

ELC-30514
Sistemas de Potencia I

Cortocircuito Simétrico

Prof. Francisco M. Gonzalez-Longatt

fglongatt@ieee.org

<http://www.giaelec.org/fglongatt/SP.htm>

1. Introduccion

- La posibilidad de diseñar y operar un sistema con una tasa de cero fallas, si bien no es realista es económicamente injustificable.
- Dentro de del contexto del análisis de cortocircuitos, las fallas del sistema se manifiestan como rupturas de aislamiento que puede ser seguido de uno a más de los siguientes fenómenos:
 - Indeseables flujos de corriente.
 - Corriente de magnitud excesivamente grande, que pueden llevar a los equipos a daño o disfunción de su vida útil.
 - Excesivas sobretensiones, de naturaleza transitoria o sostenida, que comprometen la integridad y confiabilidad de varias partes aisladas.
 - Depresión de los voltajes en la vecindad de la falla lo cual puede afectar la operación de equipos rotativos.
 - Creación en el sistema de condiciones que comprometen la integridad del personal.

1. Introduccion

- Entre las principales razones para realizar un estudio de cortocircuito se tienen:
 - Verificación de la adecuada capacidad de interrupción de los equipos instalados. El mismo tipo de estudio formará las bases de la selección de los equipos de interrupción para propósitos de planificación de sistemas.
 - Determinación de los ajustes de los dispositivos de protección, tal cual es hecho primariamente por las cantidades que caracterizan el sistema bajo las condiciones de falla. Esas cantidades también referidas *protection handles*, típicamente incluyen corrientes de fase y secuencia o voltajes y ratas de cambio de voltajes o corrientes en el sistema.

1. Introduction

- Determinación de los efectos de las corrientes de falla en varios componentes del sistema tales como: cables, líneas de transmisión, sistemas de barras (*busways*), transformadores, y reactores, durante el tiempo en que la falla persista. Los esfuerzos mecánicos y térmicos resultantes de las corrientes de falla siempre son comparados con el correspondiente término de corta duración, usualmente de primer ciclo, con la capacidad de los equipos.
- Establecer los efectos de los diferentes tipos de cortocircuito de con variedad de severidad en el voltaje de todo el sistema. Estos estudios identificarán áreas en el sistema que en falla pueden resultar en una depresión inaceptable de voltaje.
- Conceptualización, diseño y refinamiento de los esquemas del sistema, de puesta a tierra del neutro, y puesta a tierra de seguridad.

1. Introduction

- La gran mayoría de los estudios de cortocircuito en sistemas de potencia comerciales y plantas industriales, requiere de uno o más de los siguientes tipos de cortocircuito:
 - *Falla Trifásica (Three-phase fault)*. Puede o no involucrar a tierra. Todas las tres fases son cortocircuitadas juntas.
 - *Falla se una sola línea a tierra (Single line-to-ground fault)*. Cualquiera, pero solo una fase es llevada a tierra.
 - *Falla Línea a Línea (Line-to-Line fault)*. Cualquiera de dos fases son unidas entre sí.
 - *Falla doble línea a tierra (Double Line-to-ground fault)*. Cualquiera de dos fases son conectada entre ellas y tierra.
- Estos tipo de cortocircuito son también denominados *fallas shunt*, debido a que las cuatro exhiben el atributo común de estas asociado con corrientes de falla y MVA que fluyen derivados de una parte diferente desde el sitio pre-falla serie.

1. Introduction

- Otros tipos de condiciones de falla pueden ser de interés, incluidas en las llamadas *fallas series*, y pertenecen a una de los siguientes tipos de sistemas desbalanceados:
 - *Una línea abierta (One line open)*. Una de las tres fases puede estar abierta.
 - *Dos líneas abiertas (Two lines open)*. Dos fases cualquiera de las tres están en abierto.
 - *Impedancias desiguales (Unequal impedances)*. Una discontinuidad de impedancia por una línea desbalanceada.
- El término de *falla serie* es usado debido a que los desbalances envueltos están asociados con una redistribución de la corriente de carga pre-falla.

