+-013} = \begin{bmatrix} j\,0,10 & 0 & 0 \\ 0 & j\,0,10 & 0 \\ 0 & 0 & j\,0,20 \end{bmatrix} \text{ p.u.} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{Y}_{+-013} = \begin{bmatrix} -j\,10 & 0 & 0 \\ 0 & -j\,10 & 0 \\ 0 & 0 & -j\,5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_{+-013}^f = \begin{bmatrix} -j\,10 & 0 & 0 \\ 0 & -j\,10 & 0 \\ 0 & 0 & -j\,5 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 0,826 \\ -0,174 \\ -0,069 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,685 \\ -0,317 \\ -0,369 \end{bmatrix} \right\} = -j \begin{bmatrix} 1,42 \\ 1,42 \\ 1,50 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

Ejemplo de Análisis de CC desequilibrado

Los correspondientes valores por fase, por ejemplo para la barra 3 se obtienen de:

$$\mathbf{V}_{abc3}^f = \mathbf{T} \mathbf{V}_{+-03}^f$$

$$\mathbf{V}_{abc3}^f = \begin{bmatrix} V_{a3}^f \\ V_{b3}^f \\ V_{c3}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -0,5 - j0,866 & -0,5 + j0,866 & 1 \\ -0,5 + j0,866 & -0,5 - j0,866 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,685 \\ -0,317 \\ -0,369 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,553 - j0,868 \\ -0,553 + j0,868 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,0292 \angle -122,5^\circ \\ 1,0292 \angle 122,5^\circ \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

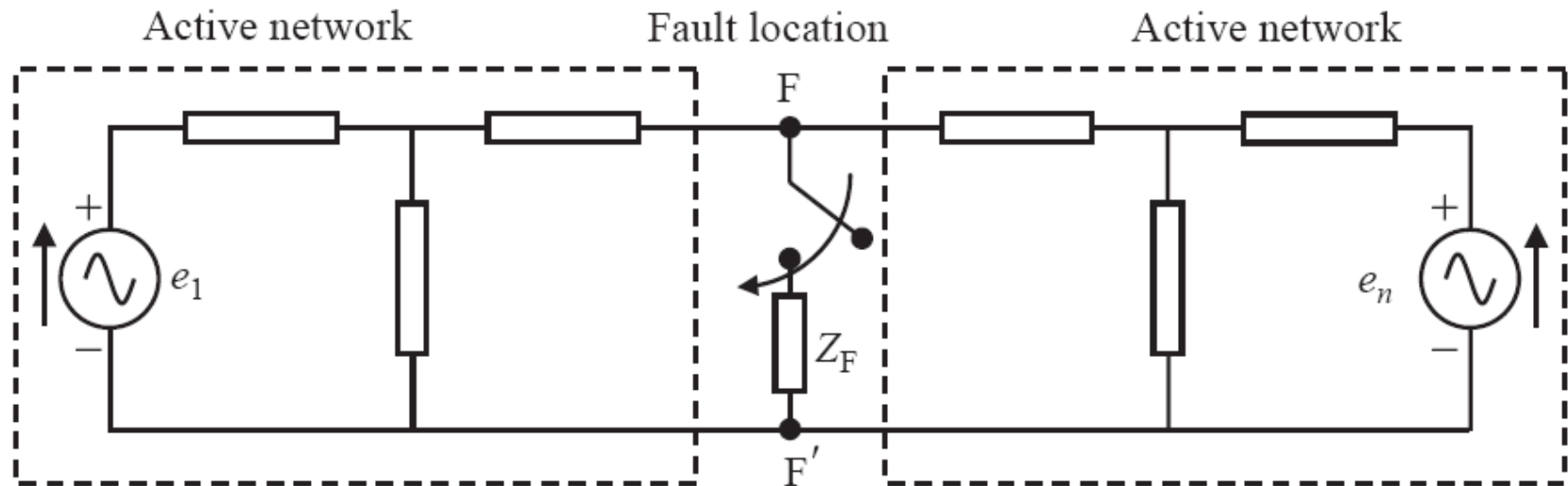
$$\mathbf{I}_{abc3}^f = \mathbf{T} \mathbf{I}_{+-03}^f$$

$$\mathbf{I}_{abc3}^f = \begin{bmatrix} I_{a3}^f \\ I_{b3}^f \\ I_{c3}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -0,5 - j0,866 & -0,5 + j0,866 & 1 \\ -0,5 + j0,866 & -0,5 - j0,866 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j 3,12 \\ -j 3,12 \\ -j 3,12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j 9,36 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$



Técnicas para Análisis de CC

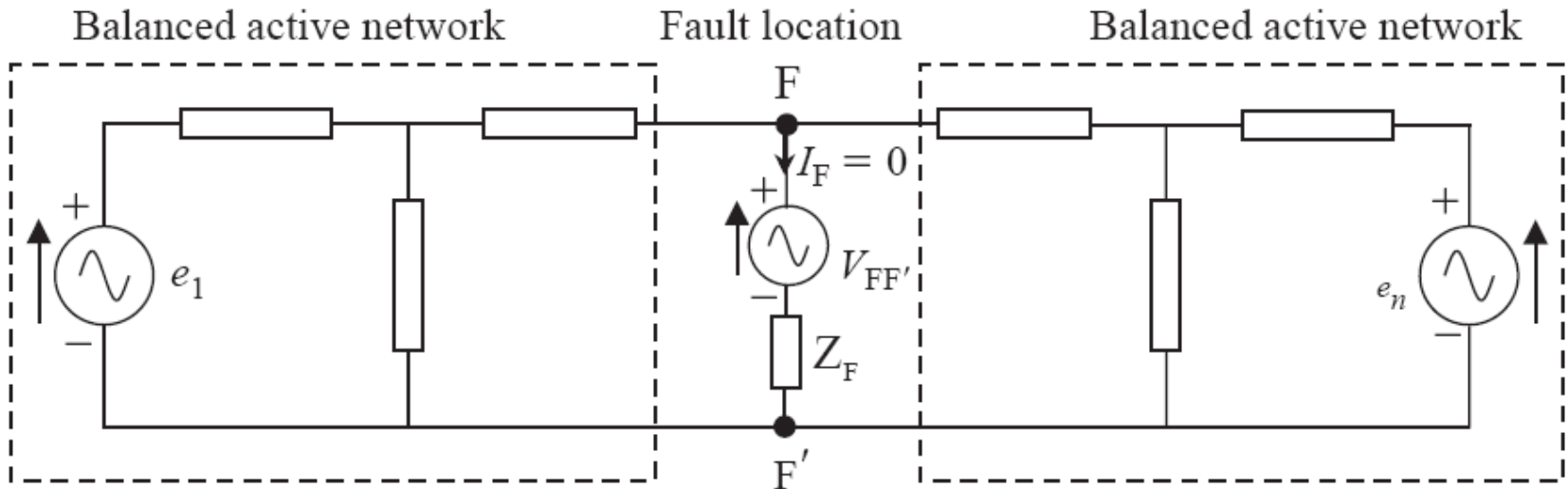
❑ Simulación de cortocircuitos



CC a través de una impedancia de falla

Técnicas para Análisis de CC

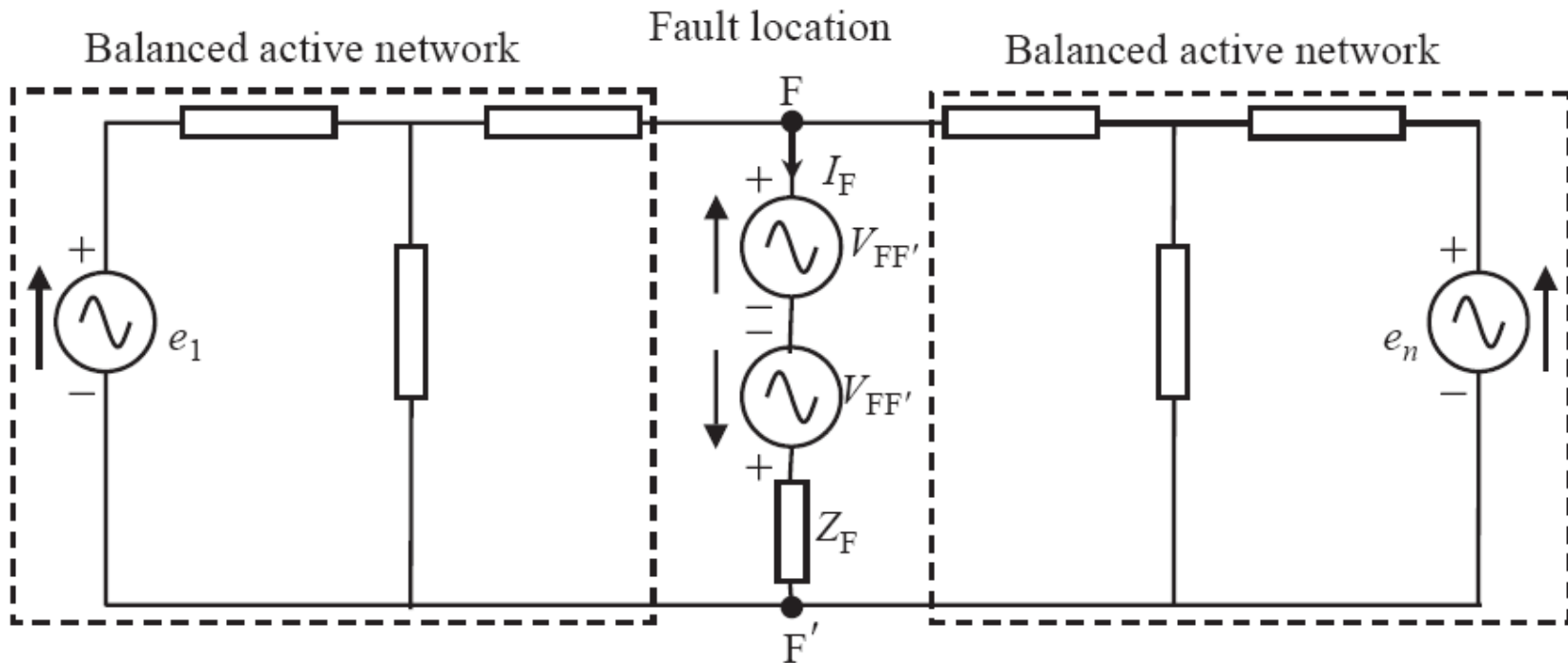
❑ Simulación de cortocircuitos



Red de prefalla

Técnicas para Análisis de CC

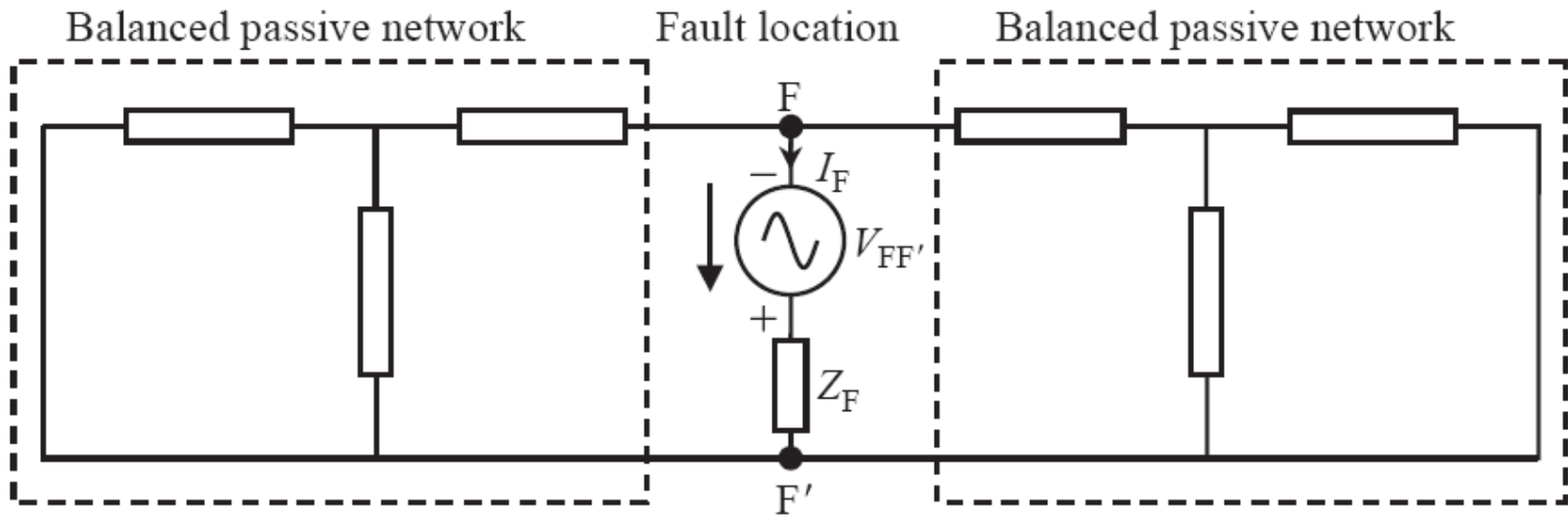
❑ Simulación de cortocircuitos



Simulación del CC a través de FF'

Técnicas para Análisis de CC

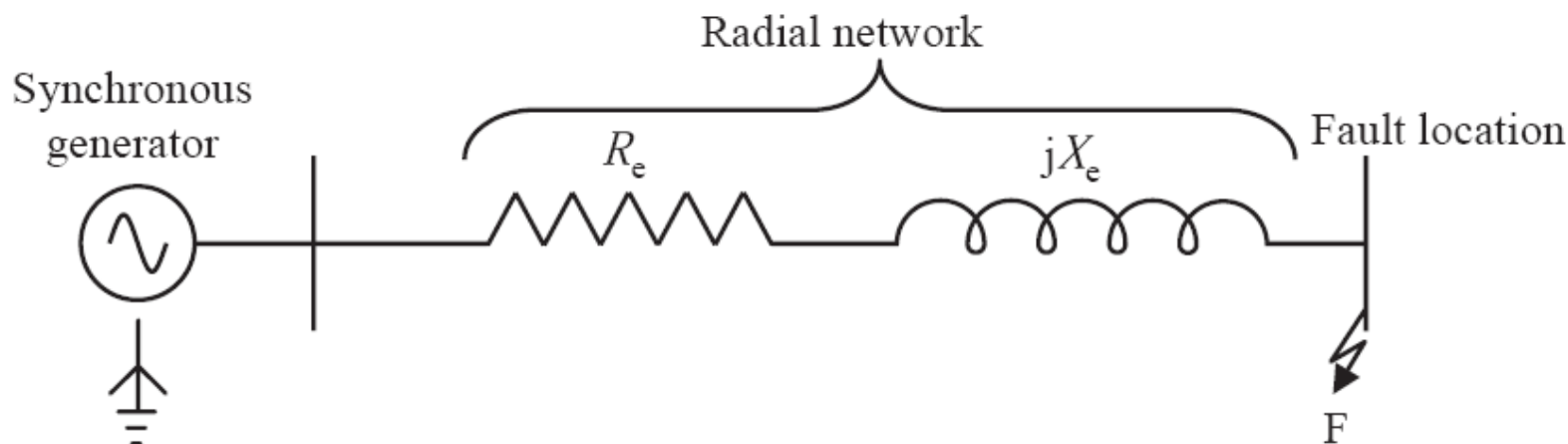
❑ Simulación de cortocircuitos



Cálculo de los cambios de tensión y corriente debidos al CC usando Thevenin

Técnicas para Análisis de CC

□ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC



$$i_{\text{rms}}(t) = \frac{1}{X_d + X_{\text{Eq}}} + \left(\frac{1}{X'_d + X_{\text{Eq}}} - \frac{1}{X_d + X_{\text{Eq}}} \right) e^{-t/T'_a} + \left(\frac{1}{X''_d + X_{\text{Eq}}} - \frac{1}{X'_d + X_{\text{Eq}}} \right) e^{-t/T''_{ac}}$$

$$i_{\text{dc}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{X''_d + X_{\text{Eq}}} e^{-t/T_{\text{dc}}}$$

Técnicas para Análisis de CC

❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

$$T''_{ac} = \frac{X''_d + X_{Eq}}{X'_d + X_{Eq}} T''_{do} \quad T'_{ac} = \frac{X'_d + X_{Eq}}{X_d + X_{Eq}} T'_{do} \quad T_{dc} = \frac{X''_d + X_{Eq}}{\omega_s(R_a + R_{Eq})}$$

$X_{Eq} = X_e \quad R_{Eq} = R_e$ for a three-phase short circuit

$X_{Eq} = X^N + X^Z + 3X_e \quad R_{Eq} = 2R_a + 3R_e$ for a single-phase short circuit

Técnicas para Análisis de CC

□ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

$$T''_{ac} = \frac{X''_d + X_e}{X'_d + X_e} T''_{do} = \frac{\frac{X''_d}{X_e} + 1}{\frac{X'_d}{X_e} + 1} \frac{X'_d}{X''_d} T''_d$$

$$T''_{do} = \frac{X'_d}{X''_d} T''_d$$

$$\bar{X}_e = 0 \quad \longrightarrow \quad T''_{ac} = T''_d$$

$$X_e \rightarrow \infty \quad \longrightarrow \quad T''_{ac} = \frac{X'_d}{X''_d} T''_d$$

$$X'_d \approx 1.1X''_d \text{ to } 1.5X''_d \quad \longrightarrow \quad T''_{ac} \approx T''_d \text{ to } 1.5T''_d.$$

Técnicas para Análisis de CC

❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

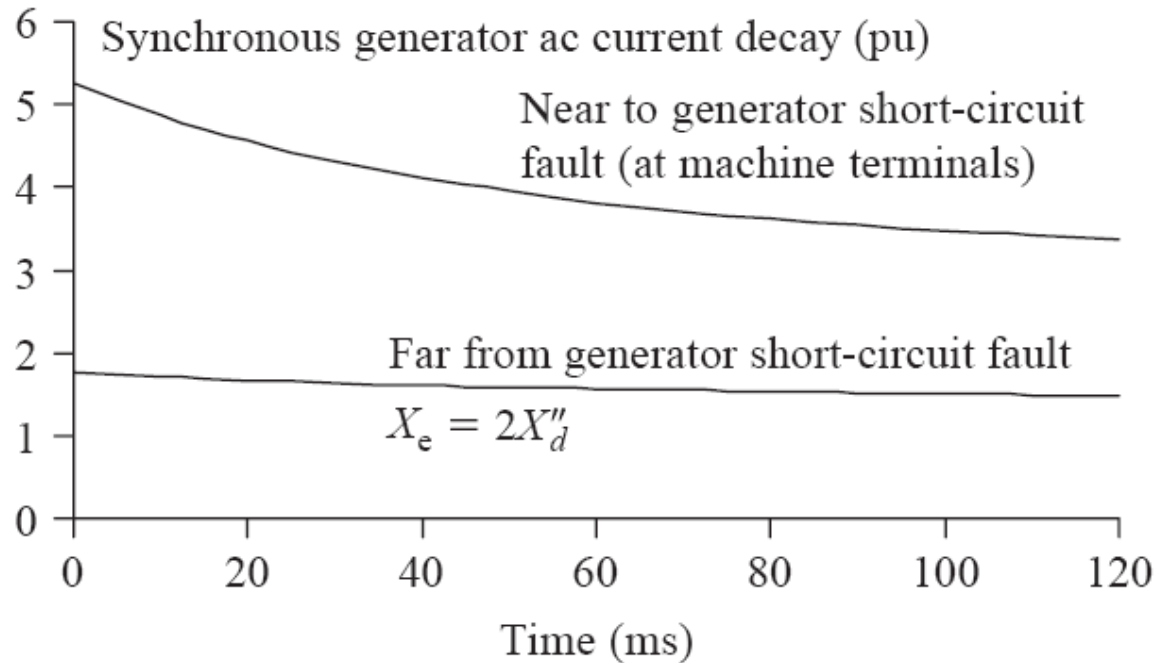
$$T'_{ac} = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e} T'_{do} = \frac{\frac{X'_d}{X_e} + 1}{\frac{X_d}{X_e} + 1} \frac{X_d}{X'_d} T'_d$$

$$X_e \rightarrow \infty \quad \longrightarrow \quad T'_{ac} = \frac{X_d}{X'_d} T'_d$$

$$X_d \approx \underline{X'_d} \text{ to } \underline{8X'_d} \quad \longrightarrow \quad \underline{T'_{ac} \approx T'_d \dots 8T'_d}$$

Técnicas para Análisis de CC

❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC



□ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

$$T_{dc} = \frac{X_d'' + X_e}{\omega_s(R_a + R_e)} = \frac{X_d''}{\omega_s R_a} \times \frac{\left(1 + \frac{X_e}{X_d''}\right)}{\left(1 + \frac{R_e}{R_a}\right)} = T_{a(3\phi)} \times \frac{\left(1 + \frac{X_e}{X_d''}\right)}{\left(1 + \frac{R_e}{R_a}\right)}$$

where $T_{a(3\phi)}$ is the generator's armature time constant.

$$X_d''/R_a > X_e/R_e \quad \longrightarrow \quad \frac{R_e}{R_a} > \frac{X_e}{X_d''} \quad \longrightarrow \quad \frac{X_d'' + X_e}{\omega_s(R_a + R_e)} < \frac{X_d''}{\omega_s R_a}$$

$$\longrightarrow \quad T_{dc} < T_{a(3\phi)}$$

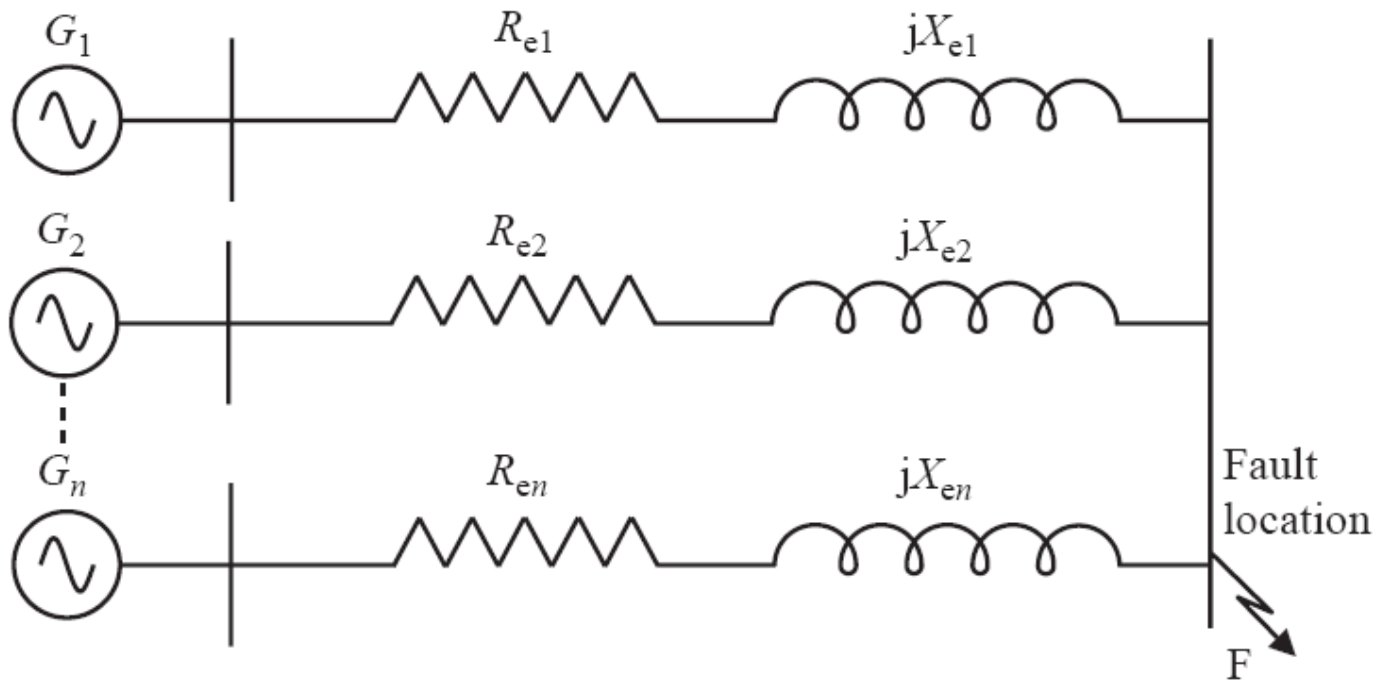
- ❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

La observación importante es que el decaimiento de la componente de alterna de la corriente de CC es muy pronunciado en el caso de falla cercana al generador pero despreciable en el caso de falla lejana (eléctricamente) al generador.

Contrariamente, el decaimiento de la componente de continua de la corriente de CC es mayor en el caso de falla lejana que en el caso de falla cercana.

Técnicas para Análisis de CC

- ❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC



Técnicas para Análisis de CC

❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

$$\begin{aligned} i_{ac}(t) &= \left(\frac{1}{X_1'' + X_{e1}} - \frac{1}{X_1' + X_{e1}} \right) e^{-t/T_{ac(1)}''} \\ &+ \left(\frac{1}{X_2'' + X_{e2}} - \frac{1}{X_2' + X_{e2}} \right) e^{-t/T_{ac(2)}''} + \dots \\ &+ \left(\frac{1}{X_n'' + X_{en}} - \frac{1}{X_n' + X_{en}} \right) e^{-t/T_{ac(n)}''} \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{X_i'' + X_{ei}} - \frac{1}{X_i' + X_{ei}} \right) e^{-t/T_{ac(i)}''} \quad \text{for } t \geq 0 \\ &\neq \frac{1}{X_{Eq}} e^{-t/T_{ac(Eq)}''} \quad \text{for } t > 0 \end{aligned}$$

- ❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

$$T''_{ac(i)} = \frac{X''_{d(i)} + X_{e(i)}}{X'_{d(i)} + X_{e(i)}} T''_{do(i)} \quad \text{for a synchronous generator/motor}$$

$$T''_{ac(i)} = \frac{X''_{(i)} + X_{e(i)}}{X'_{(i)} + X_{e(i)}} T''_{o(i)} \quad \text{for an induction generator/motor}$$

Técnicas para Análisis de CC

□ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC

$$i_{dc}(t) = \frac{\sqrt{2}}{X_1'' + X_{e1}} e^{-t/T_{dc(1)}} + \frac{\sqrt{2}}{X_2'' + X_{e2}} e^{-t/T_{dc(2)}} + \dots + \frac{\sqrt{2}}{X_n'' + X_{en}} e^{-t/T_{dc(n)}}$$

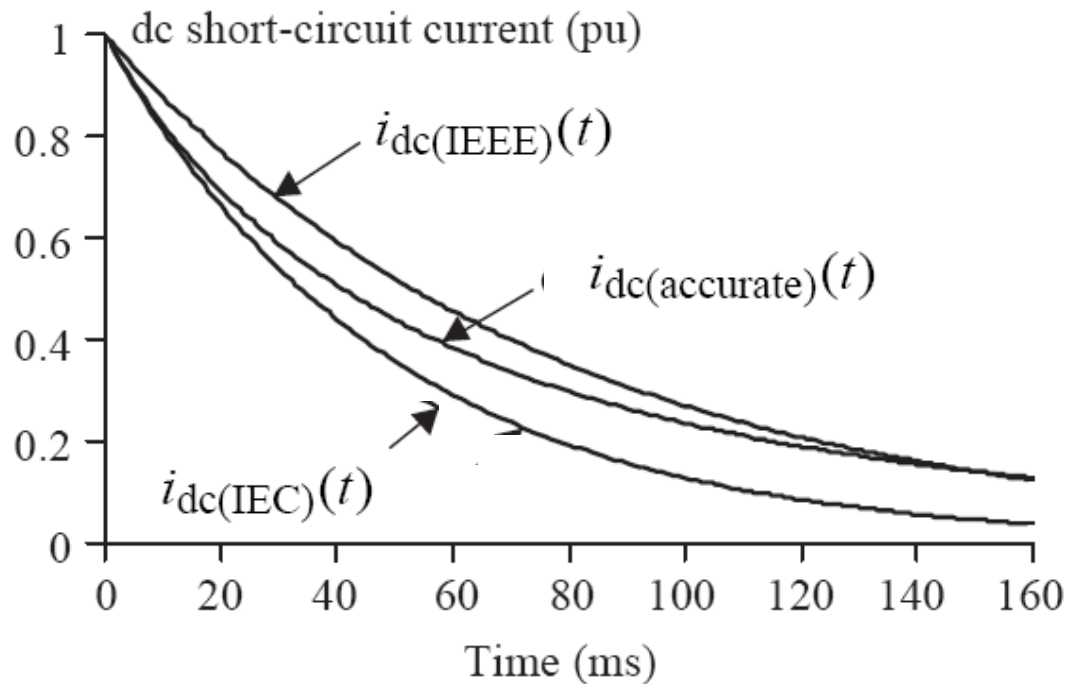
$$= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sqrt{2}}{X_i'' + X_{ei}} e^{-t/T_{dc(i)}} \right) \neq \frac{\sqrt{2}}{X_{Eq}} e^{-t/T_{dc(Eq)}} \quad \text{for } t > 0$$

$$T_{dc(i)} = \frac{X_{di}'' + X_{ei}}{\omega_s(R_{ai} + R_{ei})} \quad \text{for a synchronous generator}$$

$$T_{dc(i)} = \frac{X_i'' + X_{ei}}{\omega_s(R_{si} + R_{ei})} \quad \text{for an induction generator/motor}$$

Técnicas para Análisis de CC

- ❑ Variación en el tiempo de las componentes ac y dc de la corriente de CC



Estándares para Análisis de CC

❑ Revisión Histórica

En 1918 Fortescue presentó en una conferencia del AIEE (American Institute of Electrical Engineers) una de las más poderosas herramientas para análisis de cortocircuito en redes polifásicas equilibradas y desequilibradas:

❖ Fortescue, C. L. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. ***Trans. AIEE 37: 1027-1140, 1918***

El procedimiento era aplicable al cálculo de soluciones analíticas así como también a los cuadros de cálculo en cc y ca, por lo que fue ampliamente adoptado en Europa y EEUU durante los primeros años de la industria eléctrica. Sin embargo, la complejidad de los cálculos de cortocircuito para cualquier sistema de potencia en la práctica industrial estaba mas allá del alcance de los cálculos manuales, independientemente de la potencia del método de componentes simétricas. Resultaba claro la necesidad de aproximar ciertas interacciones eléctricas para complementar el método de componentes simétricas a través de un estándar.