2. Requerimientos para el Estudio

- Cuando en un sistema eléctrico de potencia se produce una falla por cortocircuito, el valor de la corriente que circula por la red queda determinado por la fuerza electromotriz de las máquinas conectadas al sistema, por sus impedancias y por las impedancias entre las máquinas y el punto de falla.
- El cortocircuito es un fenómeno transitorio interesante, debido a que la corriente que circula inmediatamente después de la falla, la que circula varios ciclos después y la que circula en régimen permanente poseen valores distintos, esto se debe al efecto de la corriente en el rotor sobre el flujo que genera tensión en la máquina; entonces la corriente de cortocircuito varía con relativa lentitud desde el valor inicial hasta el de régimen permanente.

2. Requerimientos para el Estudio

- En general el análisis de un sistema eléctrico de potencia en condiciones de falla requiere de cierta información:
 - Diagrama unifilar del sistema.
 - Diagrama de impedancias (o reactancias).
 - Tipo de falla.
 - Ubicación de la falla.
- El desarrollo de una falla por cortocircuito simétrico balanceado, consta de tres etapas:
- El comportamiento del sistema antes que ocurra la falla, siendo estas las condiciones pre-falla.
- El fenómeno transitorio durante y luego de la ocurrencia de la falla.
- Finalmente la condición estable de la falla, esta es una situación la cual no se debe alcanzar, y es tarea de los sistemas de protección, que la falla nunca alcance régimen permanente.

2. Requerimientos para el Estudio

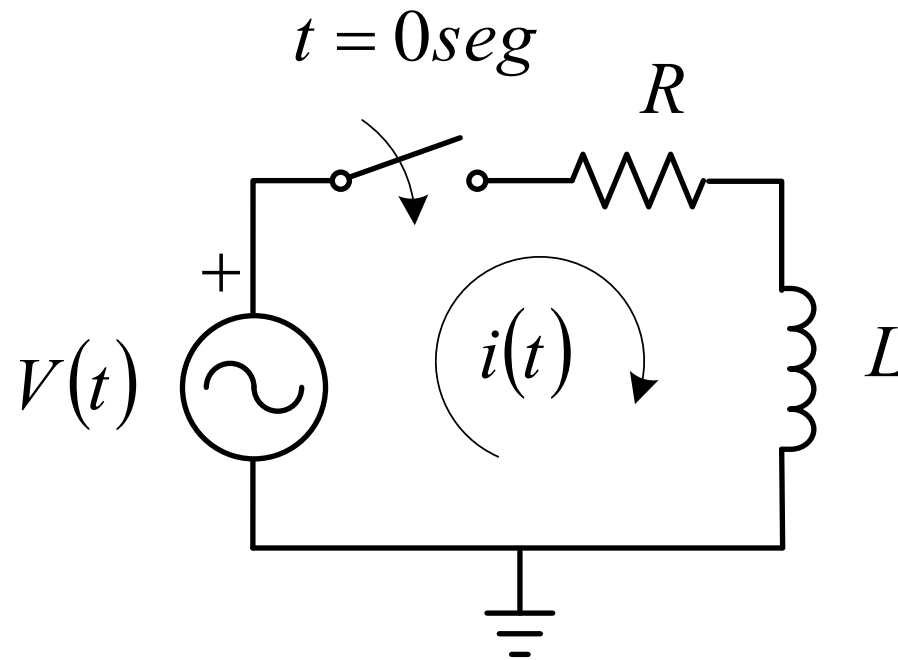
- Los disyuntores dentro de los sistemas de potencia son los elementos encargados de interrumpir el flujo de energía eléctrica en cualquier situación, por ello la selección de un disyuntor no depende únicamente de la corriente que pasa a través del interruptor en condiciones nominales, sino que también de la corriente máxima que tiene que interrumpir, al voltaje de operación de operación.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- Los *disyuntores* son los elementos dentro de los sistemas de potencia encargados de *interrumpir el flujo de energía eléctrica en cualquier situación*.
- La selección de un disyuntor *no depende únicamente de la corriente* que pasa a través del interruptor en *condiciones nominales*.
- También depende de la *corriente máxima que tiene que interrumpir*, al voltaje de operación de operación.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

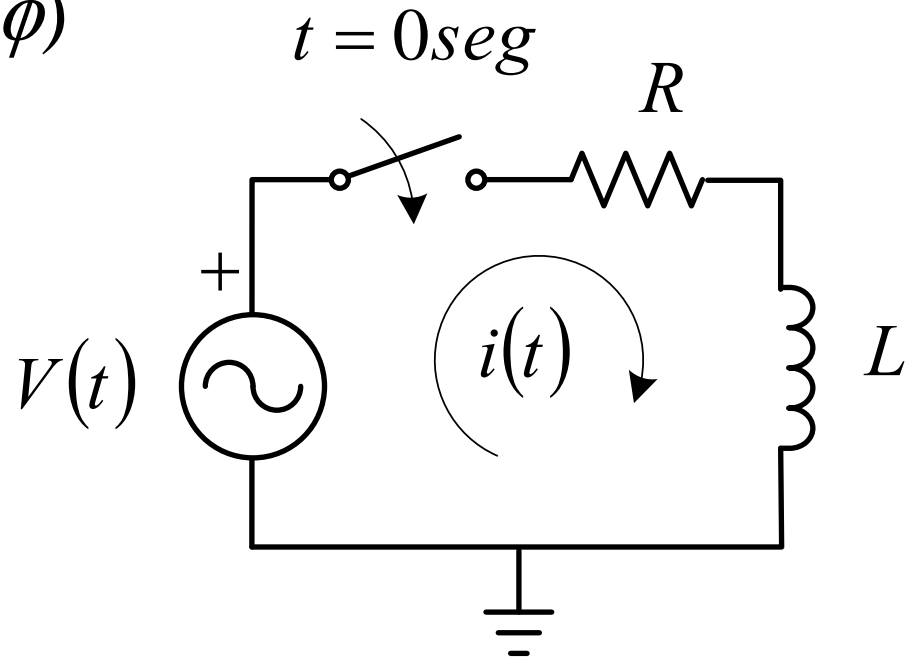
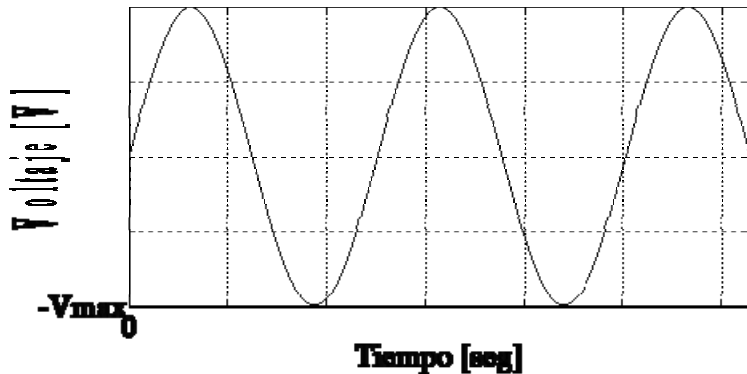
- Para comprender el problema de calcular el valor de la corriente inicial de cortocircuito cuando una máquina sufre un fallo en terminales se analiza el régimen transitorio de un circuito RL serie.



3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

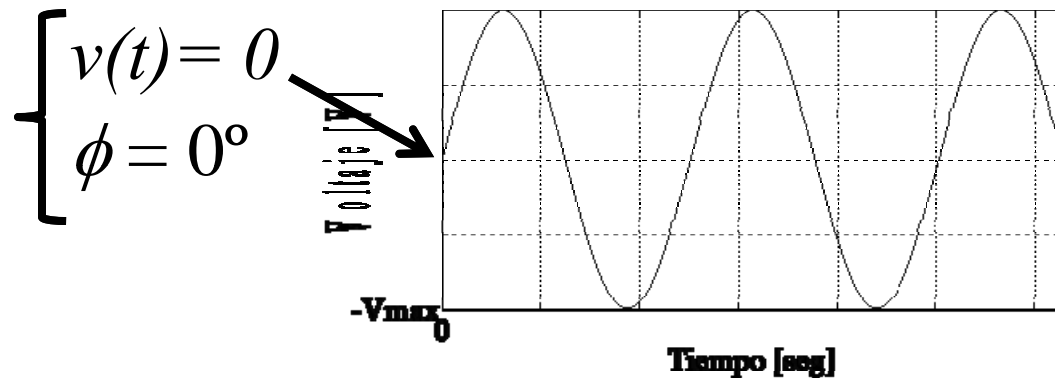
- Suponga un circuito RL serie, al cual se le aplica una tensión alterna $v(t) = V_{max} \text{sen}(\omega t + \phi)$, donde $t = 0$ en el momento de aplicar el voltaje.