Estándares para Análisis de CC

❑ Revisión Histórica

La primera metodología estándar para calcular corrientes de cortocircuito fue introducida en 1929 por la VDE (Verband Deutscher Electrotechniker). En ese mismo año, el MIT (Massachusetts Institute of Technology) y GE (General Electric Company) desarrollaron conjuntamente un cuadro de cálculo en ca. Los estudios de cortocircuito que podían hacerse en un cuadro de cálculo en cc, se podrían hacer a partir de ese momento en forma mas precisa en un cuadro de cálculo en ca.

Entre 1940 y 1950 en EEUU la ASA (American Standards Association) desarrolló estándares para calcular corrientes de cortocircuito similares a los de la VDE en el uso de componentes simétricas pero diferentes en relación a los factores empíricos que cada estándar usaba para aproximar fenómenos tales como el decaimiento temporal de la corriente durante un cortocircuito. En 1969, ASA adopta el nombre de ANSI (American National Standards Institute). En 1987, el estándar VDE 0102 fue incorporado a un nuevo estándar IEC 909.

Con el paso del tiempo, los factores empíricos de los estándares se tornaron más críticos debido al hecho de que la capacidad nominal del equipamiento eléctrico era establecida en consonancia con cada método particular de cálculo.

Estándares para Análisis de CC

❑ Revisión Histórica

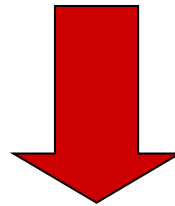
Como consecuencia de ello, tanto los estándares ANSI como los IEC para análisis de cortocircuito han refinado su metodología y factores empíricos.

El estándar IEC 909 fue actualizado en 2001 como IEC 60909. El estándar IEEE C37.010 (1999) es una actualización del de 1988 y éste del de 1979. Antes de 1964 el estándar estaba basado en la corriente total en oposición al actual basado en la corriente simétrica.

A diferencia del IEC 60909, el cual establece solamente los procedimientos de cálculo de corrientes de cortocircuito, el IEEE C37.010 está orientado al cálculo de las solicitudes de servicio de interruptores. En consecuencia, la metodología de cálculo de corrientes de cortocircuito está incluida dentro de la guía de aplicación de interruptores.

Actualmente, la mayoría de los estudios de cortocircuito basados en estos estándares se realiza en computadora digital, y los procedimientos empíricos para predecir la respuesta del equipamiento han sido combinados con técnicas analíticas de reducción de redes basadas en la manipulación de matrices ralas.

Selector de Modos de Estudio

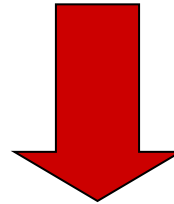


Análisis de CC

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5



Barra de Herramientas



Editor de Estudio
de CC

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Nombre del caso de estudio → Info

CC a bornes de la carga → Load Terminal Fault

Impedancia de cables y protecciones → Equip. Cable & OL Heater

Niveles tensión barras → Bus Selection

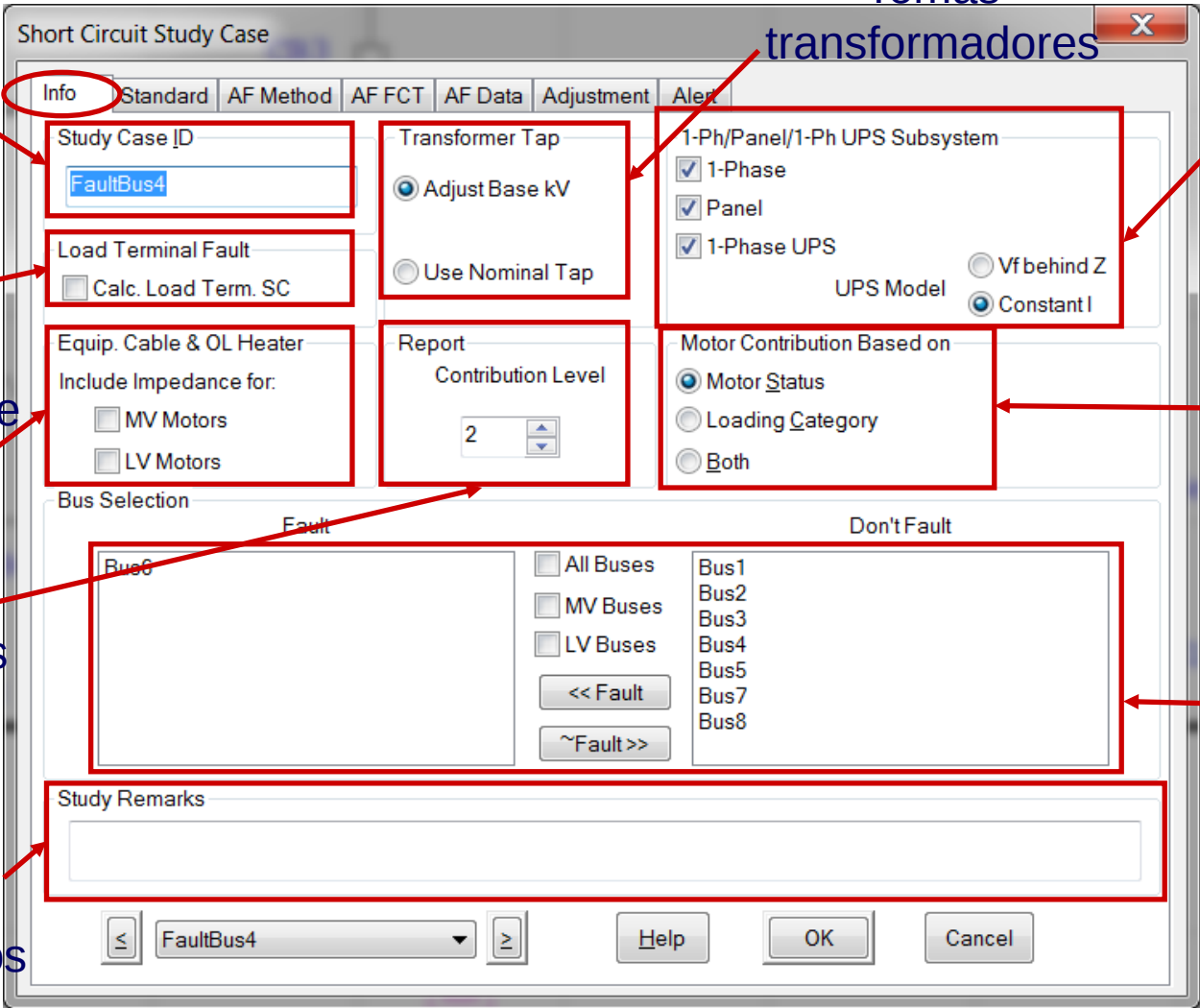
Hasta 120 caracteres alfanuméricos → Study Remarks

Tomas transformadores → Transformer Tap

Subsistemas monofásicos → 1-Ph/Panel/1-Ph UPS Subsystem

Contribución Motores → Motor Contribution Based on

selección barras CC → Fault / Don't Fault



The screenshot shows the 'Short Circuit Study Case' dialog box with the following components:

- Tabs:** Info (selected), Standard, AF Method, AF FCT, AF Data, Adjustment, Alert.
- Study Case ID:** FaultBus4
- Load Terminal Fault:** ☐ Calc. Load Term. SC
- Equip. Cable & OL Heater:** Include Impedance for: ☐ MV Motors, ☐ LV Motors
- Transformer Tap:** ☒ Adjust Base kV, ☐ Use Nominal Tap
- Report:** Contribution Level: 2
- 1-Ph/Panel/1-Ph UPS Subsystem:** ☒ 1-Phase, ☒ Panel, ☒ 1-Phase UPS. UPS Model: ☐ Vf behind Z, ☒ Constant I
- Motor Contribution Based on:** ☒ Motor Status, ☐ Loading Category, ☐ Both
- Bus Selection:** Fault (Bus6), Don't Fault (Bus1, Bus2, Bus3, Bus4, Bus5, Bus7, Bus8). ☐ All Buses, ☐ MV Buses, ☐ LV Buses. Buttons: << Fault, ~Fault >>
- Study Remarks:** Text area for notes.
- Footer:** FaultBus4, Help, OK, Cancel.

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)

Standard	Pub. Year	Title
IEEE C37.04 IEEE C37.04f IEEE C37.04g IEEE C37.04h IEEE C37.04i IEEE C37.04	1979 (1988) 1990 1986 1990 1991 1999	Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements
IEEE C37.010 IEEE C37.010b IEEE C37.010e IEEE C37.010	1979, 1988, 1999 1985 1985 1999	IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Basis and supplements
IEEE C37.13	1990	Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures
IEEE C37.013	1997	Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis
IEEE C37.20.1	2002	Standard for Metal Enclosed Low-Voltage Power Circuit Breaker Switchgear
IEEE Std 399	1990 & 1997	Power System Analysis – the Brown Book
IEEE Std 141	1986, 1993, 2002	Electric Power Distribution for Industrial Plants – the Red Book
IEEE Std 242	1986 & 2001	IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems – the Buff Book
UL 489_9	1996, 2000, 2002	Standard for Safety for Molded-Case Circuit Breakers, Molded-Case Switches, and Circuit-Breaker Enclosures

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)

El estándar IEEE C37.010 es aplicable a interruptores de potencia con tensión nominal mayor a 1 kV para uso en sistemas eléctricos de potencia industriales, comerciales, así como en la red de transmisión y distribución, operados a frecuencia nominal de 60 Hz. La metodología de cálculo fue desarrollada para suministrar resultados conservativos para la determinación de las exigencias de servicio por cortocircuito (short-circuit duties) y la determinación y selección de las capacidades nominales de los interruptores de potencia.

La forma de onda de la corriente de cortocircuito asimétrica se supone que tiene la máxima componente de continua.

El estándar no hace distinción entre los cortocircuitos alimentados por una única fuente (red radial) o por múltiples fuentes (redes malladas).

El estándar trata solo con el cálculo de las máximas corrientes de cortocircuito y distingue entre cortocircuitos locales (con decaimiento de corriente) o remotos (sin decaimiento).

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Descripción General de la metodología de cálculo

- ✓ Se reemplazan todas las fuentes de tensión externas y las fem internas de las máquinas por una fuente de tensión equivalente en la localización de la falla, igual a la tensión de prefalla.
- ✓ Todas las máquinas se representan por sus impedancias internas.
- ✓ Las capacitancias de las líneas y las cargas estáticas se desprecian.
- ✓ Las fallas trifásicas son sólidas (no se considera resistencia de arco).
- ✓ Las impedancias del sistema se suponen equilibradas.
- ✓ Se emplea el método de Componentes Simétricas.
- ✓ Se conforman tres redes de secuencia para calcular las corrientes de cortocircuito **momentánea, de interrupción**, y de **régimen permanente**; así como las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección. Estas redes son: la red de $\frac{1}{2}$ ciclo (red subtransitoria), la red de 1,5 - 4 ciclos (red transitoria) y la red de 30 ciclos (red de régimen permanente).
- ✓ Se determina una X/R para cada barra individual fallada. Esta relación se usa para determinar el factor de multiplicación (MF) para cuantificar la componente de continua para la corriente de cortocircuito.

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Red de ½ ciclo

Type of Machine	X _{sc}
Utility	X''
Turbo generator	X _d ''
Hydro-generator with amortisseur winding	X _d ''
Hydro-generator without amortisseur winding	0.75 X _d '
Condenser	X _d ''
Synchronous motor	X _d ''
Induction Machine	
> 1000 hp @ 1800 rpm or less	X _d ''
> 250 hp @ 3600 rpm	X _d ''
All other ≥ 50 hp	1.2 X _d ''
< 50 hp	1.67 X _d ''

½ Cycle Network Impedance

(X_d'' = 1/LRC for induction motors)

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Red de ½ ciclo

Type of Device	Duty
High voltage circuit breaker	Closing and latching capability
Low voltage circuit breaker	Interrupting capability
Fuse	Interrupting capability
Switchgear and MCC	Bus bracing
Relay	Instantaneous settings

½ Cycle Network Duty

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Red de 1,5 - 4 ciclos

Type of Machine	X _{sc}
Utility	X''
Turbo generator	X _d ''
Hydro-generator with amortisseur winding	X _d ''
Hydro-generator without amortisseur winding	0.75 X _d '
Condenser	X _d ''
Synchronous motor	1.5 X _d ''
Induction machine	
> 1000 hp @ 1800 rpm or less	1.5 X _d ''
> 250 hp @ 3600 rpm	1.5 X _d ''
All other ≥ 50 hp	3.0 X _d ''
< 50 hp	Infinity

1.5-4 Cycle Network Impedances

(X_d'' = 1/LRC for induction motors)

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Red de 1,5 - 4 ciclos

Type of Device	Duty
High voltage circuit breaker	Interrupting capability
Low voltage circuit breaker	N/A
Fuse	N/A
Switchgear and MCC	N/A
Relay	N/A

1.5-4 Cycle Network Duty

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Red de 30 ciclos

Type of Machine	Xsc
Utility	X''
Turbo generator	X_d'
Hydro-generator with amortisseur winding	X_d'
Hydro-generator without amortisseur winding	X_d'
Condenser	Infinity
Synchronous motor	Infinity
Induction machine	Infinity

30 Cycle Network Impedance

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Red de 30 ciclos

Type of Device	Duty
High voltage circuit breaker	N/A
Low voltage circuit breaker	N/A
Fuse	N/A
Switchgear and MCC	N/A
Relay	Overcurrent settings

30 Cycle Network Duty

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Factor de Multiplicación (MF)

El factor MF se determina a partir de la relación X/R del sistema equivalente en el punto de falla.

❑ Contribuciones locales y remotas

Una contribución local a una corriente de cortocircuito es la porción de la corriente de cortocircuito suministrada fundamentalmente por generadores que distan no mas de un nivel de transformación o una reactancia en serie menor que 1,5 veces la reactancia subtransitoria del generador. Toda otra contribución se considera remota.

❑ Relación de no decaimiento de la corriente alterna (NACD)

$$NACD = \frac{I_{remote}}{I_{total}}$$

- Total short circuit current $I_{total} = I_{remote} + I_{local}$
- $NACD = 0$ if all contributions are local.
- $NACD = 1$ if all contributions are remote.

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC momentánea

La corriente de CC momentánea representa el valor máximo de corriente de CC y se calcula usando la red de ½ ciclo.

➤ Procedimiento de Cálculo

1) Cálculo del valor eficaz simétrico de la corriente de CC momentánea

$$I_{mom,rms,sym} = \frac{V_{pre-fault}}{\sqrt{3}Z_{eq}}$$

donde Z_{eq} es la impedancia equivalente de la red de ½ ciclo vista desde la falla.

2) Cálculo del valor eficaz asimétrico de la corriente de CC momentánea

Donde:

$$I_{mom,rms,asym} = MF_m I_{mom,rms,sym} \quad MF_m = \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi}{X/R}}}$$

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC momentánea

3) Cálculo del valor pico de la corriente de CC momentánea

$$I_{mom,peak} = MF_p I_{mom,rms,symm}$$

donde

$$MF_p = \sqrt{2} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{X/R}} \right)$$

Estos valores de la corriente de CC momentánea se usan para:

- ✓ Capacidad de cierre de interruptores de alta tensión (HVCB).
- ✓ Capacidad de interrupción de fusibles e interruptores de baja tensión (LVCB).
- ✓ Capacidad de esfuerzos en barras.
- ✓ Ajuste instantáneo de relevadores

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para HVCB

La corriente de CC de interrupción representa el valor de corriente de CC en el periodo transitorio (1,5 - 4 ciclos) y se calcula usando la red de 1,5 - 4 ciclos.

✓ **Tiempo de partida de los contactos:** La magnitud de la componente de corriente continua en la corriente de CC de interrupción para interruptores de alta tensión (HVCB) depende del tiempo de partida de los contactos (Contact Parting Time: CPT)

✓ **Factor S:** refleja la habilidad de un HVCB (con valores nominales simétricos) para interrumpir una corriente de CC con componente de continua. Se define como el cociente entre el valor eficaz asimétrico de la corriente de interrupción nominal del HVCB y el valor eficaz simétrico de la corriente de interrupción nominal del HVCB.

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para HVCB

➤ Procedimiento de Cálculo

1) Cálculo del valor eficaz simétrico de la corriente de CC de interrupción:

$$I_{int,rms,symm} = \frac{V_{pre-fault}}{\sqrt{3}Z_{eq}}$$

donde Z_{eq} es la impedancia equivalente de la red de 1,5 - 4 ciclos vista desde la falla.

2) Cálculo de las contribuciones desde las otras barras a la corriente de CC de interrupción

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para HVCB

- o Si la contribución es desde una **barra remota**, el valor eficaz simétrico de la corriente de CC de interrupción es corregido por el factor de multiplicación para contribuciones remotas:

$$MF_r = \sqrt{1 + 2e^{-\frac{4\pi}{X/R}t}}$$

donde t= CPT [ciclos].

<u>X/R Ratio</u>	<u>8 Cycle CB (4 cv CPT)</u>	<u>5 Cycle CB (3 cv CPT)</u>	<u>3 Cycle CB (2 cv CPT)</u>	<u>2 Cycle CB (1.5 cv CPT)</u>
100	1.487	1.540	1.599	1.63
90	1.464	1.522	1.585	1.619
80	1.438	1.499	1.569	1.606
70	1.405	1.472	1.548	1.59
60	1.366	1.438	1.522	1.569
50	1.316	1.393	1.487	1.54
45	1.286	1.366	1.464	1.255
40	1.253	1.334	1.438	1.499
35	1.215	1.297	1.405	1.472
30	1.172	1.253	1.366	1.438
25	1.126	1.201	1.316	1.393
20	1.078	1.142	1.253	1.334
18	1.059	1.116	1.223	1.305
16	1.042	1.091	1.190	1.271
14	1.027	1.066	1.154	1.233
12	1.015	1.042	1.116	1.190
10	1.007	1.023	1.078	1.142
9	1.004	1.015	1.059	1.116
8	1.002	1.009	1.042	1.091
7	1.001	1.005	1.027	1.066
6	1.000	1.002	1.015	1.042
5	1.000	1.001	1.007	1.023
4	1.000	1.000	1.002	1.009
3	1.000	1.000	1.000	1.002
2	1.000	1.000	1.000	1.000
1	1.000	1.000	1.000	1.000

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para HVCB

- o Si la contribución es desde un **generador local**, el valor eficaz simétrico de la corriente de CC de interrupción es corregido por el factor de multiplicación para contribuciones locales MF_I

<u>X/R Ratio</u>	<u>8 Cycle CB (4 cy CPT)</u>	<u>5 Cycle CB (3 cy CPT)</u>	<u>3 Cycle CB (2 cy CPT)</u>	<u>2 Cycle CB (1.5 cy CPT)</u>
100	1.252	1.351	1.443	1.512
90	1.239	1.340	1.441	1.511
80	1.222	1.324	1.435	1.508
70	1.201	1.304	1.422	1.504
60	1.175	1.276	1.403	1.496
50	1.141	1.241	1.376	1.482
45	1.121	1.220	1.358	1.473
40	1.098	1.196	1.337	1.461
35	1.072	1.169	1.313	1.446
30	1.044	1.136	1.283	1.427
25	1.013	1.099	1.247	1.403
20	1.000	1.057	1.201	1.371
18	1.000	1.039	1.180	1.356
16	1.000	1.021	1.155	1.339
14	1.000	1.003	1.129	1.320
12	1.000	1.000	1.099	1.299
10	1.000	1.000	1.067	1.276
9	1.000	1.000	1.051	1.263
8	1.000	1.000	1.035	1.250
7	1.000	1.000	1.019	1.236
6	1.000	1.000	1.005	1.221
5	1.000	1.000	1.000	1.205
4	1.000	1.000	1.000	1.188
3	1.000	1.000	1.000	1.170
2	1.000	1.000	1.000	1.152
1	1.000	1.000	1.000	1.132

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para HVCB

3) Cálculo de las contribuciones remotas y locales totales y a partir de ellas del NACD

$$NACD = \frac{I_{remote}}{I_{total}}$$

- Total short circuit current $I_{total} = I_{remote} + I_{local}$
- $NACD = 0$ if all contributions are local.
- $NACD = 1$ if all contributions are remote.

4) Cálculo del valor eficaz ajustado (asimétrico) de la corriente de CC de interrupción:

$$I_{int,rms,adj} = AMF_i I_{int,rms,symm}$$

donde: $AMF_i = MF_1 + NACD (MF_r - MF_1)$

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para HVCB

5) Para HVCB con valores nominales simétricos, el valor eficaz ajustado (asimétrico) de la corriente de CC de interrupción se calcula por:

$$I_{int,rms,adj} = \frac{AMF_i I_{int,rms,symm}}{S}$$

$S=1$ para HVCB con valores nominales sobre la base de la corriente total.

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para LVCB

Debido a la acción instantánea de los LVCB a los máximos valores de corriente de CC, la red de ½ ciclo se utiliza para calcular la corriente de CC de interrupción.

➤ Procedimiento de Cálculo

1) Cálculo del valor eficaz simétrico de la corriente de CC de interrupción:

$$I_{int,rms,symm} = \frac{V_{pre-fault}}{\sqrt{3}Z_{eq}}$$

donde Z_{eq} es la impedancia equivalente de la red de ½ ciclo vista desde la falla.

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

□ Cálculo de la corriente de CC de interrupción para LVCB

2) Cálculo del valor eficaz ajustado (asimétrico) de la corriente de CC de interrupción:

$$I_{int,rms,adj} = MF I_{int,rms,symm}$$

donde:

$$MF = \frac{\sqrt{2}(1 + e^{-\frac{\pi}{X/R}})}{\sqrt{2}(1 + e^{-\frac{\pi}{(X/R)_{test}}})}$$

Basado en
corriente de
pico

$$MF = \frac{\sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi}{X/R}}}}{\sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi}{(X/R)_{test}}}}}$$

Basado en
corriente
asimetrica

Circuit Breaker Type	Max Design (Tested)	
	% PF	(X/R) test
Power Breaker (Unfused)	15	6.59
Power Breaker (Fused)	20	4.90
Molded Case (Rated Over 20,000 A)	20	4.90
Molded Case (Rated 10,001-20,000 A)	30	3.18
Molded Case (Rated 10,000 A)	50	1.73

Maximum Test PF for Low Voltage Circuit Breaker

Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

❑ Comparación de las capacidades nominales con las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección

Device Type	Device Capability	Calculated Short-Circuit Duty
Momentary Duty		
HV Bus Bracing	Asymm. KA rms	Asymm. KA rms
	Asymm. KA Crest	Asymm. KA Crest
LV Bus Bracing	Symm. KA rms	Symm. KA rms
	Asymm. KA rms	Asymm. KA rms
HVCB	C&L Capability kA rms	Asymm. KA rms
	C&L Capability kA Crest	Asymm. KA Crest
Interrupting Duty		
HVCB	Interrupting kA***	Adjusted kA
LVCB	Rated Interrupting kA	Adjusted kA

Comparison of Device Rating and Short-Circuit Current Duty

***The interrupting capability of a high voltage circuit breaker is calculated based on the nominal kV of the connected bus and the prefault voltage (Vf) if the flag is set in the Short-Circuit Study Case, as shown below.

$$\text{Interrupting kA} = (\text{Rated Int. kA}) * (\text{Rated Max. kV}) / (\text{Bus Nominal kV})$$

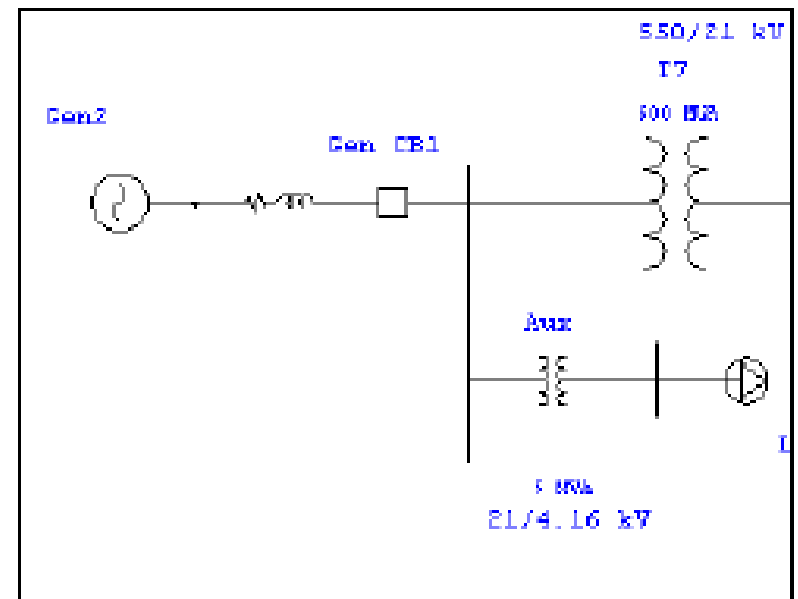
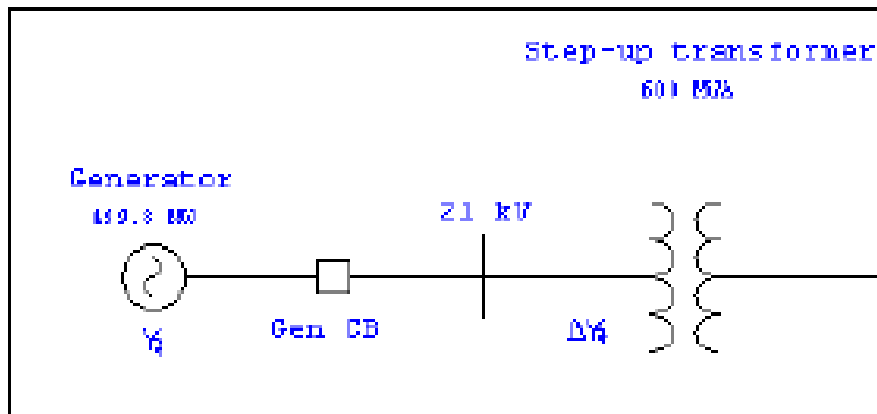
or

$$\text{Interrupting kA} = (\text{Rated Int. kA}) * (\text{Rated Max. kV}) / (\text{Bus Nominal kV} * V_f)$$

The calculated interrupting kA (as shown above) is then limited to the maximum interrupting kA of the circuit breaker.