$$v(t) = V_{max} \text{sen}(\omega t + \phi)$$



3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- El ángulo ϕ determina el valor del módulo de la tensión al cerrar el circuito.



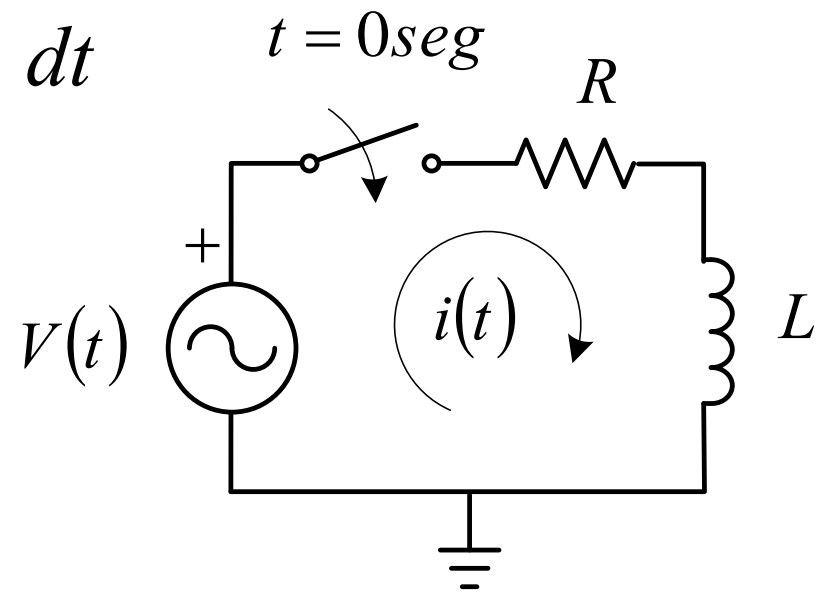
$$\begin{cases} v(t=0) = V_{max} \\ \phi = \pi/2 \end{cases}$$

- Si la tensión instantánea al cerrar el interruptor es cero, entonces $\phi = 0^\circ$.
- Si por el contrario la tensión tiene su valor máximo instantáneo, entonces $\phi = \pi/2$.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- El comportamiento dinámico del circuito puede ser obtenido aplicando la ley de tensiones de Kirchoff, entonces la ecuación diferencial es:

$$V_{\max} \text{sen}(\omega t + \phi) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$



3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- La ley de tensiones de Kirchoff, entonces la ecuación diferencial es:

$$V_{\max} \text{sen}(\omega t + \phi) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

- Esta es una ecuación diferencial lineal ordinaria con coeficientes constantes cuya solución, puede ser obtenida por varios medios:

$$i(t) = \frac{V_{\max} \left[\text{sen}(\omega t + \phi + \theta) - e^{-\frac{R}{L}t} \text{sen}(\phi - \theta) \right]}{Z}$$

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- La solución, puede ser obtenida por varios medios:

$$i(t) = \frac{V_{\max} \left[\text{sen}(\omega t + \phi + \theta) - e^{-\frac{R}{L}} \text{sen}(\phi - \theta) \right]}{Z}$$

donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \\ \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \end{array} \right.$$

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

$$i(t) = \frac{V_{\max} \left[\text{sen}(\omega t + \phi + \theta) - e^{-\frac{R}{L}t} \text{sen}(\phi - \theta) \right]}{Z}$$

- La expresión de la corriente en régimen transitorio de este circuito puede ser escrita como la suma de dos términos:

$$i(t) = i_p(t) + i_T(t)$$

$i_p(t)$, corresponde a la *componente en régimen permanente o componente alterna*, que varía sinusoidalmente en el tiempo.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi - \theta) - \frac{V_{\max}}{Z} e^{-\frac{R}{L}t} \operatorname{sen}(\phi - \theta)$$

$$i(t) = i_p(t) + i_T(t)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_p(t) = \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi - \theta) \\ i_T(t) = -\frac{V_{\max}}{Z} e^{-\frac{R}{L}t} \operatorname{sen}(\phi - \theta) \end{array} \right.$$

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

$$i(t) = i_p(t) + i_T(t)$$

$i_p(t)$, corresponde a la *componente en régimen permanente o componente alterna*, que varía sinusoidalmente en el tiempo.

- Este término alterno y periódico es el valor en régimen permanente de la corriente para un circuito *RL* para la tensión aplicada.

$i_T(t)$, se le denomina *componente transitoria o continua*, la cual es aperiódica y disminuye exponencialmente con una constante de tiempo R/L .

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- Si en $t = 0$, el valor de la *componente de régimen permanente no es cero*.
- Aparece una componente transitoria en la solución, para satisfacer la condición física de que la corriente debe ser cero $i(t = 0) = 0$, en el instante de cerrar el interruptor $t = 0^+$.

$$i_T(t) = \frac{V_{\max} \operatorname{sen}(\phi - \theta)}{|Z|}$$

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- La componente transitoria es nula si en el instante de cierre del interruptor, el punto de voltaje esta en $\phi - \theta = 0$ o cuando $\phi - \theta = \pi$.

- Por el contrario si el cierre del interruptor tiene lugar en un instante tal que de la onda de voltaje:

$$\phi - \theta = \frac{\pi}{2}$$

- En este caso la componente transitoria tiene un valor inicial máximo y posee un valor igual al valor máximo de la componente de régimen permanente ($\sqrt{2}I_{ca}$).

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

$$i_T(t) = \frac{V_{\max}}{|Z|}$$

$$\phi - \theta = \frac{\pi}{2}$$

- La componente transitoria o continua posee un límite en sus valores, que tienen como máximo $\sqrt{2}I_{ca}$ siendo I_{ca} la componente de régimen permanente o componente de corriente alterna.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

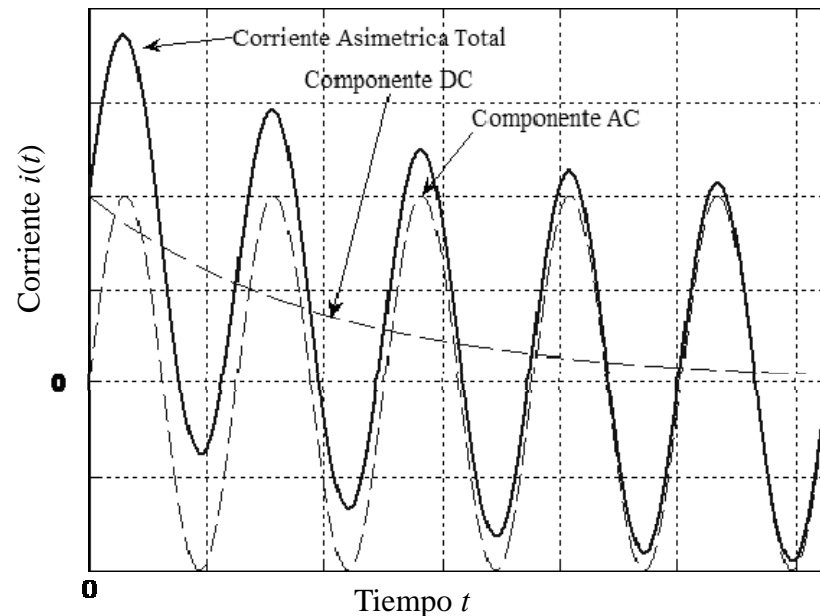
- La componente de régimen permanente o componente de corriente alterna, y como mínimo cero, estos valores límites para la componente transitoria o continua, surgen del hecho de los posibles valores instantáneos de la tensión en el instante de cierre del interruptor y del factor de potencia del circuito.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- La componente transitoria o continua posee un límite en sus valores, que tienen como máximo $\sqrt{2}I_{ca}$ siendo I_{ca} la componente de régimen permanente o componente de corriente alterna, y como mínimo cero, estos valores límites para la componente transitoria o continua, surgen del hecho de los posibles valores instantáneos de la tensión en el instante de cierre del interruptor y del factor de potencia del circuito.