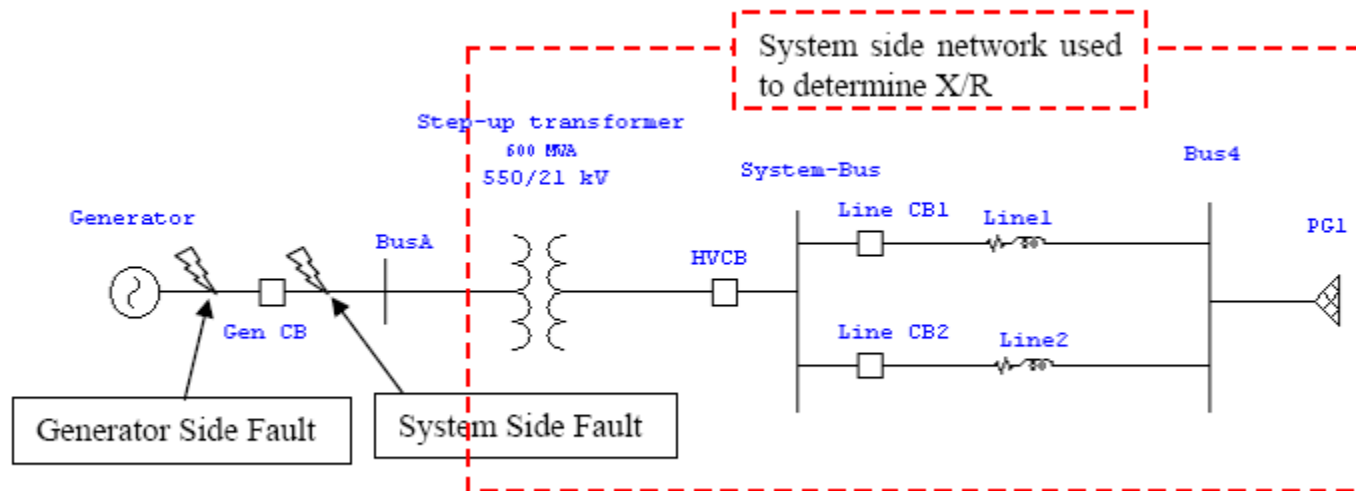
Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

- ❑ Interruptores asociados a generadores síncronos (IEEE C37.013 1997)



Análisis de Cortocircuito según ANSI/IEEE

- ❑ Interruptores asociados a generadores síncronos (IEEE C37.013 1997)



Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info **Standard** AF Method AF FCT AF Data Adjustment Alert

Standard

☐ IEC
☒ ANSI

Prefault Voltage

☐ Fixed
☒ Vmag X Nominal kV (from Bus Editor)

HV CB Interrupting Capability

Adjust Based on Bus

☐ Nominal kV
☒ Nominal kV & V_f

Zero Sequence Mdl

☐ Include Branch Y & Static Load

Machine X/R

☐ Fixed
☒ Variable

LV CB Interrupting Capability

Evaluate Based on Rated Max. kV Limit

☒ C37.13 / UL 489
☐ User-Defined

Protective Device Duty

☒ Based on Total Bus Fault Current
☐ Based on Max Through Fault Current

☒ C37.010 - 1999
☐ C37.010 - 1979 and Older

MF for HV CB & Bus Momentary Duty

☒ Based on Calculated X/R
☐ Set to 1.6 & 2.6 (RMS & Peak) as Min.
☐ Set to 1.6 & 2.6 (RMS & Peak)

MF for LV CB (Molded & Insulated) Duty

☐ Based on Peak Current
☐ Based on Asymmetrical Current
☒ Higher MF (Peak or Asymmetrical)

< FaultBus4 >

Help OK Cancel

Norma

Selección de la tensión de prefalla

Capacidad de interrupción HVCB

Capacidad de interrupción LVCB

Factor de multiplicación de HVCB

Factor de multiplicación de LVCB

Capacitancia de secuencia cero

Resistencia de armadura de generadores

Exigencia de servicio

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard **AF Method** AF FCT AF Data Adjustment Alert

Method

☐ NFPA 70E 2009 ☒ IEEE 1584 Arc Current Variation for LV (<1kV) 15 %

Bus Fault Current

☐ User-Defined (Bus Editor) ☒ Symm. 1/2 Cycle

☒ Calculate ☒ 3-Phase System ☐ Symm. 1.5 to 4 Cycle

☐ 1-Phase System ☐ Fault Current Decay

☒ Update Fault Current to Bus AF Page

Motor Contributions

☒ Hazard Cat for LV Equipment

Voltage <= 208 Xfmr < 125 kVA

Cat 0 ☒ Ibf <= 5 kA 6.9 %Z

Cat 1 ☒ Ibf <= 10 kA 3.5 %Z

≤ FaultBus4 ≥ Help OK Cancel

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method **AF FCT** AF Data Adjustment Alert

Fault Clearing Time (FCT)

☒ Auto Select Source PD - FCT from TCC

☐ User-Defined Source PD (Bus Editor)

☐ Limit Maximum FCT

☐ User-Defined FCT

☒ Update FCT to Bus AF Page

Main Protective Device Isolation

☒ Main Protective Device is not Isolated

☐ Individual (Bus Editor)

☒ Typical IEEE 1584

☒ Global ☐ User-Defined

Current Limiting Devices

☒ Determine CLF operation based on Peak Let-Through Curves

☐ For Class L & RK1, use IEEE 1584 Equations (if applicable)

☐ Use bottom of CLF TCC (if peak let-through not available)

FaultBus4

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method AF FCT **AF Data** Adjustment Alert

Gaps, X-factor, Working Distance

☒ Individual (Bus Editor)

☐ Global (Arc Flash Analysis Data)

Edit

PPE Requirements

☒ NFPA 70E 2000

☐ NFPA 70E 2004

☐ NFPA 70E 2009

☐ User-Defined/AF Analysis

Edit/Approve PPE

System Grounding

☒ One-Line Diagram Connection

☐ User-Defined (Bus Editor)

☒ Update Grounding to Bus AF Page

Flash Protection Boundary

☒ 1.2 cal/cm²

☐ User-Defined EB

Shock Hazard Analysis

Shock Protection Boundaries

☒ Individual (Bus Editor)

☐ Global

Global Voltage-Rated Glove Class

☒ ASTM D 120-02a (2006)

☐ User-Defined

Edit

≤ FaultBus4 ≥

Help OK Cancel

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method AF FCT AF Data **Adjustment** Alert

☐ Apply Pos. Tolerance and Max. Temp. for ANSI Min. Short-Circuit & Arc Flash

Impedance Tolerance

☒ Transformer

☒ Individual

☐ Global

☒ Reactor

☒ Individual

☐ Global

☒ Overload Heater

☒ Individual

☐ Global

Length Tolerance

☒ Cable Length

☒ Individual

☐ Global

☒ Transmission Line Length

☒ Individual

☐ Global

Resistance Temperature Correction

☒ Cable

☒ Individual Min. Temp.

☐ Global

☒ Transmission Line

☒ Individual Min. Temp.

☐ Global

Fault Zf

☒ Include Fault Impedance Zf

R ☒ Ohm

X ☐ %

< FaultBus4 >

Help OK Cancel

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method AF FCT AF Data Adjustment **Alert**

	Critical	Marginal
Alert		
Bus Bracing	100 %	95 %
Protective Device Capability	100 %	95 %

☒ Marginal

Auto Display

 FaultBus4  Help OK Cancel

Barra de Herramientas ANSI/IEEE

ANSI
IEEE


duty

3-Phase Faults – Device Duty


duty

Panel/UPS/ 1-Ph System Device Duty


Max

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults – $\frac{1}{2}$ Cycle


4 ~

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults – 1.5-4 Cycle


Min

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults – 30 Cycle

3-Phase Faults - Device Duty

Click on this button to perform a 3-phase fault study per ANSI C37 Standard. This study calculates momentary symmetrical and asymmetrical rms, momentary asymmetrical crest, interrupting symmetrical rms, and interrupting adjusted symmetrical rms short circuit currents at faulted buses. ETAP checks the protective device rated close and latching, and adjusted interrupting capacities against the fault currents, and flags inadequate devices.

Generators and motors are modeled by their positive sequence subtransient reactance.

Panel/UPS/ 1-Ph System Device Duty

Click on this button to perform a 1-phase device duty short circuit fault per ANSI Standards. This study calculates short circuit currents in the $\frac{1}{2}$ cycle network to evaluate Phase A, B, C, AB, BC, and CA using protective device capabilities in single phase systems.

LG, LL, LLG, & 3-Phase Faults - $\frac{1}{2}$ Cycle

Click on this button to perform line-to-ground, line-to-line, line-to-line-to-ground, and 3-phase fault studies per ANSI Standards. This study calculates short circuit currents in their rms values at $\frac{1}{2}$ cycle at faulted buses.

Generators and motors are modeled by their positive, negative, and zero sequence subtransient reactance. In all the unbalanced fault calculations ($\frac{1}{2}$ cycle, 1.5-4 cycle and 30 cycle), it is assumed that the negative sequence impedance of a machine is equal to its positive sequence impedance. Generator, motor, and transformer grounding types and winding connections are taken into consideration when constructing system positive, negative, and zero sequence networks.

Barra de Herramientas ANSI/IEEE

ANSI
IEEE


duty

3-Phase Faults – Device Duty


duty

Panel/UPS/ 1-Ph System Device Duty


Max

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults – ½ Cycle


4 ~

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults – 1.5-4 Cycle


Min

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults – 30 Cycle

LG, LL, LLG, & 3-Phase Faults - 1.5 to 4 Cycle

Click on this button to perform 3-phase, line-to-ground, line-to-line, line-to-line-to-ground, and 3-phase fault studies per ANSI Standards. This study calculates short circuit currents in their rms values between 1.5 to 4 cycles at faulted buses.

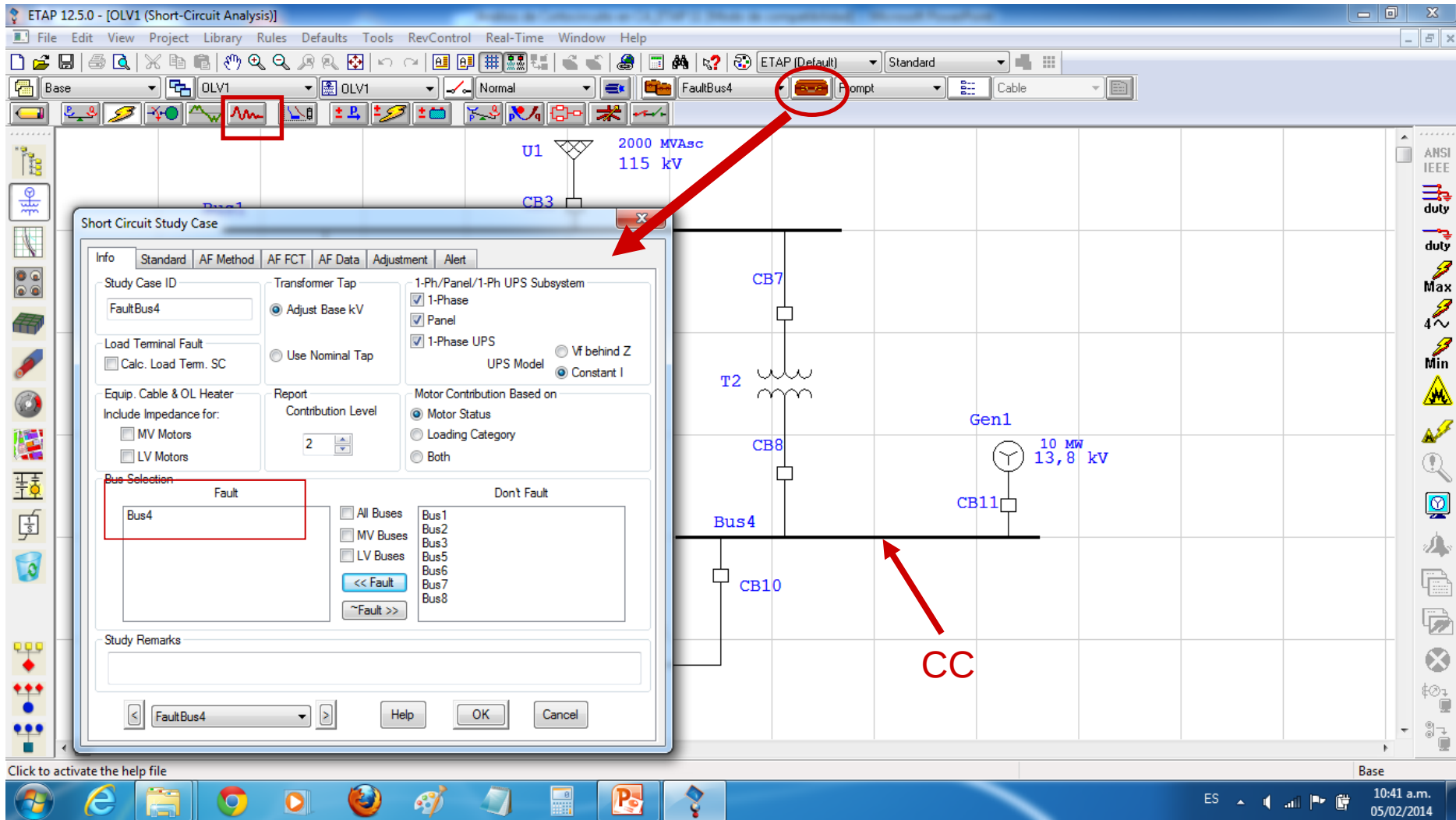
Generators are modeled by their positive, negative, and zero sequence subtransient reactance, and motors are modeled by their positive, negative, and zero sequence transient reactance. Generator, motor, transformer grounding types, and winding connections are taken into considerations when constructing system positive, negative, and zero sequential networks.

LG, LL, LLG, & 3-Phase Faults - 30 Cycle

Click on this button to perform 3-phase, line-to-ground, line-to-line, line-to-line-to-ground, and 3-phase fault studies per ANSI Standards. This study calculates short circuit currents in their rms values at 30 cycles at faulted buses.

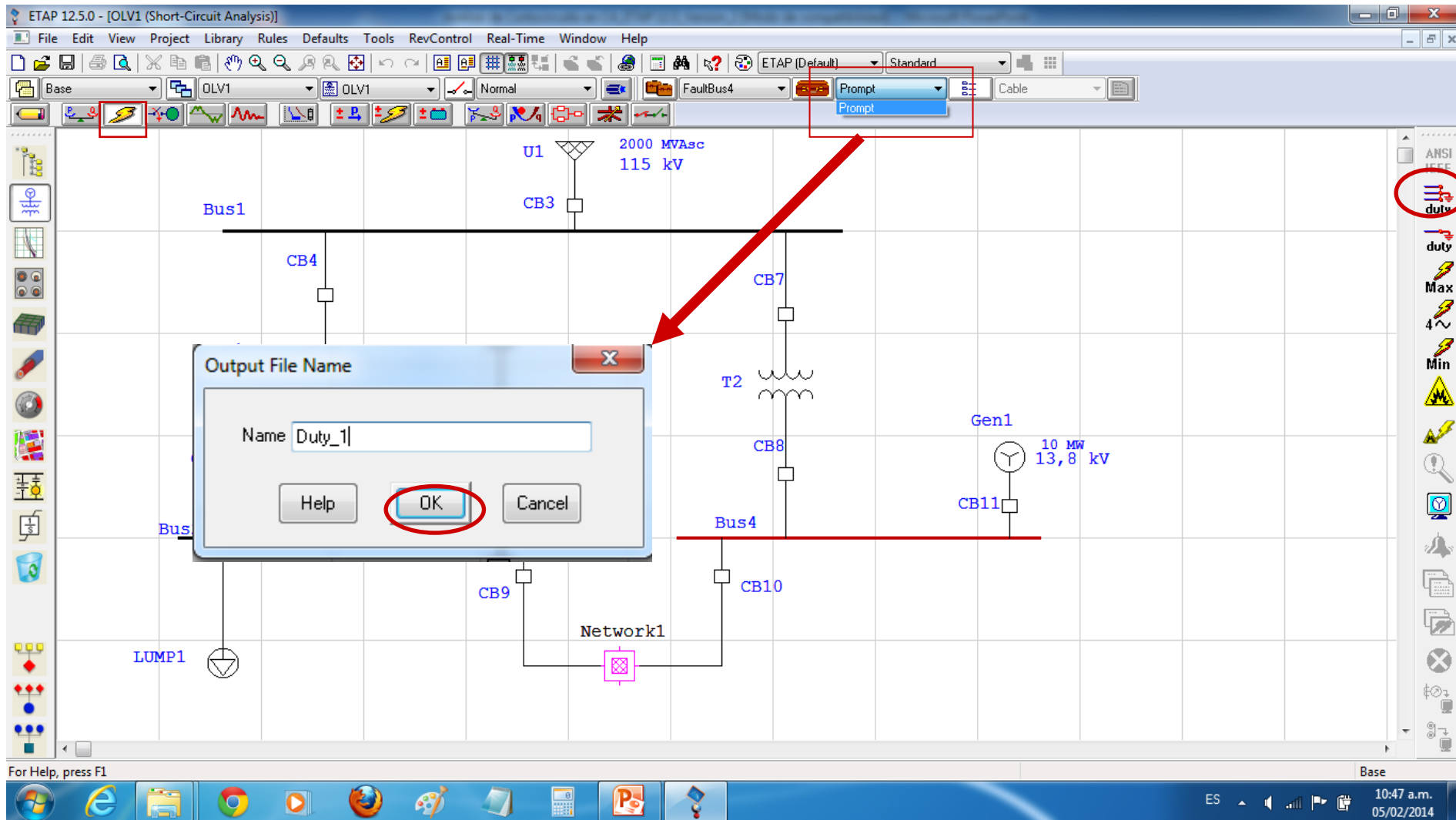


Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5

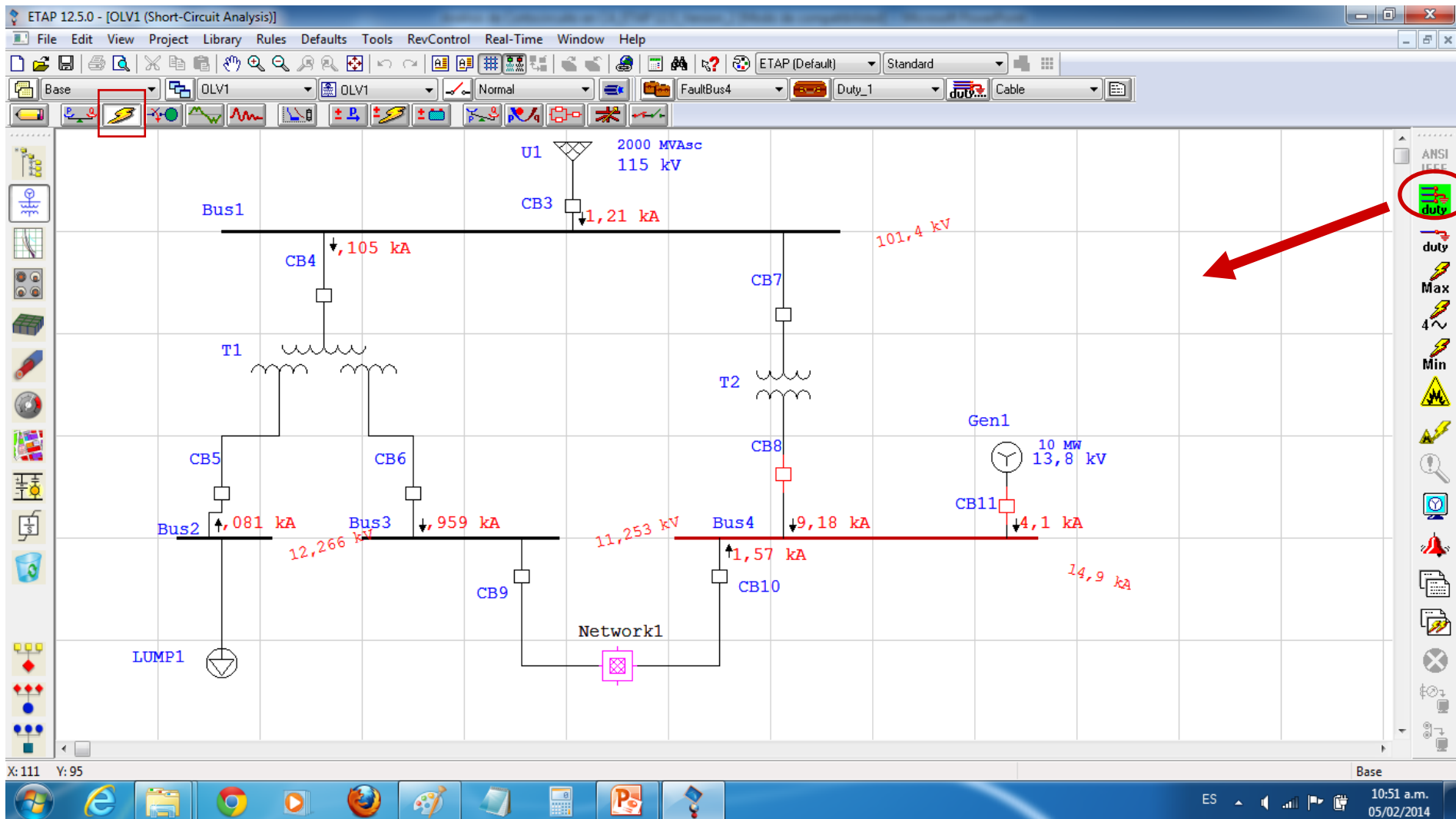


The screenshot displays the ETAP 12.5.0 software interface for a Short-Circuit Analysis. The main window shows a power system diagram with components including a 2000 MVA_{sc} / 115 kV source (U1), a transformer (T2), and a generator (Gen1, 10 MW, 13.8 kV). Buses are labeled Bus1 through Bus8, and circuit breakers are labeled CB3, CB7, CB8, CB10, and CB11. A fault location is marked with 'CC' (Cortocircuito) on a busbar. The 'Short Circuit Study Case' dialog box is open, showing the 'Info' tab. The 'Study Case ID' is 'FaultBus4'. The 'Load Terminal Fault' section has 'Calc. Load Term. SC' checked. The 'Equip. Cable & OL Heater' section has 'Include Impedance for:' checked for 'MV Motors' and 'LV Motors'. The 'Report' section has 'Contribution Level' set to 2. The 'Bus-Selection' section shows 'Bus4' selected under 'Fault'. The 'Motor Contribution Based on' section has 'Motor Status' selected. The 'Study Remarks' field is empty. The 'Help' button is visible at the bottom of the dialog box. A red arrow points from the 'Prompt' button in the top toolbar to the dialog box. Another red arrow points from the 'CC' label to the fault location on the diagram.

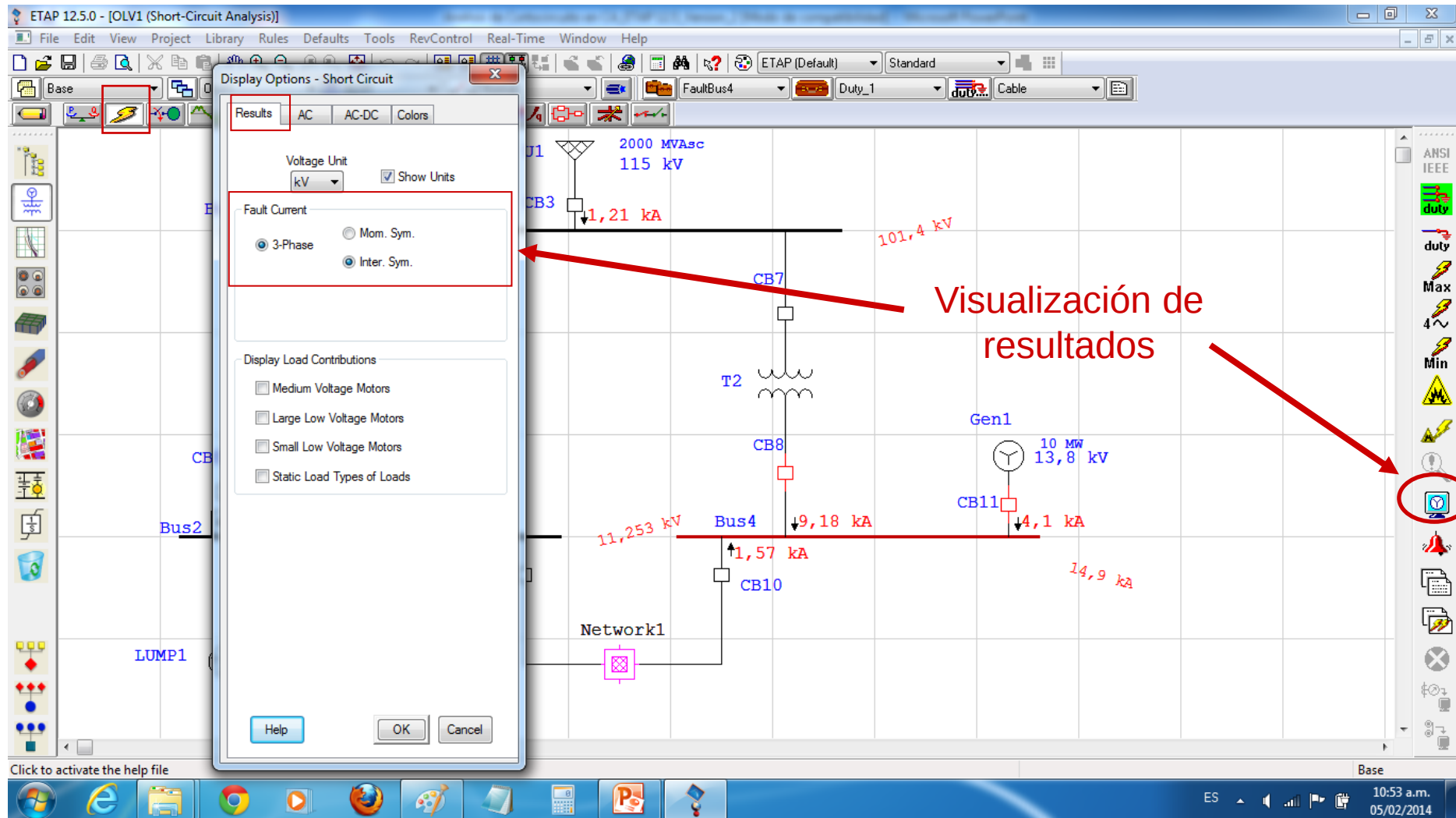
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



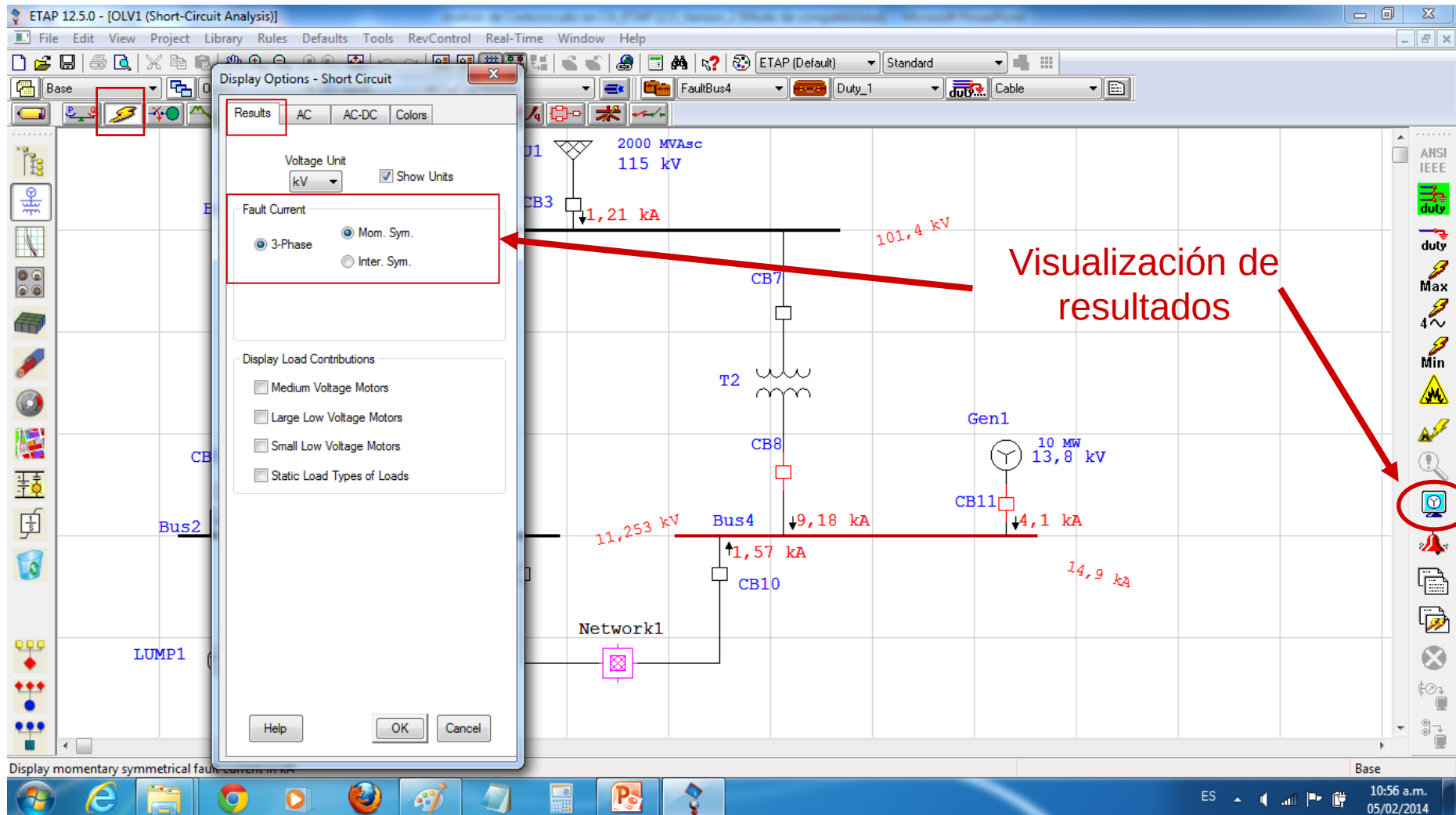
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



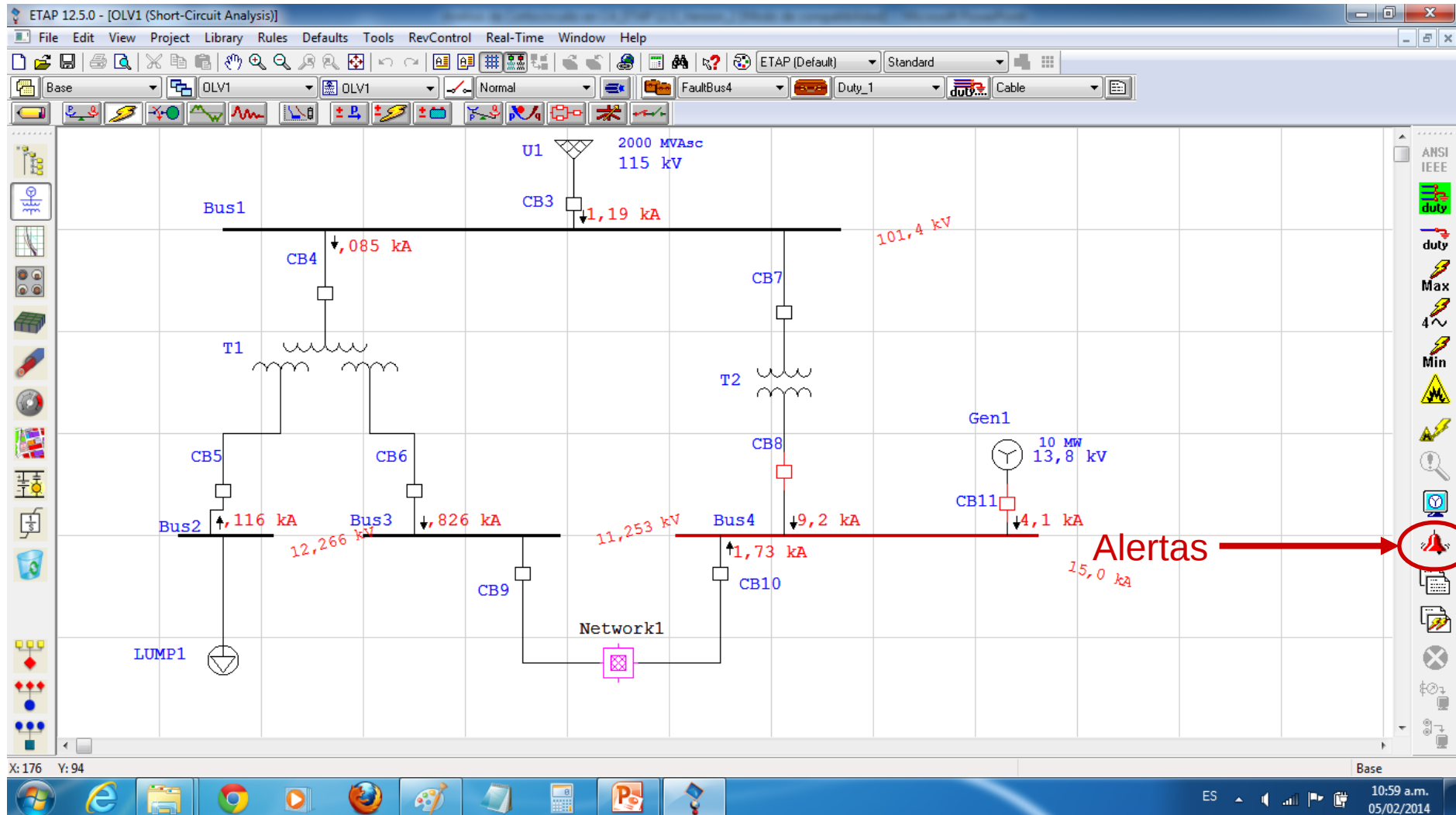
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5

Short Circuit Analysis Alert View - Output Report: Duty_1

Study Case: FaultBus4 Data Revision: Base
Configuration: Normal Date: 02-05-2014

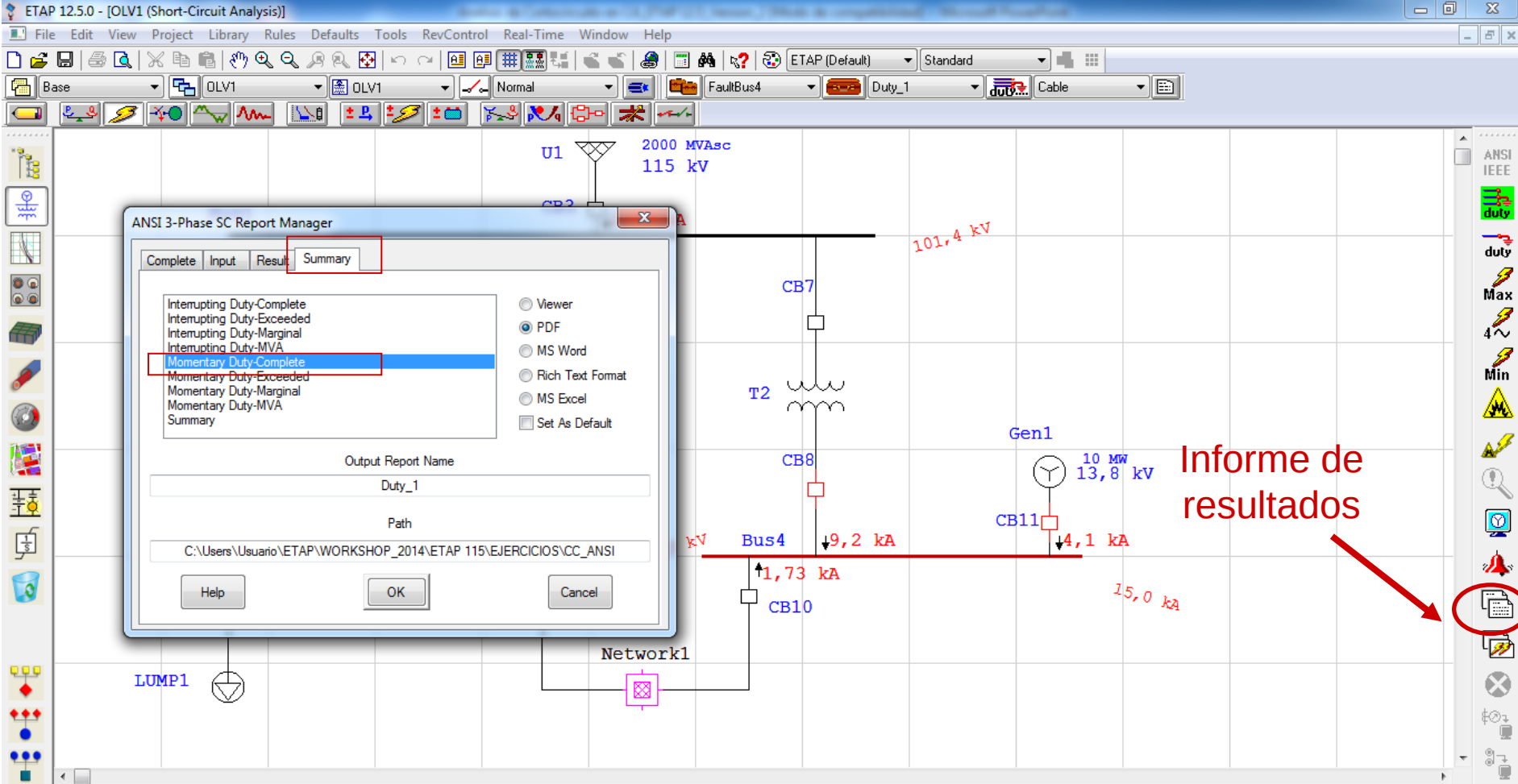
☐ Zone Filter ☐ Area Filter ☐ Region Filter

1 1 1

Critical					
Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating
CB11	HV CB	Interrupting	12 kA	14,851	123,8
CB8	HV CB	Interrupting	12 kA	15,601	130

Marginal					
Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



The screenshot displays the ETAP 12.5.0 interface for a Short-Circuit Analysis (OLV1). The main workspace shows a power system diagram with components including a 2000 MVA, 115 kV source (U1), a transformer (T2), a generator (Gen1, 10 MW, 13.8 kV), and various buses (Bus4) and breakers (CB7, CB8, CB10, CB11). Fault levels are indicated in red text: 101.4 kV, 9.2 kA, 4.1 kA, 15.0 kA, and 1.73 kA.

The **ANSI 3-Phase SC Report Manager** dialog box is open, showing the **Summary** tab. The list of report types includes:

- Interrupting Duty-Complete
- Interrupting Duty-Exceeded
- Interrupting Duty-Marginal
- Interrupting Duty-MVA
- Momentary Duty-Complete** (highlighted with a red box)
- Momentary Duty-Exceeded
- Momentary Duty-Marginal
- Momentary Duty-MVA
- Summary

The **Output Report Name** is set to **Duty_1**, and the **Path** is **C:\Users\Usuario\ETAP\WORKSHOP_2014\ETAP 115\EJERCICIOS\CC_ANSI**. The **Viewer** radio button is selected. The **Set As Default** checkbox is also checked.

A red arrow points from the text **Informe de resultados** to the report icon in the right-hand toolbar.

At the bottom of the dialog box, there is a button labeled **Select to display device setting report for all devices in TCC**.

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Cortocircuito ANSI
 Location: ARGENTINA
 Contract: Curso de Capacitacion ETAP
 Engineer: Diego Moitre
 Filename: Ejercicio 1 CC ANSI

ETAP
 12.5.0D

Study Case: FaultBus4

Page: 1
 Date: 02-05-2014
 SN: RAIENDLRCL
 Revision: Base
 Config.: Normal

Momentary Duty Summary Report

3-Phase Fault Currents: (Prefault Voltage = Bus Nominal Voltage * pu Voltage from Bus Editor.)

Bus		Device		Momentary Duty					Device Capability		
ID	kV	ID	Type	Symm. kA rms	X/R Ratio	M.F.	Asymm. kA rms	Asymm. kA Peak	Symm. kA rms	Asymm. kA rms	Asymm. kA Peak
Bus4	13.800	Bus4	Switchgear	15.031	22.9	1.587	23.859	39.787		37.000	62.440
	13.800	CB8	5 cy Sym CB	15.031	22.9	1.587	23.859	39.787		57.600	97.000
	13.800	CB11	5 cy Sym CB	15.031	22.9	1.587	23.859	39.787		36.800	62.000
	13.800	CB10	5 cy Sym CB	15.031	22.9	1.587	23.859	39.787		36.800	62.000

Method: IEEE - X/R is calculated from separate R & X networks.

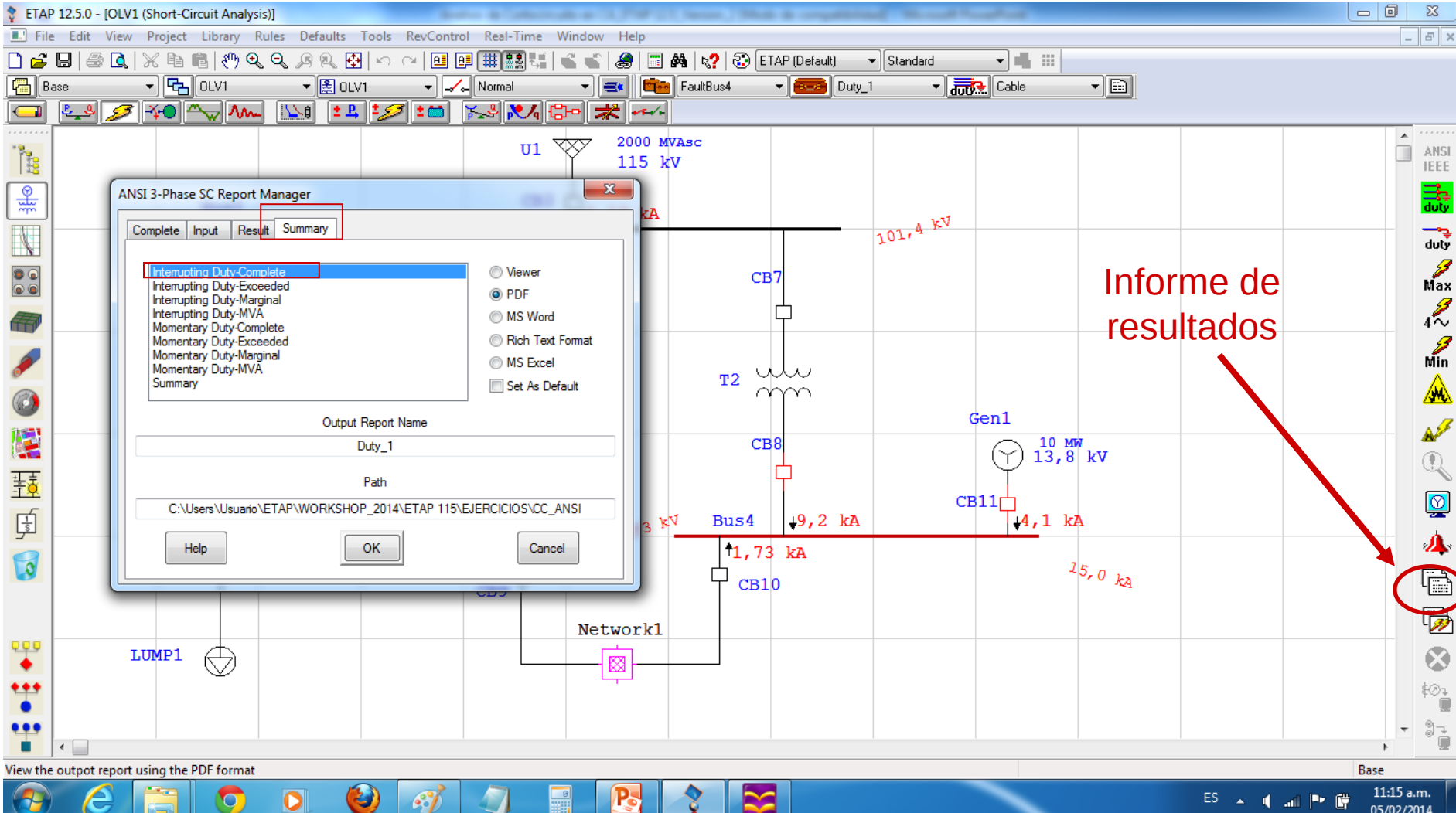
Protective device duty is calculated based on total fault current.

The multiplication factors for high voltage circuit-breaker and high voltage bus momentary duty (asymmetrical and crest values) are calculated based on system X/R.

* Indicates a device with momentary duty exceeding the device capability

Indicates a device with momentary duty exceeding the device marginal limit (95% times the device capability)

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



The screenshot displays the ETAP 12.5.0 interface for a Short-Circuit Analysis. The main window shows a power system diagram with components including a 2000 MVA source (U1), a 115 kV bus, a 101.4 kV line, a 13.8 kV generator (Gen1), and various circuit breakers (CB7, CB8, CB10, CB11). Fault currents are indicated at different points, such as 9.2 kA at Bus4 and 15.0 kA at CB11.

An "ANSI 3-Phase SC Report Manager" dialog box is open, showing the "Summary" tab. The "Interrupting Duty-Complete" report is selected. The output report name is "Duty_1" and the path is "C:\Users\Usuario\ETAP\WORKSHOP_2014\ETAP 115\EJERCICIOS\CC_ANSI". The "PDF" output format is selected.

A red arrow points from the text "Informe de resultados" to the report icon in the right-hand toolbar, which is circled in red.

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Cortocircuito ANSI
 Location: ARGENTINA
 Contract: Curso de Capacitacion ETAP
 Engineer: Diego Moitre
 Filename: Ejercicio 1 CC ANSI

ETAP
 12.5.0D

Study Case: FaultBus4

Page: 1
 Date: 02-05-2014
 SN: RAIENDLRCL
 Revision: Base
 Config.: Normal

Interrupting Duty Summary Report

3-Phase Fault Currents: (Prefault Voltage = Bus Nominal Voltage * pu Voltage from Bus Editor.)

Bus		Device		Interrupting Duty					Device Capability			
ID	kV	ID	Type	CPT (Cy)	Symm. kA rms	X/R Ratio	M.F.	Adj. Sym. kA rms	kV	Test PF	Rated Int.	Adjusted Int.
Bus4	13.800	CB8	5 cy Sym CB	3.0	14.851	23.1	1.050	15.601	15.000		12.000	12.000 *
		CB11	**5 cy Sym CB	3.0	14.851	23.1	1.000	14.851	15.000		12.000	12.000 *
		CB10	5 cy Sym CB	3.0	14.851	23.1	1.050	15.601	15.000		18.000	19.565

Method: IEEE - X/R is calculated from separate R & X networks.

HV CB interrupting capability is adjusted based on bus nominal voltage and prefault voltage

Short-circuit multiplying factor for LV Molded Case and Insulated Case Circuit Breakers is the higher value based on peak current or asymmetrical current.

Generator protective device duty is calculated based on maximum through fault current. Other protective device duty is calculated based on total fault current.

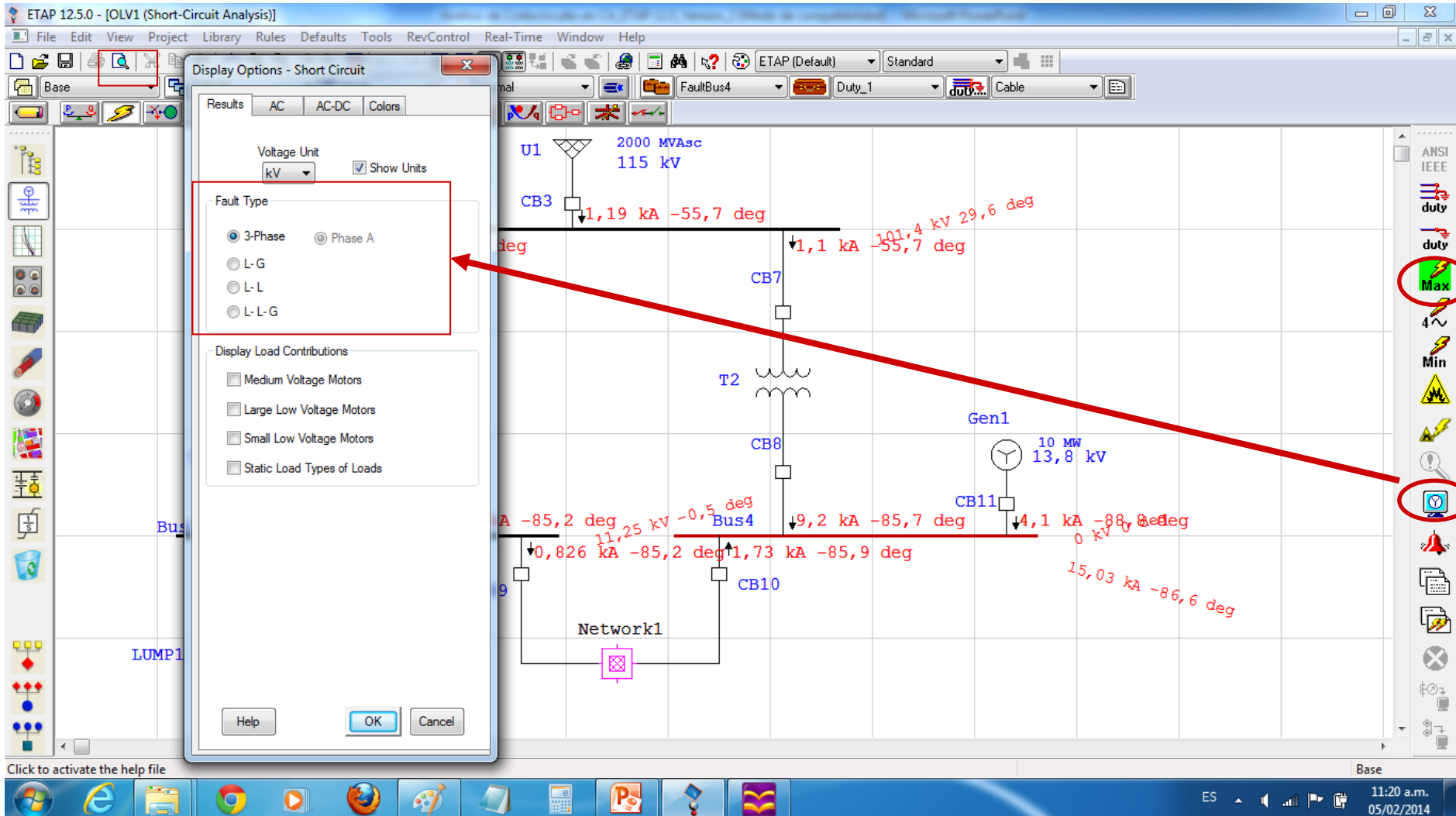
* Indicates a device with interrupting duty exceeding the device capability

** Indicates that the circuit breaker has been flagged as a generator circuit breaker. However, ETAP could not detect a single path, without a transformer, to the specified generator. Therefore, this circuit breaker is treated as a regular circuit breaker in short-circuit calculations.

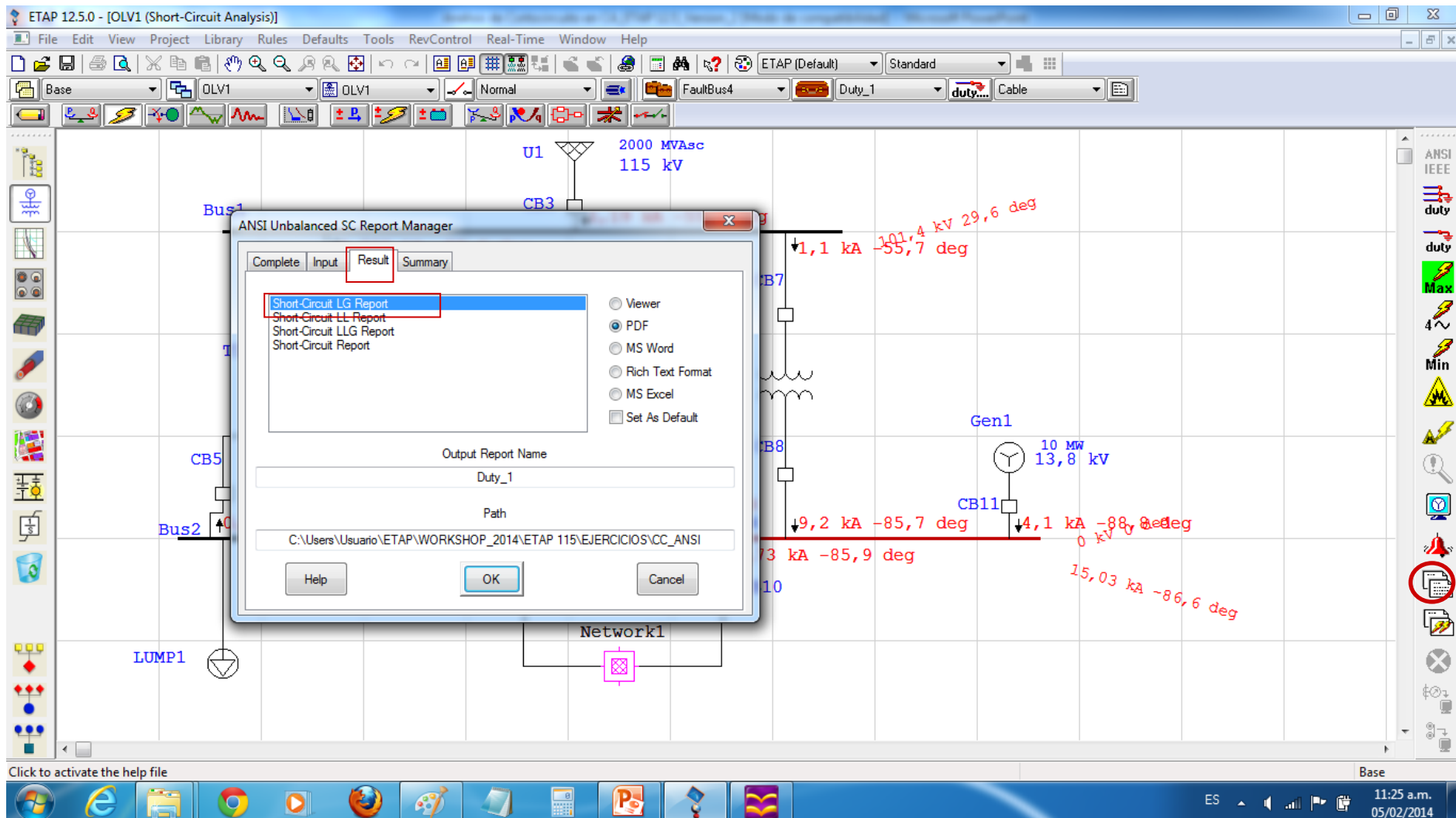
+ The prefault voltage exceeds the rated maximum kV limit of the circuit breaker - The rated interrupting kA must be derated.