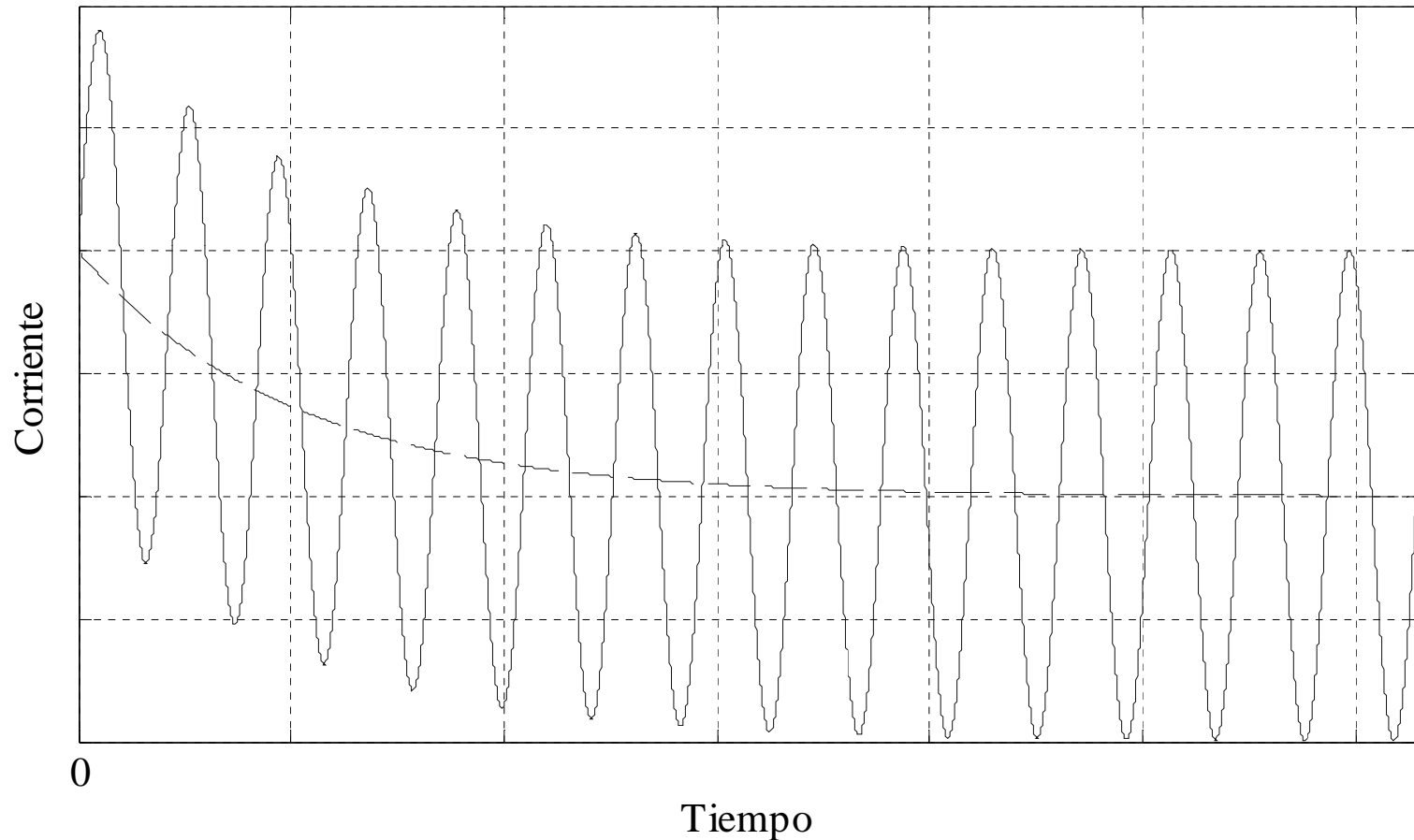
3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- La corriente $i(t)$ que circula por el circuito RL serie, posee una asimetría producto de la componente continua que aparece
- la corriente solo puede ser simétrica para cualquier tiempo solo si la componente transitoria es cero.