Indicates a device with interrupting duty exceeding the device marginal limit (95% times the device capability)

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Cortocircuito ANSI
 Location: ARGENTINA
 Contract: Curso de Capacitacion ETAP
 Engineer: Diego Moitre
 Filename: Ejercicio 1 CC ANSI

ETAP
12.5.0D

Study Case: FaultBus4

Page: 1
 Date: 02-05-2014
 SN: RAIENDLRCL
 Revision: Base
 Config.: Normal

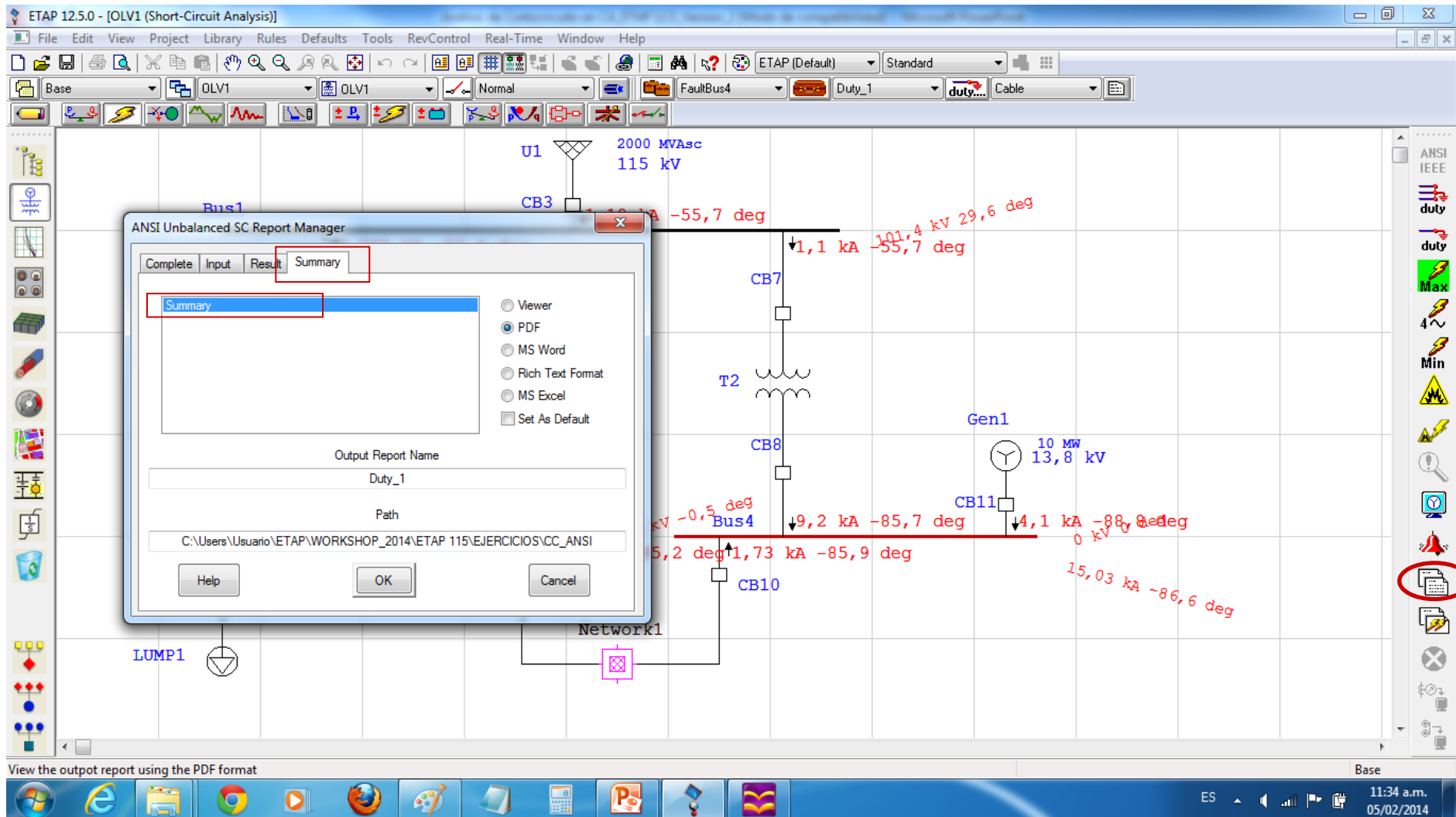
SHORT- CIRCUIT REPORT

Fault at bus: **Bus4**

Prefault voltage = 13.800 kV
 = 100.00 % of nominal bus kV (13.800 kV)
 = 100.00 % of base kV (13.800 kV)

Contribution		Line-To-Ground Fault														
		% Voltage at From Bus						Current at From Bus (kA)								
		Va		Vb		Vc		Ia		Ib		Ic		Sequence Current (kA)		
		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	I1	I2	I0
From Bus ID	To Bus ID															
Bus4	Total	0.00	0.0	130.78	-137.9	129.36	138.6	7.962	-87.7	0.000	0.0	0.000	0.0	2.654	2.654	2.654
Bus1	Bus4	96.81	31.0	100.00	-90.0	96.95	148.9	3.251	-86.5	1.624	92.4	1.624	92.4	1.625	1.625	0.022
Bus6	Bus4	89.82	-34.3	89.89	-145.7	101.27	90.0	0.612	-87.1	0.306	92.9	0.306	92.9	0.306	0.306	0.000
Gen1	Bus4	100.00	0.0	100.00	-120.0	100.00	120.0	4.101	-88.8	1.930	-87.5	1.930	-87.5	0.724	0.724	2.653

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Cortocircuito ANSI
Location: ARGENTINA
Contract: Curso de Capacitacion ETAP
Engineer: Diego Moitre
Filename: Ejercicio 1 CC ANSI

ETAP
12.5.0D

Study Case: FaultBus4

Page: 1
Date: 02-05-2014
SN: RAIENDLRCL
Revision: Base
Config.: Normal

Short-Circuit Summary Report

1/2 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = Bus Nominal Voltage * pu Voltage from Bus Editor

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.
Bus4	13.80	0.902	-15.004	15.031	0.318	-7.955	7.962	12.994	0.781	13.018	12.906	3.487	13.368

All fault currents are symmetrical momentary (1/2 Cycle network) values in rms kA

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents

Análisis de Cortocircuito según IEC

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)

Standard	Pub. Year	Title
IEC 62271-100	2003	High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: High-voltage alternating-current circuit breakers
IEC 62271-200	2003	High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV
IEC 62271-203	2003	High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV
IEC 60282-2	1997	High-voltage fuses – Part2: Expulsion fuses
IEC 61363-1	1998	Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units – Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.
IEC 60909-0	2001	Short-Circuit Currents in Three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of Currents (including 2002 corrigendum1)
IEC 60909-1	2002	Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC-60909-0
IEC 60909-2	1992	Electrical equipment - Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 909 (1988)
IEC 60909-4	2000	Short-circuit currents in three-phase a.c. systems Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents
IEC 60947-1	2004	Low voltage switchgear and controlgear, Part 1: General rules
IEC 60947-2	2003	Low voltage switchgear and controlgear, Part 2: Circuit breakers

Análisis de Cortocircuito según IEC



INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)

La norma IEC 60909 y sus estándares asociados clasifican a las corrientes de CC según su magnitud (máxima o mínima) y la distancia de la falla al generador (lejana o cercana). Las corrientes de CC máximas determinan las capacidades del equipamiento, mientras que la mínimas fijan los valores de ajuste de los dispositivos de protección. La clasificación de la falla en cercana o lejana al generador determina si se modela o no el decaimiento de la componente alterna, respectivamente. El estándar es aplicable a sistemas eléctricos de baja tensión y de alta tensión hasta 550 kV y de frecuencia nominal 50 Hz o de 60 Hz.

La norma IEC 61363-1 calcula las corrientes de CC en función del tiempo y calcula su valor instantáneo usando las reactancias subtransitoria y transitoria, así como las constantes de tiempo subtransitoria, transitoria y de corriente continua.

Análisis de Cortocircuito según IEC



❑ Descripción General de la metodología de cálculo

- ✓ Se reemplazan todas las fuentes de tensión externas y las fem internas de las máquinas por una fuente de tensión equivalente en la localización de la falla. Se aplica un factor de tensión c para ajustar el valor de la fuente de tensión equivalente para calcular las corrientes mínimas y máximas de CC.
- ✓ Todas las máquinas se representan por sus impedancias internas.
- ✓ Las impedancias del sistema se suponen equilibradas.
- ✓ Se emplea el método de Componentes Simétricas.
- ✓ Se considera la distancia eléctrica desde la falla a los generadores síncronos.
- ✓ Para fallas alejadas del generador se supone que la corriente de CC de régimen permanente es igual a la corriente de CC inicial simétrica.
- ✓ En el cálculo de fallas desequilibradas se consideran las capacitancias de secuencia cero de líneas de transmisión, cables y admitancias paralelo.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Descripción General de la metodología de cálculo

- ✓ Solo las componentes de corriente continua decrecen, excepto en el caso de fallas cercanas al generador donde se considera el decaimiento de ambas componentes (continua y alterna).
- ✓ La relación X/R determina la tasa de decrecimiento de las componentes continua y alterna de las corrientes de cortocircuito empleándose diferentes valores para generadores y motores cercanos a la falla.

❑ Definiciones

- ✓ **Corriente de CC inicial simétrica (I''_k):** es el valor eficaz de la componente simétrica de la corriente alterna de una corriente de CC presunta si la impedancia tuviera un valor nulo.
- ✓ **Corriente de CC pico (I_p):** es el valor máximo instantáneo de la corriente de CC presunta.
- ✓ **Corriente de CC de ruptura simétrica (I_b):** es el valor eficaz de la componente simétrica de la corriente alterna de una corriente de CC presunta en el instante de separación del contacto del primer polo del dispositivo de corte.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Definiciones

- ✓ **Corriente de CC de régimen permanente (I_k):** es el valor eficaz de la corriente alterna de una corriente de CC presunta que permanece después del decaimiento del transitorio.
- ✓ **Tensión Subtransitoria de la maquina síncrona (E''):** es el valor eficaz de la fem simétrica de la maquina síncrona la cual esta activa detrás de la reactancia subtransitoria en el momento del CC.
- ✓ **Cortocircuito alejado del generador:** es la condición de CC durante la cual la magnitud de la componente simétrica de corriente alterna de la corriente presunta de CC permanece esencialmente constante.
- ✓ **Cortocircuito cercano al generador:** es la condición de CC en la cual al menos una máquina síncrona contribuye a la corriente presunta inicial de CC con más del doble de su corriente nominal, o la condición de CC en la cual motores asíncronos y síncronos contribuyen con más del 5% de la corriente de CC inicial simétrica sin motores.

Análisis de Cortocircuito según IEC

□ Definiciones

✓ **Reactancia Subtransitoria de la maquina síncrona (X_d'')**: es la reactancia (saturada) en el momento del CC. La impedancia de un motor asíncrono se calcula por

$$Z_K = K_G(R + X_d'')$$

$$K_G = \frac{kV_n C_{max}}{kV_r(1 + X_d'' \sin \phi_r)}$$

donde kV_n y kV_r son las tensiones nominales de barras y del motor, respectivamente. C_{max} se determina sobre la base de la tensión nominal del motor, X_d'' es la reactancia subtransitoria de la maquina (p.u) y ϕ_r es el ángulo del factor de potencia nominal del motor síncrono.

Análisis de Cortocircuito según IEC

□ Definiciones

- ✓ **Tiempo de retardo mínimo del interruptor (T_{min}):** es el mínimo tiempo entre el comienzo de la corriente de CC y la separación del primer contacto de un polo del dispositivo.
- ✓ **Factor de Tensión c :** es el factor usado para ajustar el valor de la fuente de tensión equivalente para calcular las corrientes mínimas y máximas de CC.

Nominal Voltage Un	Voltage Factor c	
	For Maximum Short circuit current Calculation	For Minimum Short circuit current Calculation
	C_{max}	C_{min}
Others < 1001 V	1.1	0.95
Medium voltage: > 1 kV to 35 kV	1.10	1.00
High voltage: > 35 kV to 230 kV	1.10	1.00

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Métodos de cálculo

✓ Corriente de CC inicial simétrica (I''_k):

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$

donde Z_k es la impedancia equivalente de la red vista desde la falla.

✓ Corriente de CC pico (i_p):

$$i_p = \sqrt{2}kI''_k$$

donde k es depende de la relación R/X de la red vista desde la falla.

Análisis de Cortocircuito según IEC

La norma IEC recomienda tres métodos:

❑ Método A

$$I_p = \sqrt{2} I_k'' \underbrace{\left[1,02 + 0,98 \times \exp\left(-\frac{R}{X} 3\right) \right]}_k$$

donde R/X es el menor valor existente de todas las ramas de la red

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Método B

o Baja Tensión

$$I_p = 1,08 \times \sqrt{2} I_k''$$

o Media Tensión

$$I_p = 1,15 \times \sqrt{2} I_k'' \underbrace{\left[1,02 + 0,98 \times \exp\left(-\frac{R}{X} 3\right) \right]}_k$$

o Alta Tensión

$$I_p = 2 \times \sqrt{2} I_k''$$

donde R/X corresponde a la impedancia de la red vista desde la falla.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Método C

$$I_p = \sqrt{2} I_k'' \underbrace{\left[1,02 + 0,98 \times \exp\left(-\frac{R}{X} 3\right) \right]}_k$$

R /X se establece ahora por: $\frac{R}{X} = \frac{R_C}{X_C} \frac{20}{50}$

donde R_C y X_C corresponden a la impedancia de la red vista desde la falla definida para una frecuencia estacionaria en la red de 20 Hz, si la frecuencia nominal de la red es 50 Hz. (Para una frecuencia nominal de 60 Hz la frecuencia de calculo es 24 Hz)

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Métodos de cálculo

✓ Corriente de CC de ruptura simétrica (I_b):

Para un CC alejado del generador:

$$I_b = I''_k$$

Para un CC cercano al generador:

$$I_b = \begin{cases} \mu I''_k & \text{para maquinas síncronas} \\ \mu q I''_k & \text{para maquinas asíncronas} \end{cases}$$

donde μ y q son factores que tienen en cuenta el decaimiento de la componente de corriente alterna.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Métodos de cálculo

✓ Componente de continua de la corriente de CC:

$$I_{dc} = I_k'' \sqrt{2} \exp\left(-\frac{2\pi f t_{\min}}{X/R}\right)$$

donde f es la frecuencia del sistema, $t_{\min}$ es el tiempo mínimo de retardo del dispositivo de protección y X/R corresponde a la impedancia de la red vista desde la falla.

✓ Corriente de CC de ruptura asimétrica :

$$I_i = \sqrt{(\text{valor_eficaz_componente_alterna})^2 + (\text{valor_eficaz_componente_continua})^2}$$

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Métodos de cálculo

✓ Corriente de CC de régimen permanente:

La corriente de CC de régimen permanente I_k es la combinación de las contribuciones de los aportes de los generadores asíncronos:

$$I_{k \max} = \lambda_{\max} I_{rG}$$
$$I_{k \min} = \lambda_{\min} I_{rG}$$

donde I_{rG} es la corriente nominal del generador y λ es función de la tensión de excitación del generador, así como de otros parámetros del generador.

Análisis de Cortocircuito según IEC

- ❑ Comparación de las capacidades nominales con las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección

<u>Device Type</u>	<u>Device Capability</u>	<u>Short circuit current Duty</u>
MV CB	Making	i_p
	AC Breaking	$I_{b,symm}$
	$I_{b,asymm} *$	$I_{b, asymm}$
	$I_{dc} *$	
	I_{thr}	I_{th}
LV CB	Making	I_p
	Breaking	$I_{b,symm}$
	$I_{b,asymm} *$	$I_{b,asymm}$
	I_{thr}	I_{th}
Fuse	Breaking	$I_{b,symm}$
	$I_{b,asymm} *$	$I_{b,asymm}$

Comparison of Device Rating and Short-Current Duty

*Device capability calculated by ETAP.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Comparación de las capacidades nominales con las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección

✓ Interruptores de Media Tensión:

$$I_{b,Asymm} = I_{b,Symm} \sqrt{1 + 2e^{(-2\frac{t_{min}}{\tau})}}$$

$$I_{dc} = I_{b,symm} (\sqrt{2}) e^{\frac{-t_{min}}{\tau}}$$

Where t_{min} is the minimum delay time and $I_{b,symm}$ is the AC breaking current provided by the user. Following IEC Standard 62271-100, τ is equal to 45 milliseconds.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Comparación de las capacidades nominales con las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección

✓ Interruptores de Baja Tensión:

$$I_{b,asym} = I_{b,sym} \sqrt{1 + 2 * \exp\left(-\frac{4\pi f t_{min}}{X / R}\right)}$$

Where f is the system frequency, t_{min} is the minimum delay time, and $I_{b,sym}$ is the breaking current provided by the user. X/R is calculated based on a testing PF given in IEC Standard 60947-2, Table 11.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Comparación de las capacidades nominales con las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección

✓ Fusibles:

$$I_{b,asym} = I_{b,sym} \sqrt{1 + 2 * \exp\left(-\frac{4\pi f t_{\min}}{X / R}\right)}$$

Where f is the system frequency, $t_{\min}$ is assumed to be a half cycle, and $I_{b,sym}$ is the breaking current provided by the user. X/R is calculated based on the default testing PF of 15 %.

Análisis de Cortocircuito según IEC

❑ Comparación de las capacidades nominales con las exigencias de servicio (duties) de los distintos dispositivos de protección

✓ Corriente de CC equivalente térmica:

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_K''^2 (m + n) T_K = I_{th}^2 T_K \quad \longrightarrow \quad I_{th} = I_K'' \sqrt{m + n}$$

$$n = \frac{1}{(I_K'' / I_K)^2} \left[1 + \frac{T_d'}{20T_K} \left(1 - e^{-20T_K / T_d'} \right) \left(\frac{I_K''}{I_K} - \frac{I_K'}{I_K} \right)^2 + \frac{T_d'}{2T_K} \left(1 - e^{-20T_K / T_d'} \right) \left(\frac{I_K'}{I_K} - 1 \right)^2 + \right. \\ \left. \frac{T_d'}{5T_K} \left(1 - e^{-10T_K / T_d'} \right) \left(\frac{I_K''}{I_K} - \frac{I_K'}{I_K} \right)^2 + \frac{2T_d'}{T_K} \left(1 - e^{-T_K / T_d'} \right) \left(\frac{I_K'}{I_K} - 1 \right) + \right. \\ \left. \frac{T_d'}{5,5T_K} \left(1 - e^{-11T_K / T_d'} \right) \left(\frac{I_K''}{I_K} - \frac{I_K'}{I_K} \right) \left(\frac{I_K'}{I_K} - 1 \right) \right]$$

$$m = \frac{1}{2fT_K \ln(k-1)} \left[e^{4* fT_K \ln(k-1)} - 1 \right]$$

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

< 1001 V
1001 to 35000 V
> 35000 V

c Factor = 0.95 -- 1.10
c Factor = 1.00 -- 1.10
c Factor = 1.00 -- 1.10

Norma

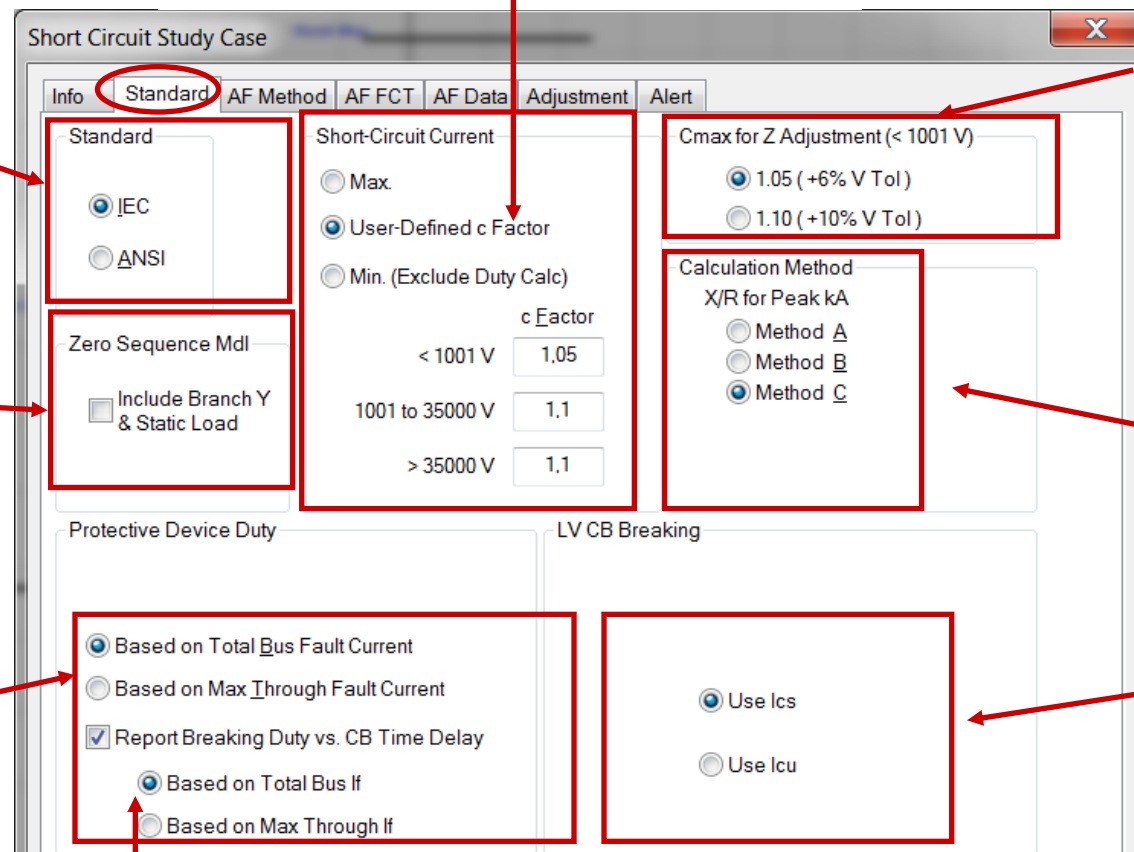
Factor de ajuste de impedancias de generadores y transformadores

Capacitancia de secuencia cero

Método de calculo de la corriente de CC de pico

Exigencia de servicio

Valores nominales de ruptura del LVCB



The breaking duty is not directly associated with any protective device; therefore the total bus fault current and the maximum through fault current options below this check box are independent of the option selected for the “Protective Device Duty”.

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard **AF Method** AF FCT AF Data Adjustment Alert

Method

☐ NFPA 70E 2009 ☒ IEEE 1584 Arc Current Variation for LV (<1kV) 15 %

Bus Fault Current

☐ User-Defined (Bus Editor)
☒ Calculate

☒ Update Fault Current to Bus AF Page

Motor Contributions

☒ Hazard Cat for LV Equipment

FitAllBusMax

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method **AF FCT** AF Data Adjustment Alert

Fault Clearing Time (FCT)

☒ Auto Select Source PD - FCT from TCC

☐ User-Defined Source PD (Bus Editor)

☐ Limit Maximum FCT

☐ User-Defined FCT

☒ Update FCT to Bus AF Page

Main Protective Device Isolation

☒ Main Protective Device is not Isolated

☐ Individual (Bus Editor)

☒ Global

☒ Typical IEEE 1584

☐ User-Defined

Current Limiting Devices

☒ Determine CLF operation based on Peak Let-Through Curves

☐ For Class L & RK1, use IEEE 1584 Equations (if applicable)

☐ Use bottom of CLF TCC (if peak let-through not available)

FltAllBusMax

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method AF FCT **AF Data** Adjustment Alert

Gaps, X-factor, Working Distance

☒ Individual (Bus Editor)

Edit

PPE Requirements

☒ NFPA 70E 2000
☐ NFPA 70E 2004
☐ NFPA 70E 2009
☐ User-Defined/AF Analysis

Edit/Approve PPE

System Grounding

☒ One-Line Diagram Connection
☐ User-Defined (Bus Editor)
☒ Update Grounding to Bus AF Page

Flash Protection Boundary

Shock Hazard Analysis

Shock Protection Boundaries

☒ Individual (Bus Editor)

Global Voltage-Rated Glove Class

☒ ASTM D 120-02a (2006)

Edit

≤ FltAllBusMax ≥

Help OK Cancel

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method AF FCT AF Data **Adjustment** Alert

Impedance Tolerance

☒ Transformer

☒ Individual

☐ Global

☒ Reactor

☒ Individual

☐ Global

☐ Overload Heater

Length Tolerance

☒ Cable Length

☒ Individual

☐ Global

☒ Transmission Line Length

☒ Individual

☐ Global

Resistance Temperature Correction

☒ Cable

☐ Individual Min. Temp.

☒ Global 0 °C

☒ Transmission Line

☐ Individual Min. Temp.

☒ Global 0 °C

Fault Zf

☒ Include Fault Impedance Zf

R 0 ☒ Ohm

X 0 ☐ %

< FitAllBusMax >

Help OK Cancel

Editor de Estudio de CC ETAP®12.5

Short Circuit Study Case

Info Standard AF Method AF FCT AF Data Adjustment **Alert**

	Critical	Marginal
Alert		
Bus Bracing	100 %	95 %
Protective Device Capability	100 %	95 %

☒ Marginal

Auto Display

 FitAllBusMax  Help OK Cancel

Barra de Herramientas IEC

IEC



duty



duty



60909



61363

3-Phase Faults – Device Duty (IEC 909)

Panel/UPS/1-Ph System Device Duty

LG, LL, LLG & 3-Phase Faults (IEC 909)

3-Phase Faults – Transient Study (IEC 363)

3-Phase Faults - Device Duty (IEC 60909)

Click on this button to perform a 3-phase fault study per IEC 60909 Standard. This study calculates initial symmetrical rms, peak, symmetrical and asymmetrical breaking rms, and steady-state rms short circuit currents and their DC offset at faulted buses. ETAP checks the protective device rated making and breaking capacities against the fault currents and flags inadequate devices.

Generators and motors are modeled by their positive sequence subtransient reactance.

Panel/UPS/1-Ph System Device Duty (IEC 60909)

Click on this button to perform a 1-phase device duty short circuit fault per IEC 60909 Standards. This study calculates initial symmetrical (I''_k) currents for evaluation of protective device capabilities in single phase systems.

Barra de Herramientas IEC

IEC



3-Phase Faults – Device Duty (IEC 909)



Panel/UPS/1-Ph System Device Duty



LG, LL, LLG & 3-Phase Faults (IEC 909)



3-Phase Faults – Transient Study (IEC 363)

LG, LL, LLG, & 3-Phase Faults (IEC 60909)

Click on this button to perform line-to-ground, line-to-line, line-to-line-to-ground, and 3-phase fault studies per IEC 60909 Standard. This study calculates initial symmetrical rms, peak and symmetrical breaking rms, and steady-state rms short circuit currents at faulted buses.

Generators are modeled by their positive, negative, and zero sequence reactance, and motors are modeled by their locked-rotor impedance. It is assumed that the negative sequence impedance of a machine is equal to its positive sequence impedance. Generator, motor, and transformer grounding types, and winding connections are taken into consideration when constructing system positive, negative, and zero sequence networks.

Barra de Herramientas IEC

IEC



3-Phase Faults – Device Duty (IEC 909)



Panel/UPS/1-Ph System Device Duty



LG, LL, LLG & 3-Phase Faults (IEC 909)



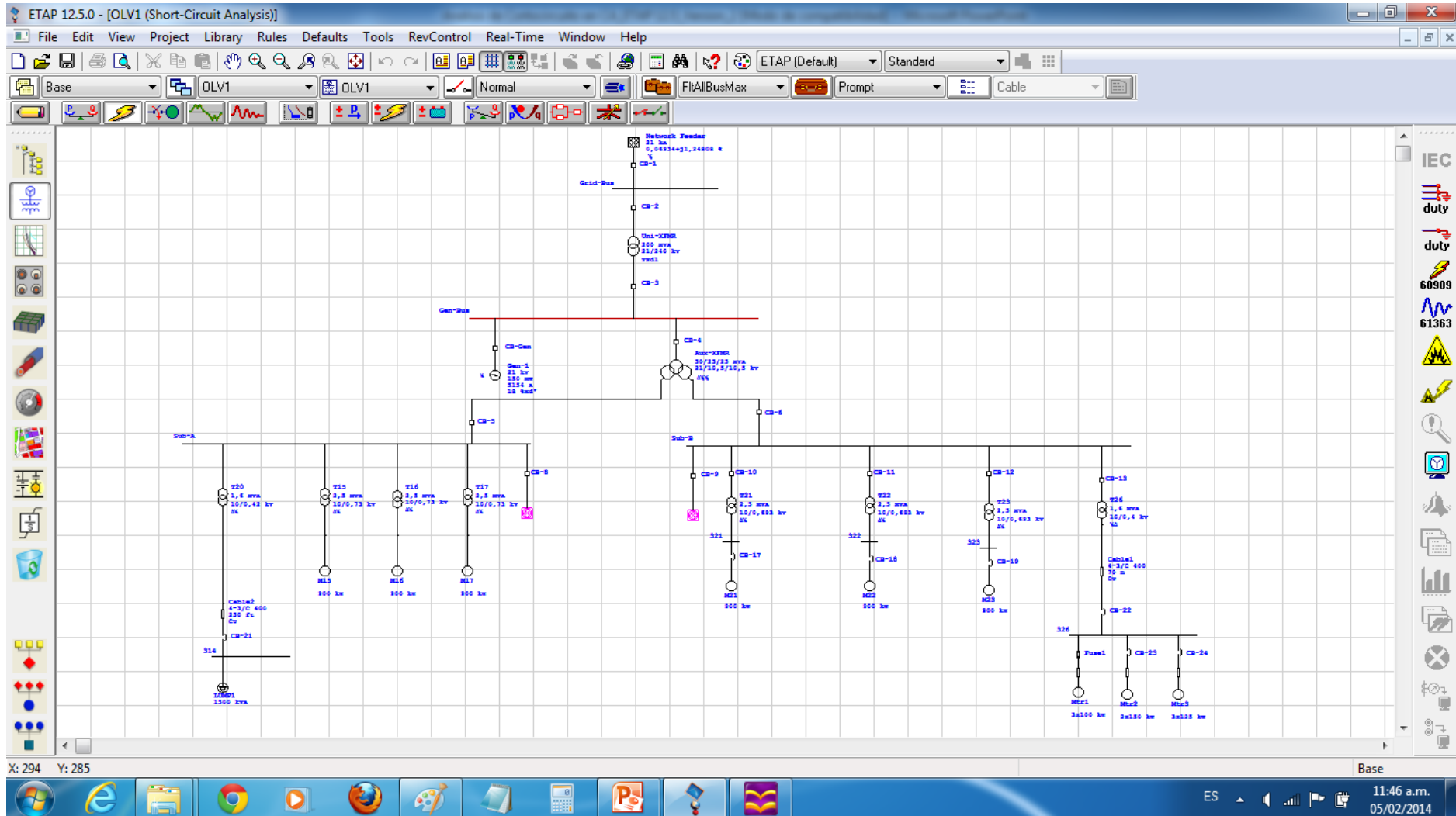
3-Phase Faults – Transient Study (IEC 363)

3-Phase Faults - Transient Study (IEC 363)

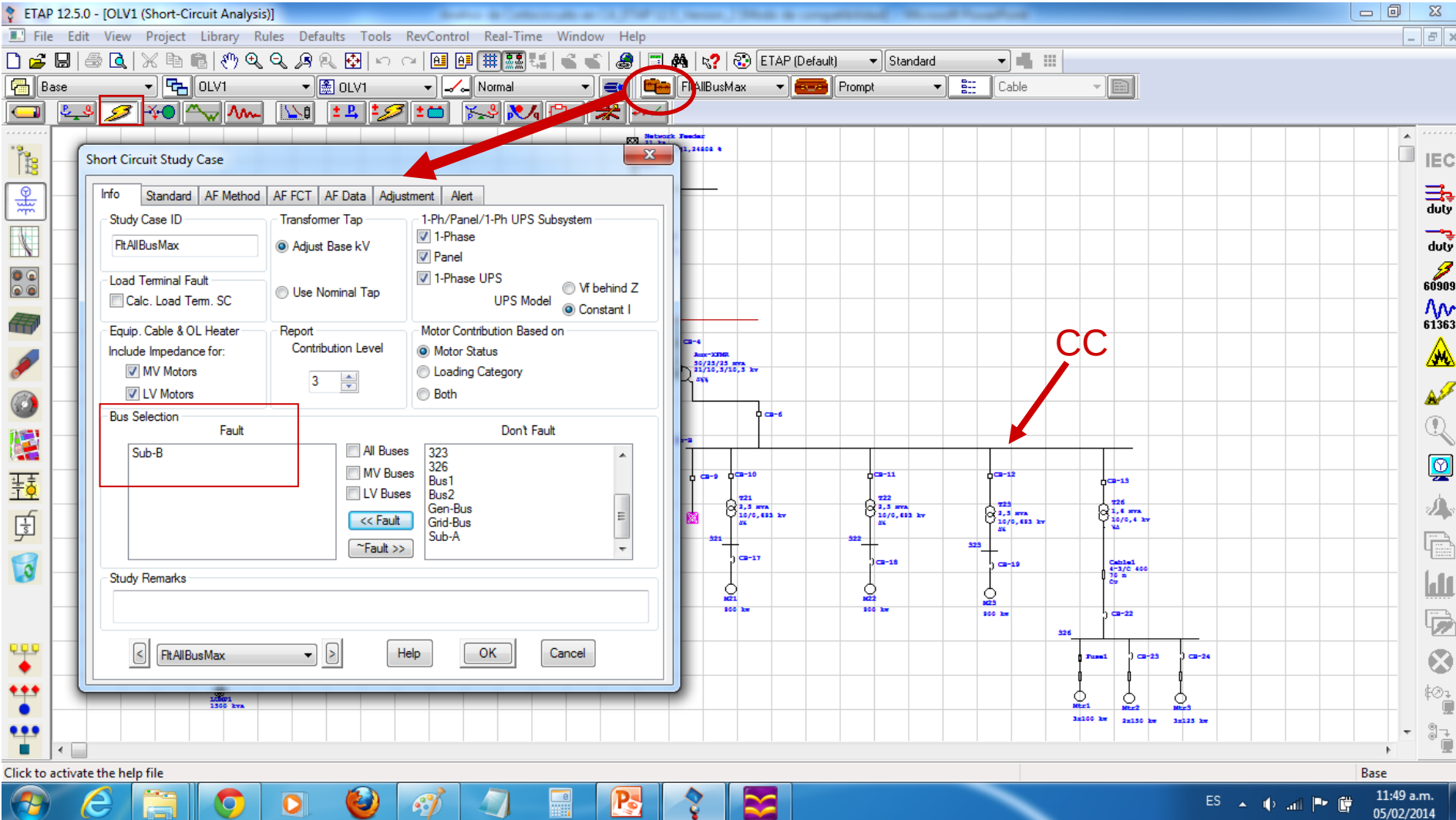
Click on this button to perform a 3-phase fault study per IEC 61363 Standard. This study calculates instantaneous values of actual short circuit current, DC offset, short circuit current envelope, AC component, and DC offset in percent for total short circuit current at faulted buses. The results are tabulated as a function of time.

Generators are modeled by their positive sequence subtransient reactance, and motors are modeled by their locked-rotor impedance. Their subtransient and transient time constants and DC time constants are also considered in the calculation.

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5

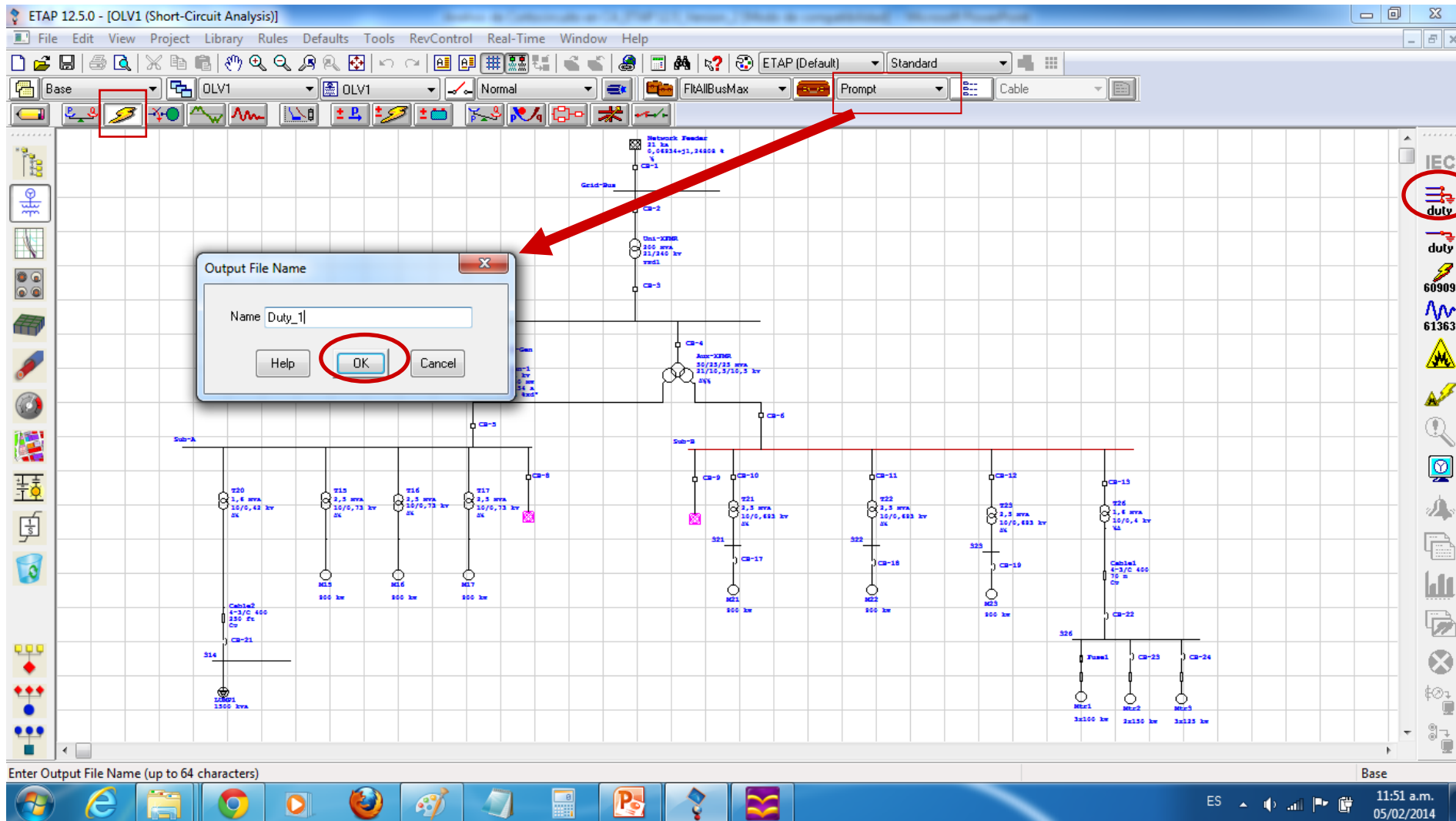


Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5

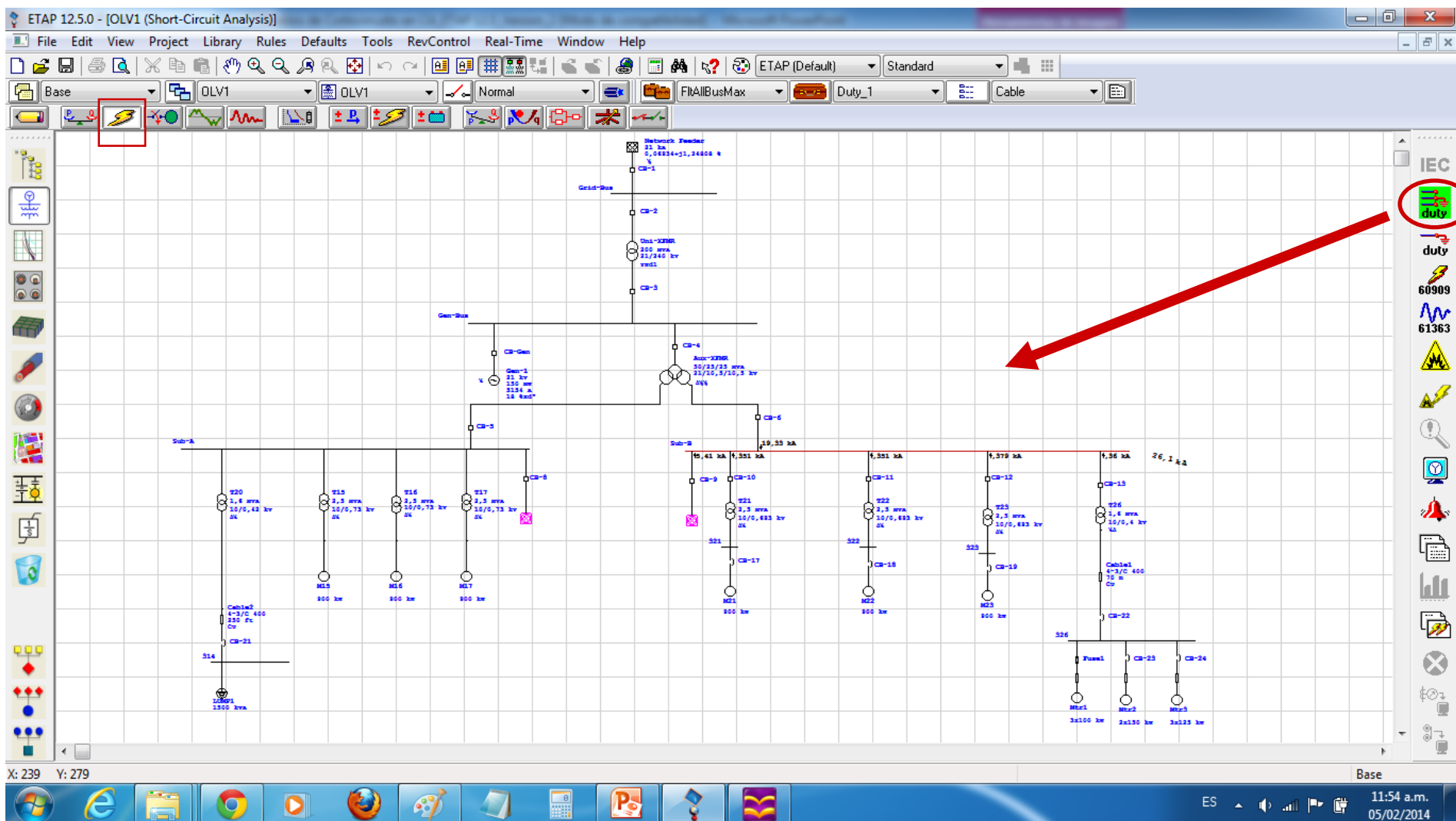


The screenshot displays the ETAP 12.5.0 interface for a Short-Circuit Analysis. The main window shows a power system diagram with various components like buses, breakers, and motors. A red arrow points to the 'FitAllBusMax' button in the top toolbar. Another red arrow points to the 'Short Circuit Study Case' dialog box, which is open and showing the 'Info' tab. The dialog box contains fields for 'Study Case ID' (FitAllBusMax), 'Transformer Tap' (Adjust Base kV), 'Load Terminal Fault' (Calc. Load Term. SC), 'Equip. Cable & OL Heater' (Include Impedance for: MV Motors, LV Motors), 'Bus Selection' (Sub-B), 'Fault' (All Buses, MV Buses, LV Buses), 'Motor Contribution Based on' (Motor Status), and 'Study Remarks'. The background diagram shows a power system with buses labeled CB-4 through CB-24, breakers, and motors. A red arrow labeled 'CC' points to a specific location on the diagram.

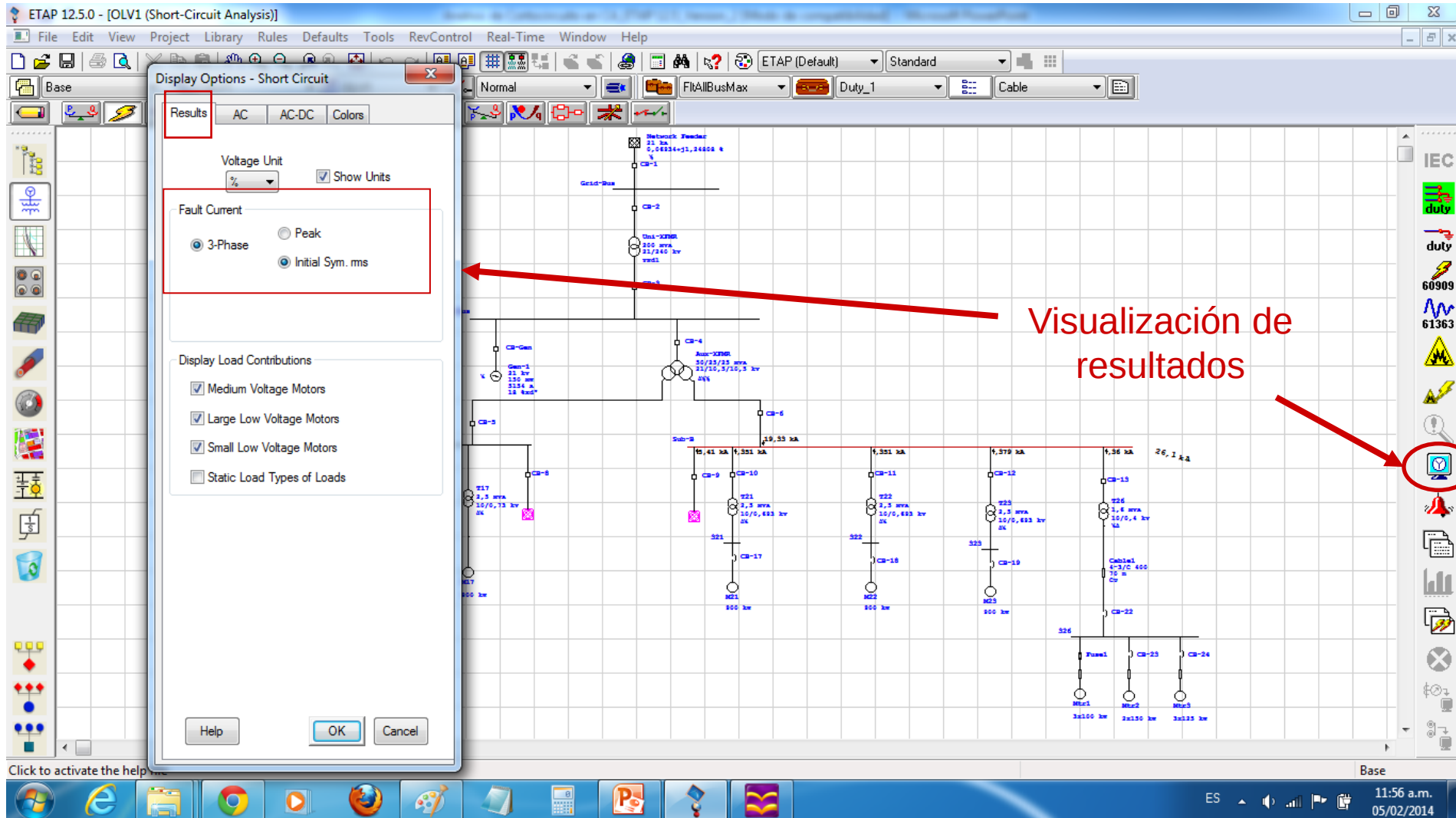
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



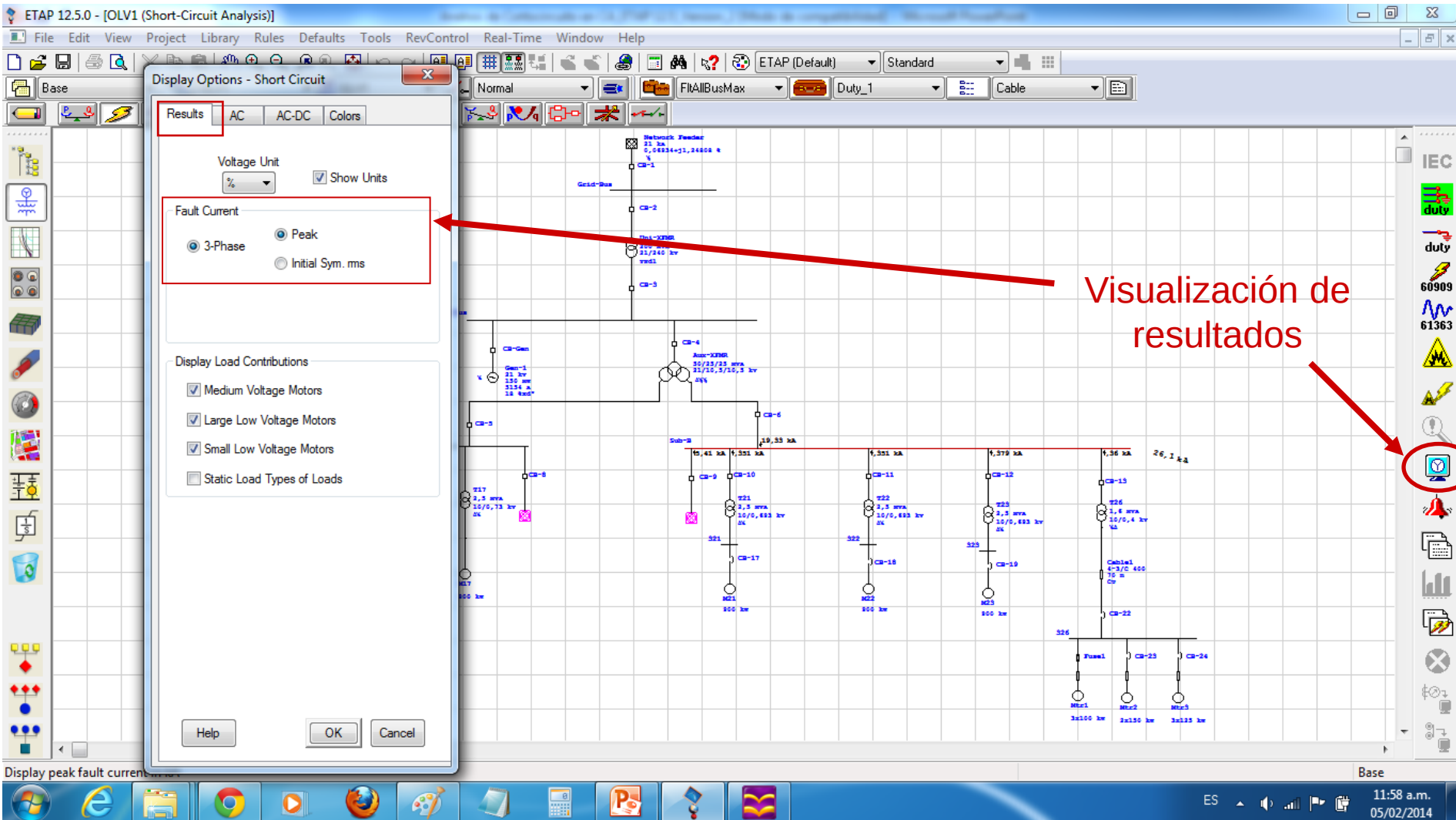
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



ETAP 12.5.0 - [OLV1 (Short-Circuit Analysis)]

File Edit View Project Library Rules Defaults Tools RevControl Real-Time Window Help

Base

Display Options - Short Circuit

Results AC AC-DC Colors

Voltage Unit
% Show Units

Fault Current
☒ 3-Phase ☐ Peak
☐ Initial Sym. rms

Display Load Contributions
☒ Medium Voltage Motors
☒ Large Low Voltage Motors
☒ Small Low Voltage Motors
☐ Static Load Types of Loads

Help OK Cancel

Visualización de resultados

Base

Display peak fault current

ES 11:58 a.m. 05/02/2014

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



ETAP 12.5.0 - [OLV1 (Short-Circuit Analysis)]

File Edit View Project Library Rules Defaults Tools RevControl Real-Time Window Help

Base OLV1 OLV1 Normal FitAllBusMax Duty_1 Cable

IEC 3-Phase SC Report Manager

Complete Input Result **Summary**

Summary

Viewer
PDF
MS Word
Rich Text Format
MS Excel
Set As Default

Output Report Name
Duty_1

Path
C:\Users\Usuario\ETAP\WORKSHOP_2014\ETAP 115\EJERCICIOS\CC_IEC

Help OK Cancel

Informe de resultados

View the output report using the PDF format

Base

12:02 p.m.
05/02/2014

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project:	Cortocircuito IEC	ETAP	Page:	1
Location:	ARGENTINA	12.5.0D	Date:	02-05-2014
Contract:	Curso de Capacitacion ETAP		SN:	RAIENDLRCL
Engineer:	Diego Moitre	Study Case: FltAllBusMax	Revision:	Base
Filename:	Ejercicio 1 CC IEC		Config.:	Normal

Ejemplo de IEC 60909-4 2000.