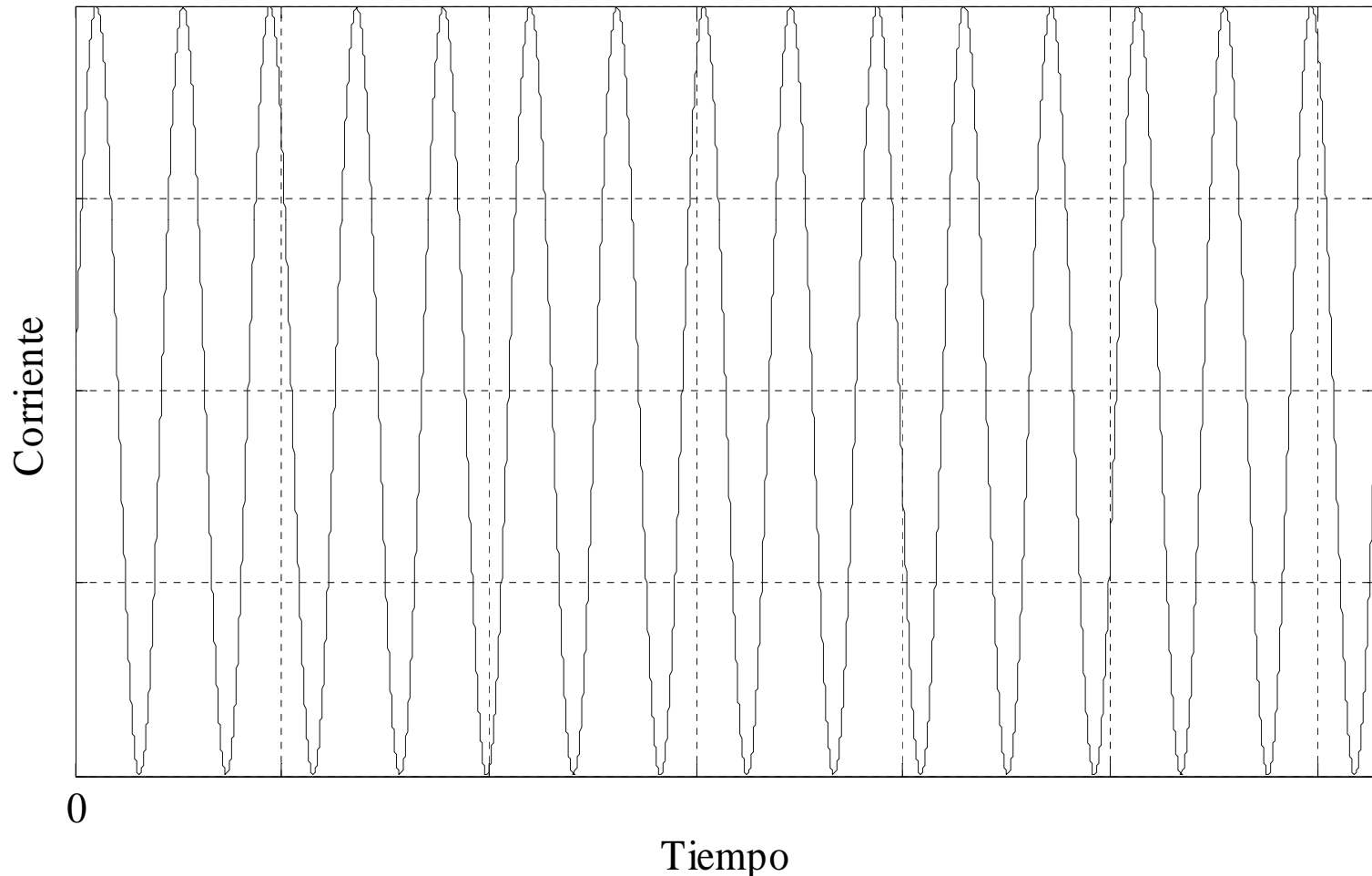
3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