Short-Circuit Summary Report

3-Phase Fault Currents

Bus		Device		Device Capacity (kA)				Short-Circuit Current (kA)					
				Making Peak	Ib sym	Ib asym	Idc	I"k	ip	Ib sym	Ib asym	Idc	Ik
Sub-B	10.000	Sub-B	SwthGear	75.000				26.115	65.688				18.935
	10.000	CB-10	CB	80.000	31.500	34.482	14.027	26.115	65.688	23.635	27.114	13.286	
	10.000	CB-11	CB	80.000	31.500	34.482	14.027	26.115	65.688	23.635	27.114	13.286	
	10.000	CB-12	CB	80.000	31.500	34.482	14.027	26.115	65.688	23.635	27.114	13.286	
	10.000	CB-13	CB	80.000	31.500	34.482	14.027	26.115	65.688	23.635	27.114	13.286	
	10.000	CB-6	CB	80.000	31.500	34.482	14.027	26.115	65.688	23.635	27.114	13.286	
202Load	10.000	202Load	SwthGear	75.000				26.115	67.114				18.935

ip is calculated using method C

Ib does not include decay of non-terminal faulted induction motors

Ik is the maximum steady state fault current

Idc is based on X/R from Method C and Ib as specified above

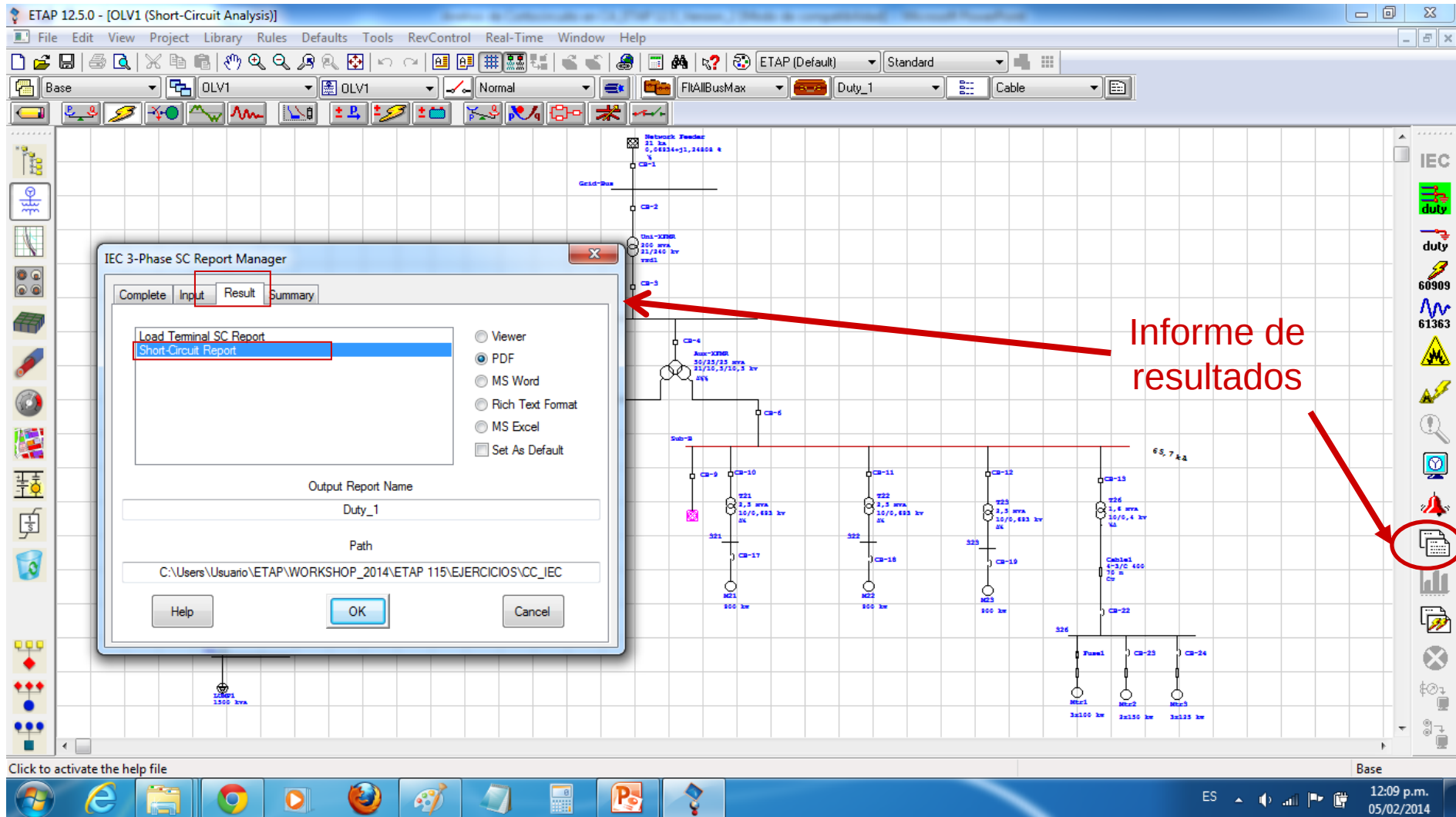
LV CB duty determined based on service rating.

Total through current is used for device duty.

* Indicates a device with calculated duty exceeding the device capability.

Indicates a device with calculated duty exceeding the device marginal limit. (95 % times device capability)

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project:	Cortocircuito IEC	ETAP	Page:	1
Location:	ARGENTINA	12.5.0D	Date:	02-05-2014
Contract:	Curso de Capacitacion ETAP		SN:	RAIENDLRCL
Engineer:	Diego Moitre	Study Case: FltAllBusMax	Revision:	Base
Filename:	Ejercicio 1 CC IEC		Config.:	Normal

Ejemplo de IEC 60909-4 2000.

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus: **Sub-B**

Nominal kV = 10.000
 Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)
 Peak Value = 65.688 kA Method C
 Steady State = 18.935 kA rms

Contribution		Voltage & Initial Symmetrical Current (rms)				
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Real	kA Imaginary	X/R Ratio	kA Magnitude
Sub-B	Total	0.00	1.972	-26.040	13.2	26.115
321	Sub-B	12.82	0.126	-0.327	2.6	0.351
322	Sub-B	12.82	0.126	-0.327	2.6	0.351
323	Sub-B	13.85	0.135	-0.354	2.6	0.379

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5

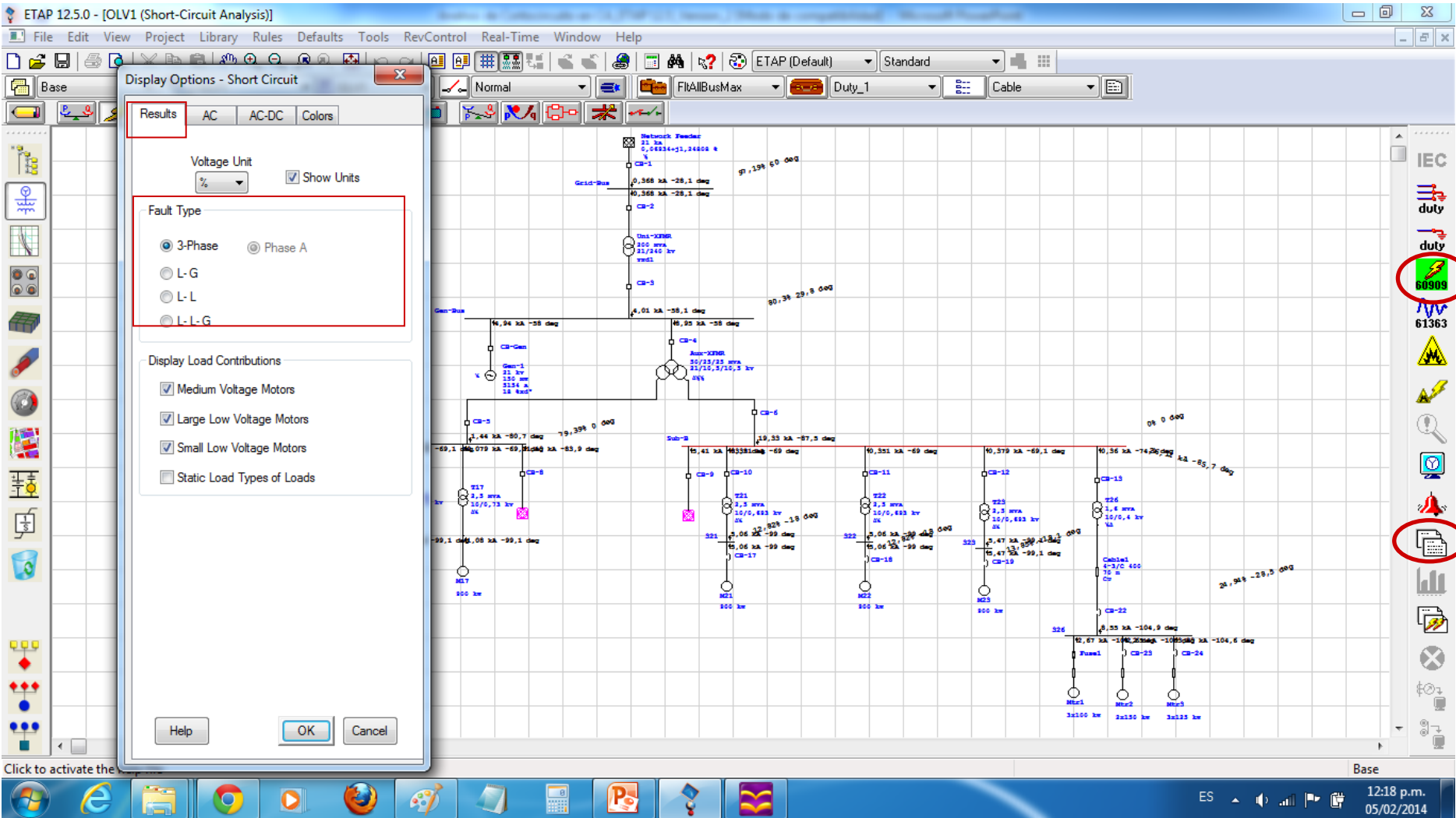


Breaking and DC Fault Current (kA)

Based on Total Bus Fault Current

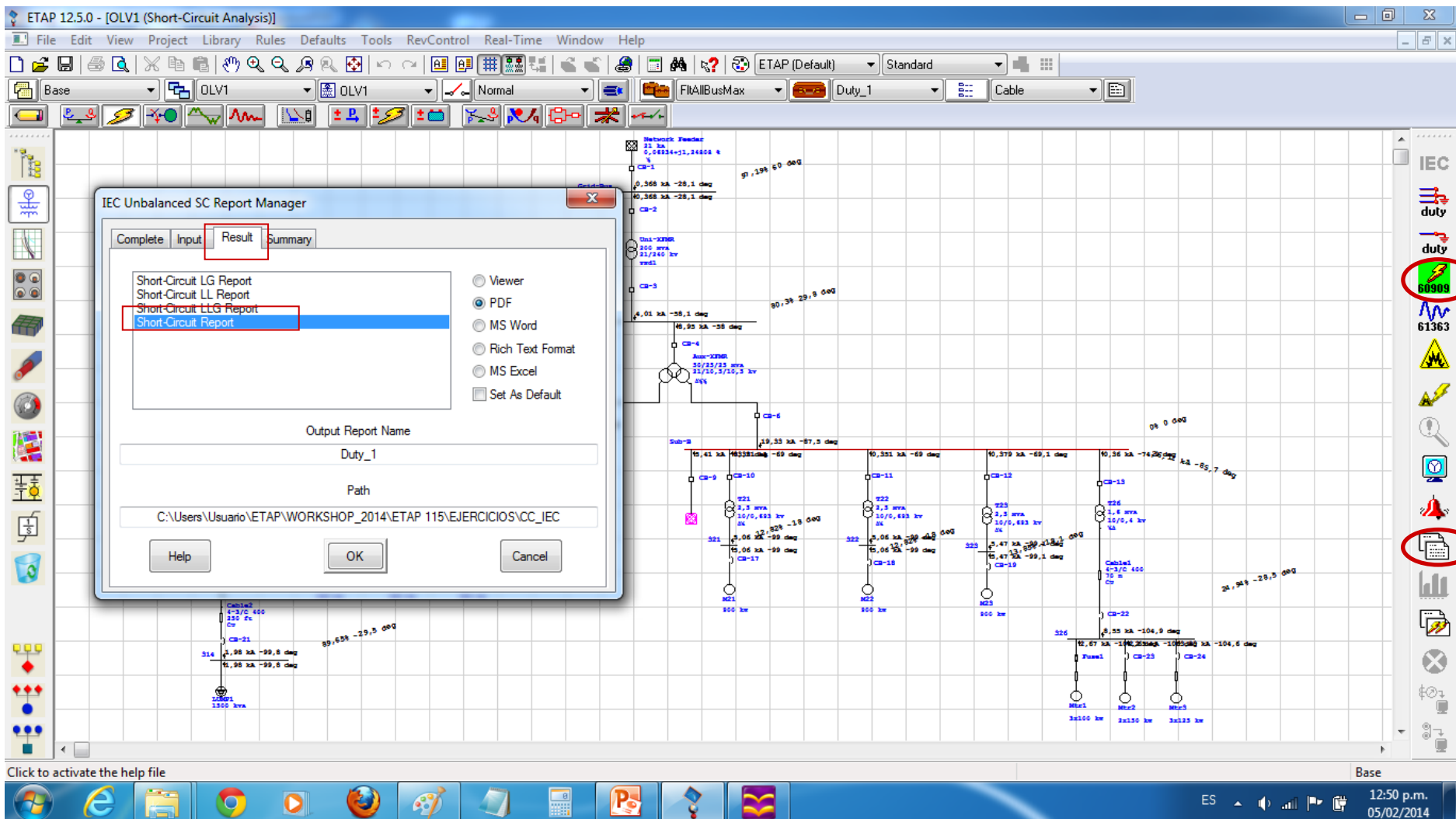
TD (S)	Ib sym	Ib asym	Idc
0.01	25.592	38.296	28.489
0.02	25.291	34.371	23.275
0.03	24.906	31.255	18.883
0.04	24.302	28.784	15.424
0.05	23.694	27.403	13.766
0.06	23.401	26.094	11.543
0.07	23.113	25.068	9.707
0.08	22.829	24.250	8.181
0.09	22.550	23.584	6.908
0.10	22.276	23.286	6.785
0.15	21.687	21.925	3.225
0.20	21.120	21.177	1.552
0.25	20.579	20.593	0.750
0.30	20.544	20.548	0.363

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



The screenshot displays the ETAP 12.5.0 software interface for a Short-Circuit Analysis. The main window shows a power system diagram with various components including Network Feeders, Generators, Transformers, and Motors. The diagram is overlaid with a grid. A dialog box titled "Display Options - Short Circuit" is open, showing the "Results" tab. The "Voltage Unit" is set to "%". The "Fault Type" section has "3-Phase" selected. The "Display Load Contributions" section has "Medium Voltage Motors", "Large Low Voltage Motors", and "Small Low Voltage Motors" checked. The "Help", "OK", and "Cancel" buttons are visible at the bottom of the dialog box. The right sidebar contains several icons, including a red circle around the "60909" icon and another red circle around the "61363" icon. The bottom status bar shows the time as 12:18 p.m. on 05/02/2014.

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Cortocircuito IEC
 Location: ARGENTINA
 Contract: Curso de Capacitacion ETAP
 Engineer: Diego Moitre
 Filename: Ejercicio 1 CC IEC

ETAP
 12.5.0D

Study Case: FltAllBusMax

Page: 1
 Date: 02-05-2014
 SN: RAIENDLRCL
 Revision: Base
 Config.: Normal

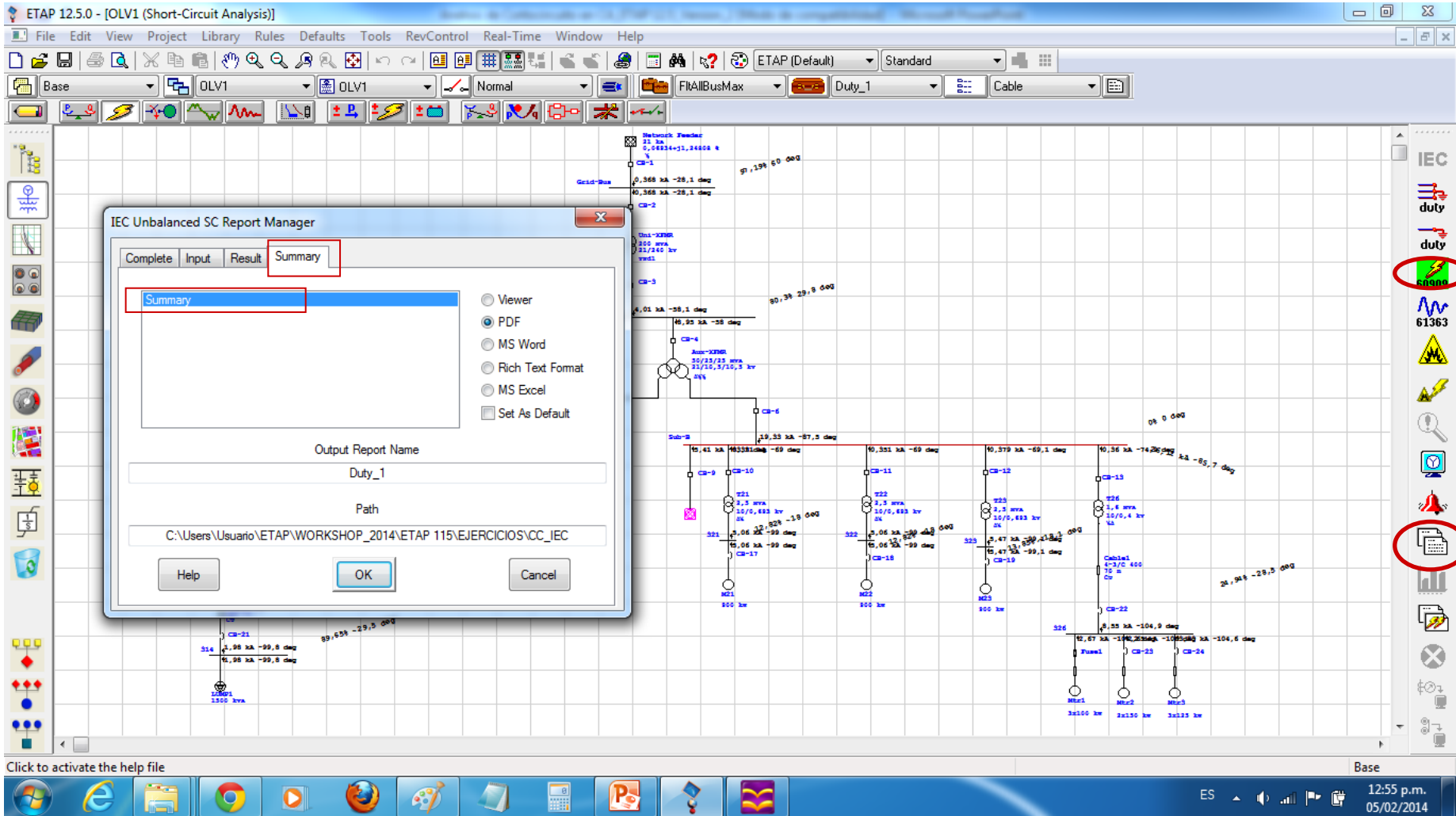
Ejemplo de IEC 60909-4 2000.

SHORT- CIRCUIT REPORT

Fault at bus: **Sub-B**
 Nominal kV = 10.000
 Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)

Contribution		3-Phase Fault		Line-To-Ground Fault					Positive & Zero Sequence Impedances Looking into "From Bus"			
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Symm. rms	% Voltage at From Bus			kA Symm. rms		% Impedance on 100 MVA base			
				Va	Vb	Vc	Ia	3I0	R1	X1	R0	X0
Sub-B	Total	0.00	26.115	0.00	156.28	157.90	5.140	5.140	1.80E+000	2.37E+001	6.08E+001	3.12E+002
321	Sub-B	12.82	0.351	92.48	91.91	99.87	0.042	0.000	6.37E+002	1.66E+003		
322	Sub-B	12.82	0.351	92.48	91.91	99.87	0.042	0.000	6.37E+002	1.66E+003		
323	Sub-B	13.85	0.379	92.56	92.02	99.88	0.046	0.000	5.86E+002	1.53E+003		
Bus1	Sub-B	19.46	0.360	97.52	96.80	104.83	1.748	5.121 *	4.50E+002	1.67E+003	5.49E+001	3.14E+002

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project:	Cortocircuito IEC	ETAP	Page:	1
Location:	ARGENTINA	12.5.0D	Date:	02-05-2014
Contract:	Curso de Capacitacion ETAP		SN:	RAIENDLRCL
Engineer:	Diego Moitre		Revision:	Base
Filename:	Ejercicio 1 CC IEC	Study Case: FltAllBusMax	Config.:	Normal

Ejemplo de IEC 60909-4 2000.

Short-Circuit Summary Report

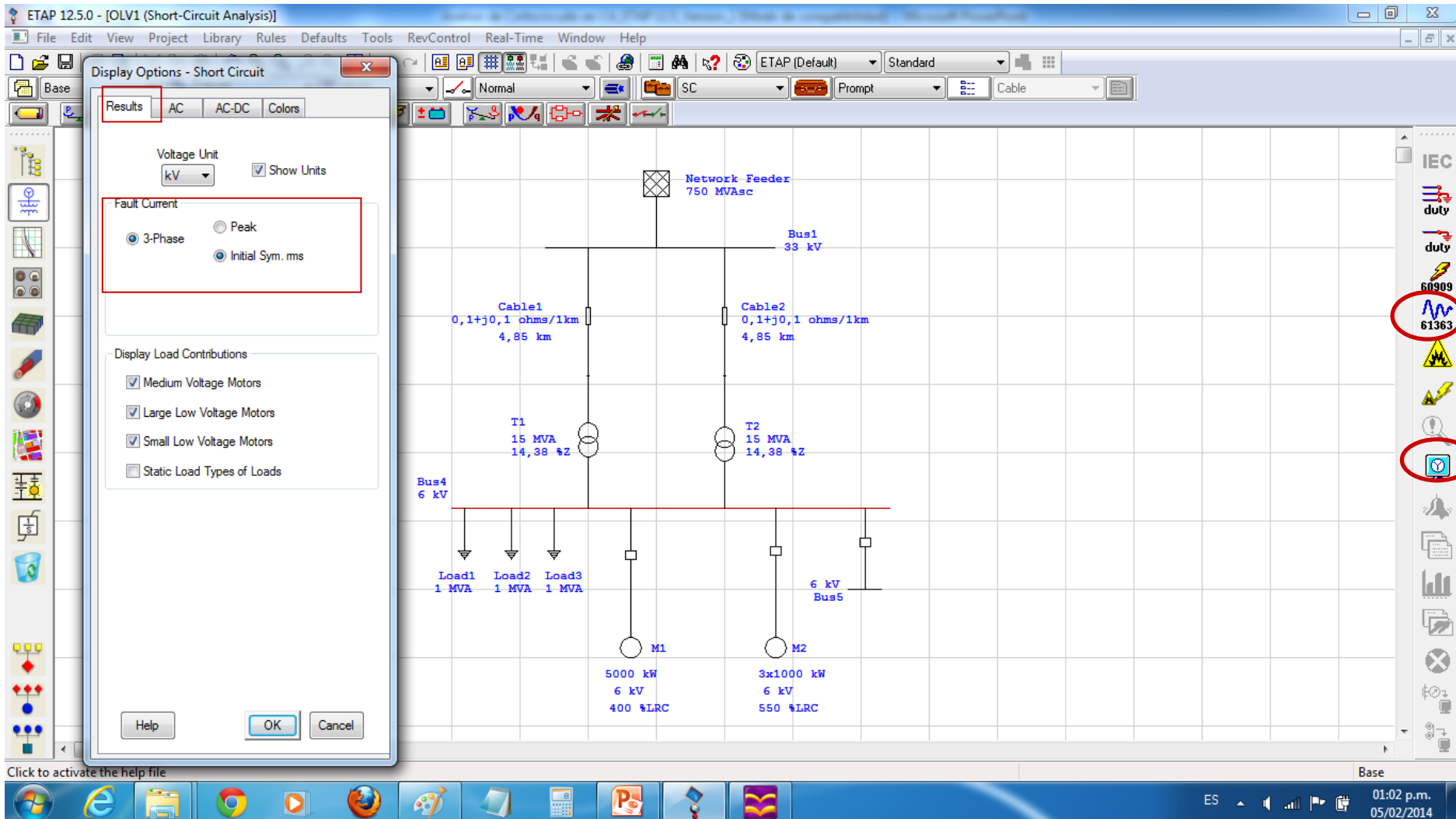
3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault				*Line-to-Line-to-Ground			
ID	kV	I"k	ip	Ik	I"k	ip	Ib	Ik	I"k	ip	Ib	Ik	I"k	ip	Ib	Ik
Sub-B	10.000	26.115	65.688	18.935	5.140	12.928	5.140	5.140	23.882	60.072	23.882	23.882	24.000	60.369	24.000	24.000

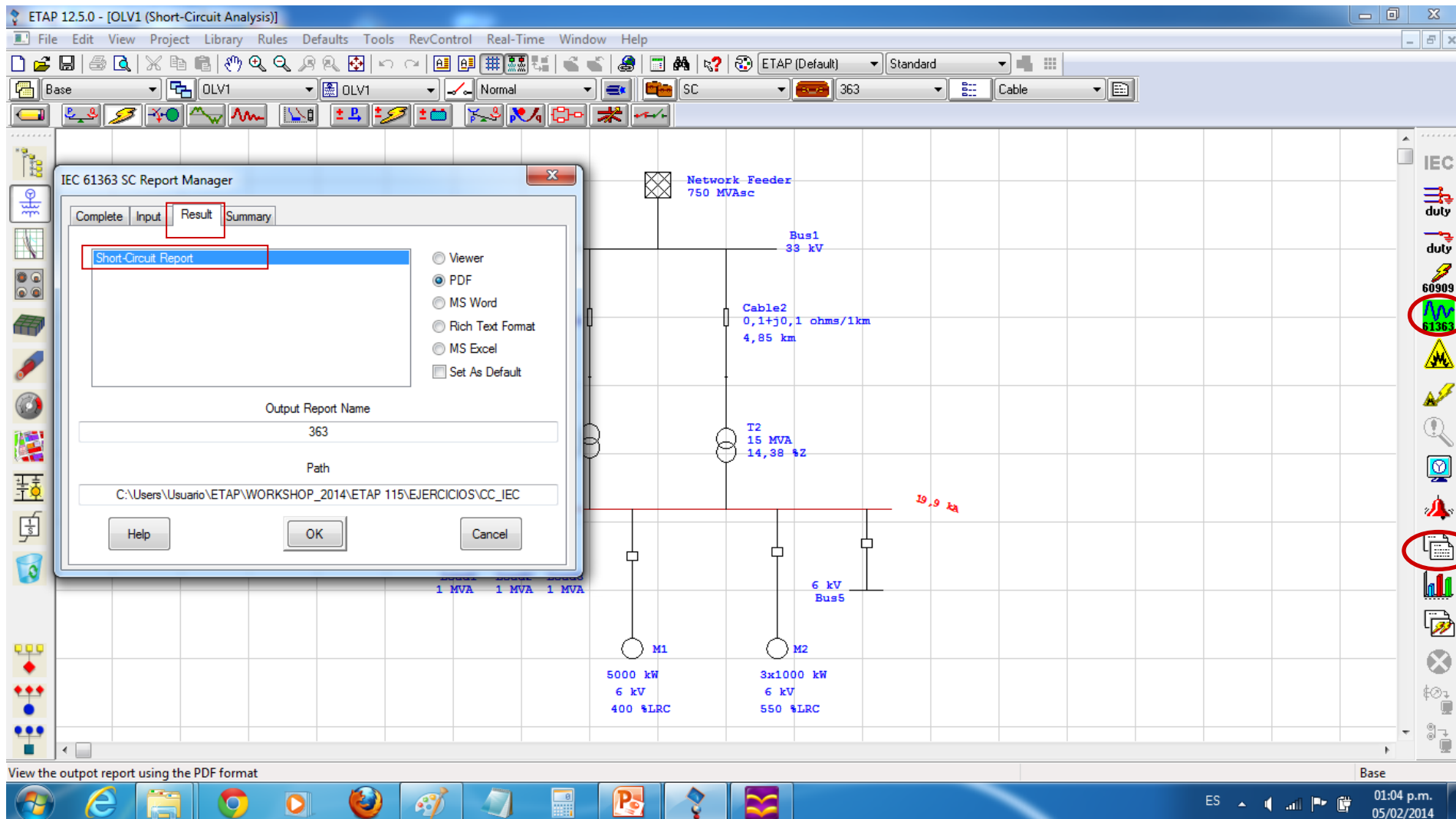
All fault currents are in rms kA. Current ip is calculated using Method C.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



The screenshot displays the ETAP 12.5.0 interface for a Short-Circuit Analysis. The main window shows a single-line diagram of a power system. A "Network Feeder 750 MVA" is connected to "Bus1 33 kV". A "Cable2" with impedance $0.1 + j0.1$ ohms/km and length 4.85 km connects Bus1 to a busbar. This busbar is connected to a transformer "T2 15 MVA 14.38 kV". The secondary of T2 is connected to a busbar that feeds three loads: "M1 5000 kW 6 kV 400 %LRC", "M2 3x1000 kW 6 kV 550 %LRC", and "Bus5 6 kV". A fault current of 19.9 kA is indicated at the busbar. A "IEC 61363 SC Report Manager" dialog box is open, showing the "Result" tab. The "Short-Circuit Report" is selected in the list. The output format is set to "PDF". The output report name is "363" and the path is "C:\Users\Usuario\ETAP\WORKSHOP_2014\ETAP 115\EJERCICIOS\CC_IEC". The Windows taskbar at the bottom shows the time as 01:04 p.m. on 05/02/2014.

ETAP 12.5.0 - [OLV1 (Short-Circuit Analysis)]

File Edit View Project Library Rules Defaults Tools RevControl Real-Time Window Help

Base OLV1 OLV1 Normal SC 363 Cable

IEC 61363 SC Report Manager

Complete Input **Result** Summary

Short-Circuit Report

Viewer
☒ PDF
MS Word
Rich Text Format
MS Excel
Set As Default

Output Report Name
363

Path
C:\Users\Usuario\ETAP\WORKSHOP_2014\ETAP 115\EJERCICIOS\CC_IEC

Help OK Cancel

Network Feeder
750 MVA

Bus1
33 kV

Cable2
 $0.1 + j0.1$ ohms/km
4.85 km

T2
15 MVA
14.38 kV

19.9 kA

6 kV
Bus5

M1
5000 kW
6 kV
400 %LRC

M2
3x1000 kW
6 kV
550 %LRC

1 MVA 1 MVA 1 MVA

View the output report using the PDF format

Base

ES 01:04 p.m.
05/02/2014

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Coortocircuito IEC
 Location: ARGENTINA
 Contract: Curso de Capacitacion ETAP
 Engineer: Diego Moitre
 Filename: IEC909

ETAP
 12.5.0D

Study Case: SC

Page: 1
 Date: 02-05-2014
 SN: RAIENDLRCL
 Revision: Base
 Config.: Normal

Ejemplo IEC 60909-4

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-Phase fault at bus : **Bus4**

Nominal kV = 6.000

Voltage c Factor = 1.10 (User-Defined)

i = total fault current,
 Idc = dc component,
 ienv = top envelope of current-wave,
 Iac(rms) = rms value of ac component,
 Idc(%) = percentage value of dc component

t (s)	i (kA)	Idc (kA)	ienv (kA)	Iac (kA, rms)	Idc (%)	t (s)	i (kA)	Idc (kA)	ienv (kA)	Iac (kA, rms)	Idc (%)
0.000	0.000	28.094	56.189	19.866	100.00	0.001	1.104	27.194	55.255	19.842	96.91
0.002	5.892	26.323	54.350	19.818	93.92	0.003	13.561	25.480	53.474	19.795	91.02
0.004	22.908	24.664	52.624	19.771	88.21	0.005	32.504	23.874	51.801	19.748	85.48
0.006	40.890	23.109	51.004	19.725	82.84	0.007	46.784	22.369	50.231	19.701	80.28
0.008	49.262	21.652	49.482	19.678	77.80	0.009	47.882	20.958	48.756	19.656	75.40
0.010	42.749	20.287	48.052	19.633	73.07	0.011	34.497	19.637	47.370	19.610	70.81

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



0.084	-23.145	1.823	27.601	18.228	7.07	0.085	-19.072	1.765	27.521	18.212	6.85
0.086	-12.080	1.708	27.442	18.197	6.64	0.087	-3.164	1.654	27.365	18.181	6.43
0.088	6.415	1.601	27.291	18.166	6.23	0.089	15.303	1.549	27.218	18.150	6.04
0.090	22.248	1.500	27.147	18.135	5.85	0.091	26.272	1.452	27.077	18.120	5.67
0.092	26.807	1.405	27.009	18.105	5.49	0.093	23.778	1.360	26.943	18.090	5.32
0.094	17.610	1.317	26.878	18.075	5.15	0.095	9.167	1.274	26.815	18.060	4.99
0.096	-0.369	1.234	26.753	18.045	4.83	0.097	-9.663	1.194	26.693	18.030	4.68
0.098	-17.417	1.156	26.634	18.016	4.54	0.099	-22.551	1.119	26.576	18.001	4.39
0.100	-24.354	1.083	26.520	17.986	4.26	0.101	-22.583	1.048	26.465	17.972	4.12

t (cycle)	i (kA)	Idc (kA)	ienv (kA)	Iac (kA, rms)	Idc (%)	t (cycle)	i (kA)	Idc (kA)	ienv (kA)	Iac (kA, rms)	Idc (%)
0.000	0.000	28.094	56.189	19.866	100.00	0.100	3.927	26.611	54.649	19.826	94.91
0.200	16.558	25.205	53.188	19.787	90.07	0.300	32.504	23.874	51.801	19.748	85.48
0.400	45.162	22.613	50.486	19.709	81.13	0.500	49.237	21.418	49.237	19.671	76.99
0.600	42.749	20.287	48.052	19.633	73.07	0.700	27.779	19.216	46.927	19.595	69.34
0.800	9.654	18.201	45.859	19.558	65.80	0.900	-5.095	17.239	44.846	19.521	62.45
1.000	-11.226	16.329	43.883	19.484	59.26	1.100	-6.784	15.466	42.969	19.447	56.24

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



ETAP 12.5.0 - [OLV1 (Short-Circuit Analysis)]

File Edit View Project Library Rules Defaults Tools RevControl Real-Time Window Help

Base OLV1 OLV1 Normal SC 363 Cable

IEC 61363 SC Report Manager

Complete Input Result **Summary**

Summary

Viewer
PDF
MS Word
Rich Text Format
MS Excel
Set As Default

Output Report Name
363

Path
C:\Users\Usuario\ETAP\WORKSHOP_2014\ETAP 115\EJERCICIOS\CC_IEC

Help OK Cancel

Network Feeder
750 MVA_{sc}

Bus1
33 kV

Cable2
0,1+j0,1 ohms/km
4,85 km

T2
15 MVA
14,38 %Z

19,9 kA

Load1 Load2 Load3
1 MVA 1 MVA 1 MVA

6 kV
Bus5

M1
5000 kW
6 kV
400 %LRC

M2
3x1000 kW
6 kV
550 %LRC

View the output report using the PDF format

Base

ES 01:11 p.m.
05/02/2014

Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Project: Coortocircuito IEC
Location: ARGENTINA
Contract: Curso de Capacitacion ETAP
Engineer: Diego Moitre
Filename: IEC909

ETAP
12.5.0D

Study Case: SC

Page: 1
Date: 02-05-2014
SN: RAIENDLRCL
Revision: Base
Config.: Normal

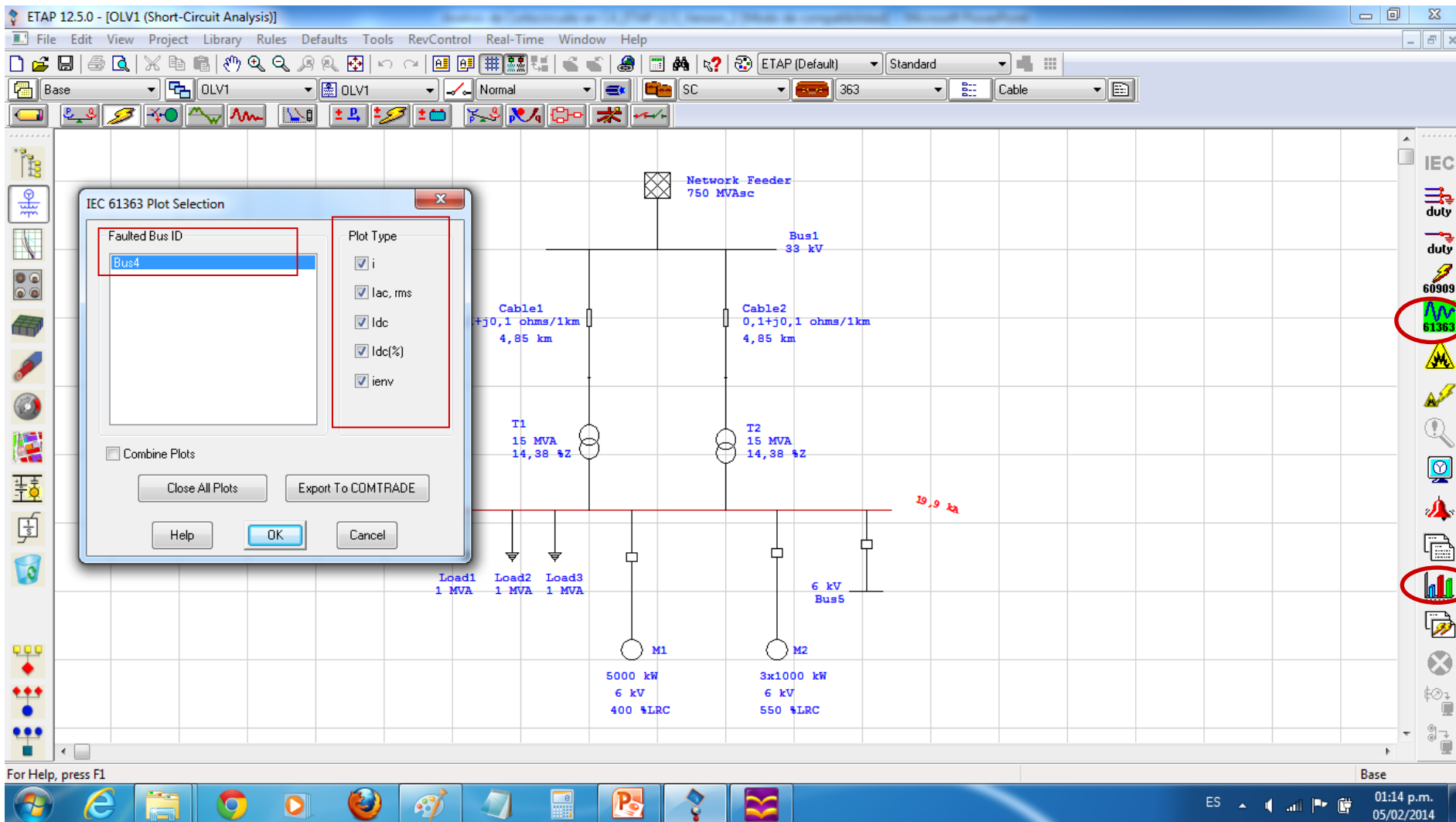
Ejemplo IEC 60909-4

Short-Circuit Summary Report

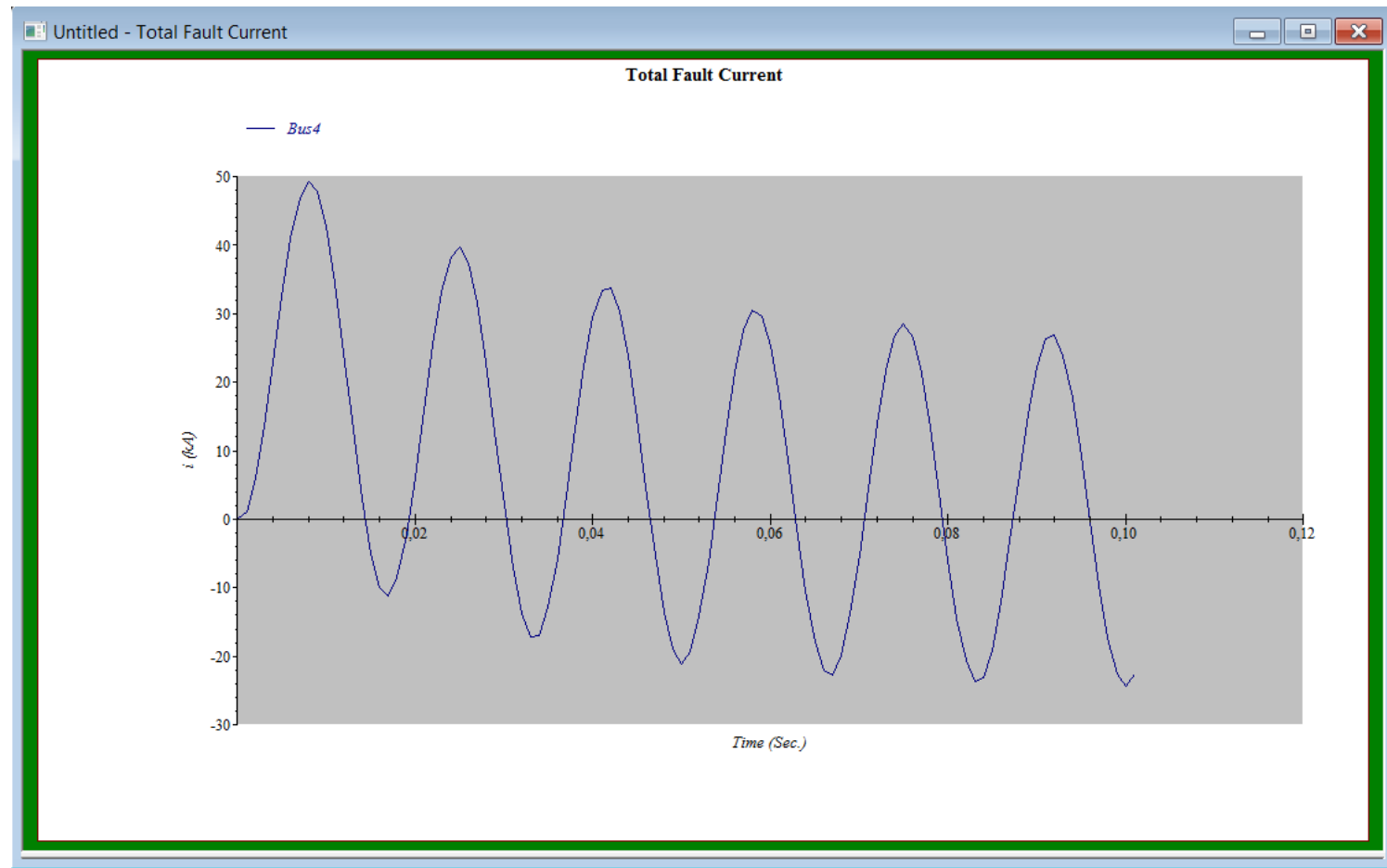
3-Phase Fault Currents

Bus		Short Circuit Current (kA, rms)		
ID	kV	Subtransient	Transient	Steady State
Bus4	6.000	19.866	19.866	15.090

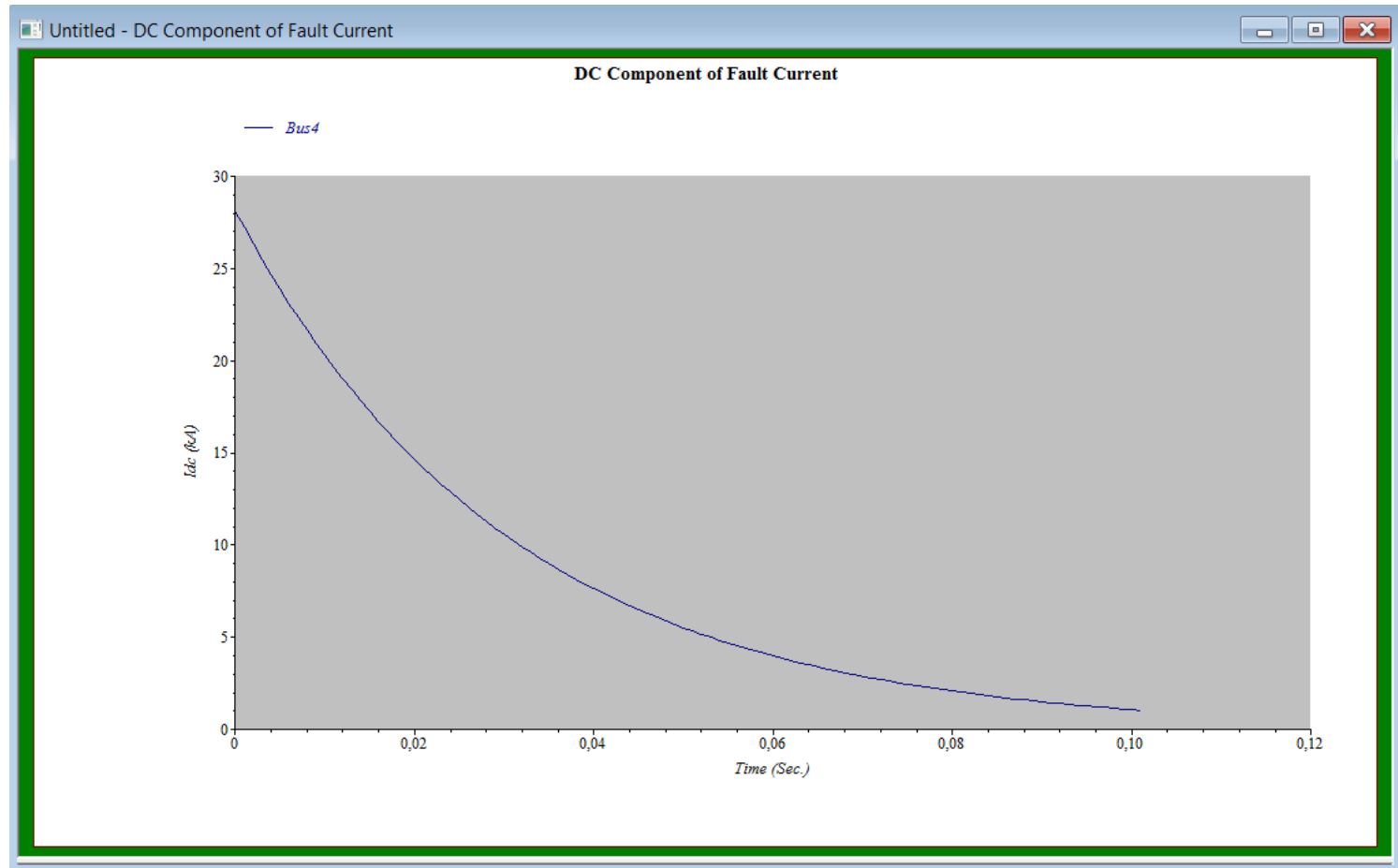
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



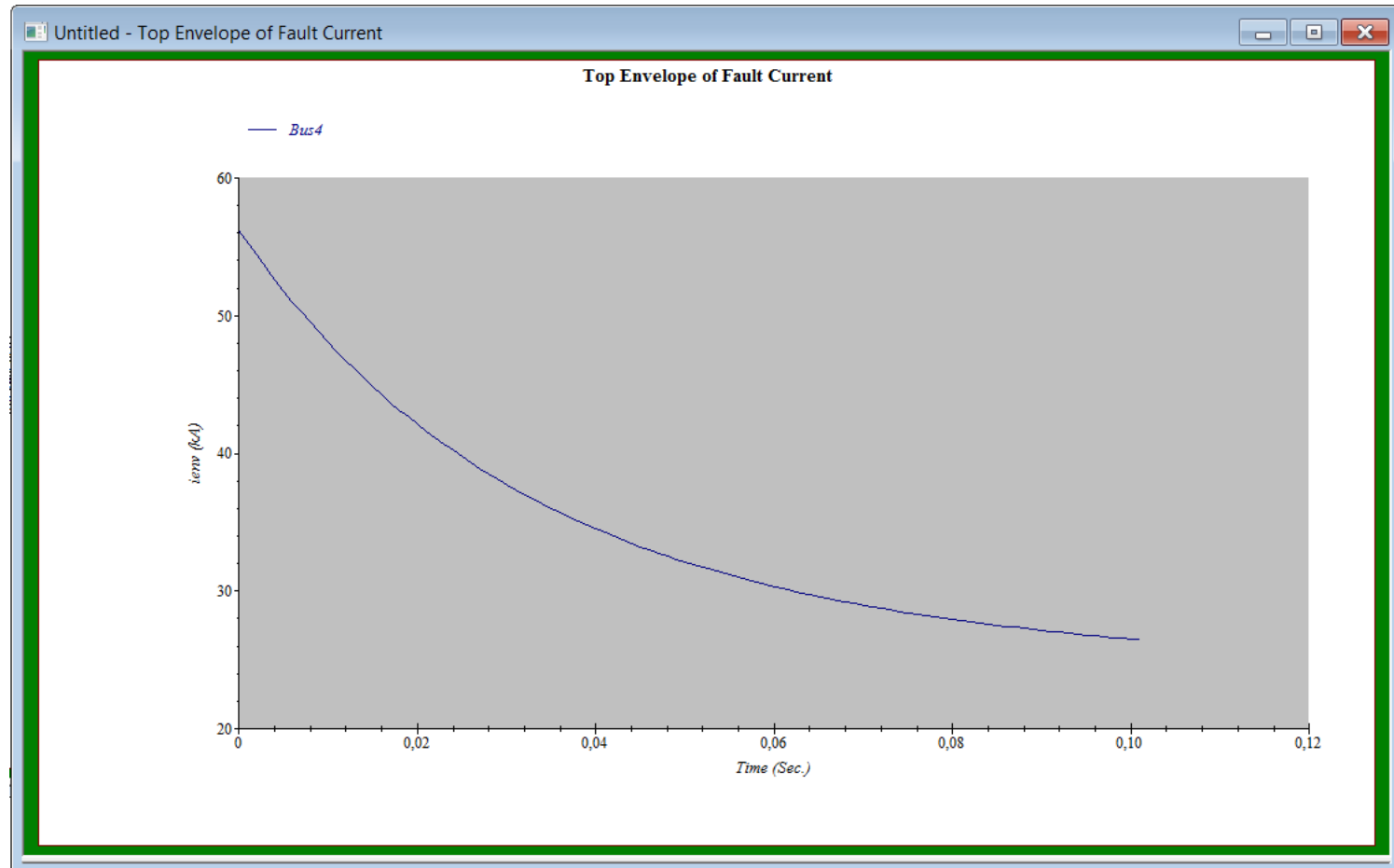
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



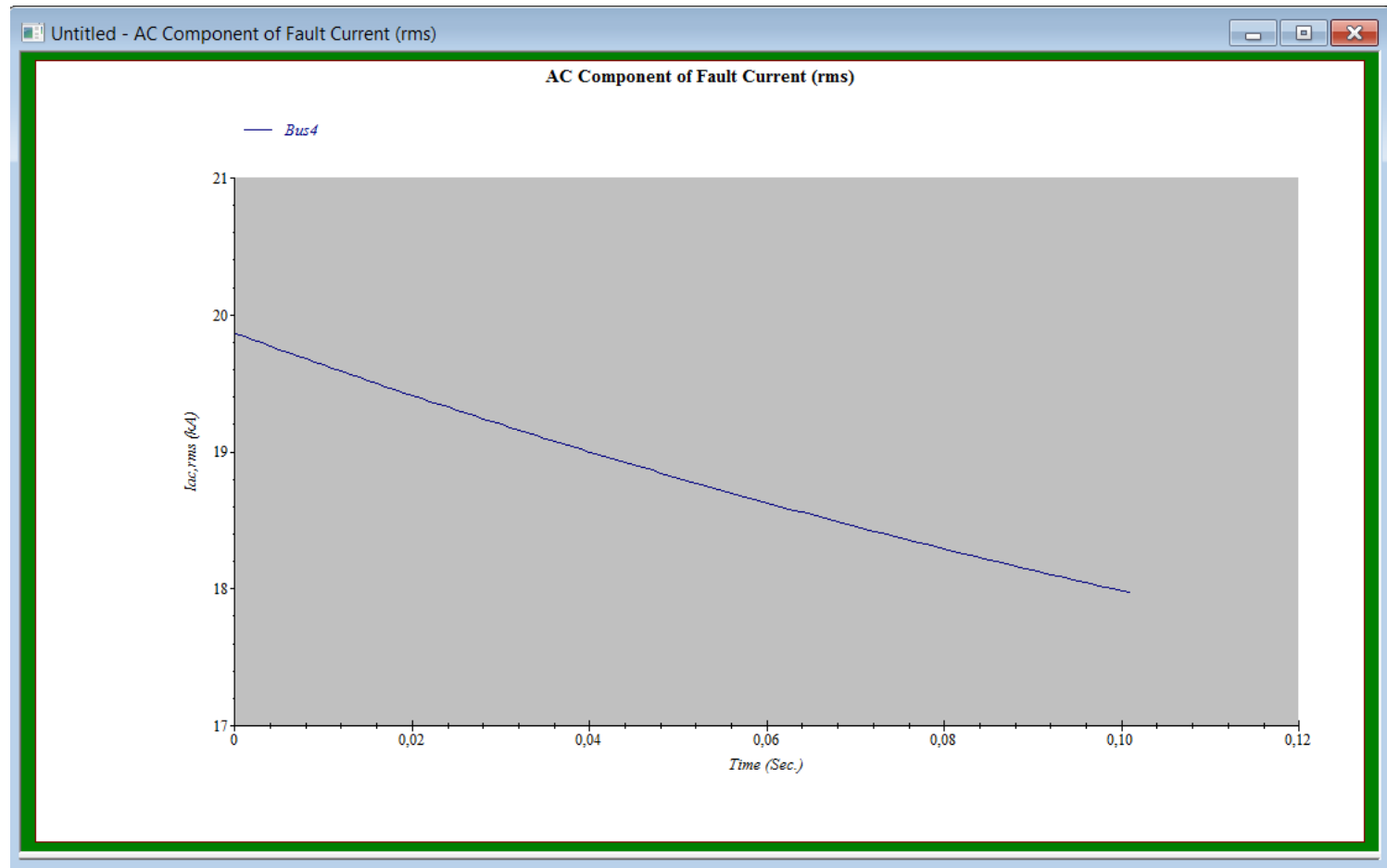
Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5



Ejemplo de aplicación usando ETAP®12.5