Máxima componente continúa



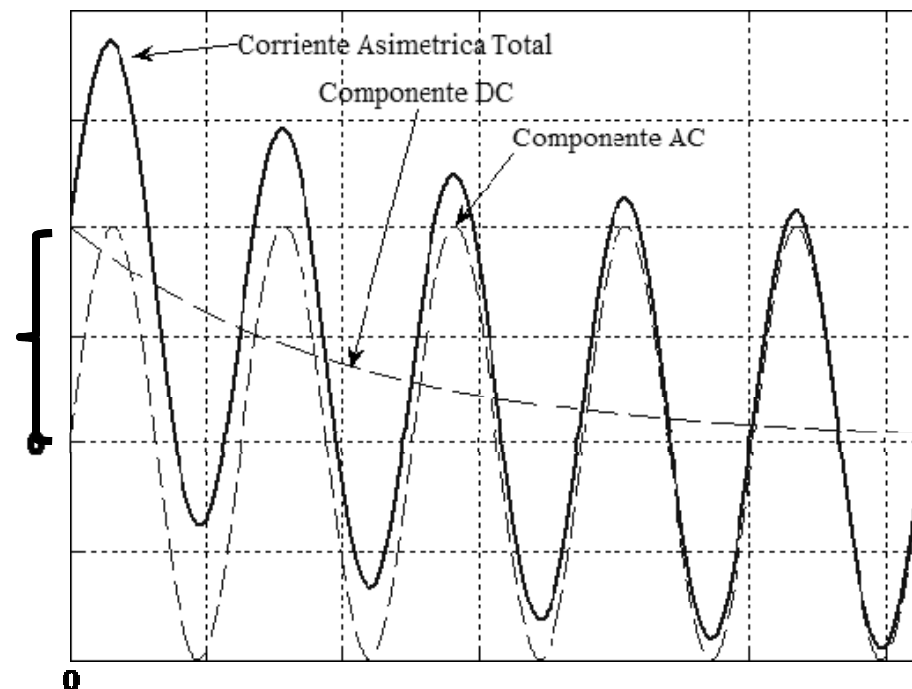
3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

Sin componente de continua



3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- En el instante de cierre del circuito la componente alterna y continua tienen siempre el mismo valor absoluto, pero de signo contrario, por que en el instante de cierre debe ser igual a cero.



3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- Los generadores eléctricos de corriente alterna (alternador), opera a partir de un campo magnético giratorio que genera una tensión en los devanados inducidos los cuales poseen resistencia e inductancia.
- Cuando un alternador es sometido súbitamente a un cortocircuito, la corriente que por él circula, es similar a la que se hace presente en un circuito RL serie.

3. Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

- Se debe realizar la salvedad que el fenómeno transitorio en un alternador, posee similitud al ocurrido en el circuito RL serie, pero existen tremendas diferencias, debido a que la corriente en el inducido afecta al campo giratorio, por lo cual si bien es cierto que los fenómenos poseen semejanzas no se deben confundir.

Cortocircuito en Máquina Síncrona

- La conversión de energía por procedimientos electromagnéticos está relacionada con el *almacenamiento de energía en los campos magnéticos*.
- Cuando se produce un cambio en las condiciones operativas ya sea por falla o régimen transitorio, *no son posible las correspondientes variaciones en la energía magnética almacenada ocurran instantáneamente*.
- Debe transcurrir cierto periodo transitorio hasta que se estabiliza la situación en las nuevas condiciones impuestas.

Cortocircuito en Máquina Síncrona

- Es muy frecuente que se deba tener presente la liberación o absorción de energía por parte de las masas en movimiento además de la correspondiente a los campos magnéticos
- Se deben considerar *transitorios electromecánicos* más los *transitorios eléctricos*.

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- Un alternador operando en vacío que es sometido súbitamente a un cortocircuito en sus terminales, puede estudiarse de una manera excelente, realizando oscilogramas de las corrientes de cada fase al presentarse el fallo.
- La componente transitoria o continua de una máquina sincrónica puede ser expresada como:

$$i(t) = Ke^{\frac{-t}{\tau_a}}$$

τ_a : es la constante de tiempo de la armadura, por lo general vale 9 ciclos (a frecuencia industrial).

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

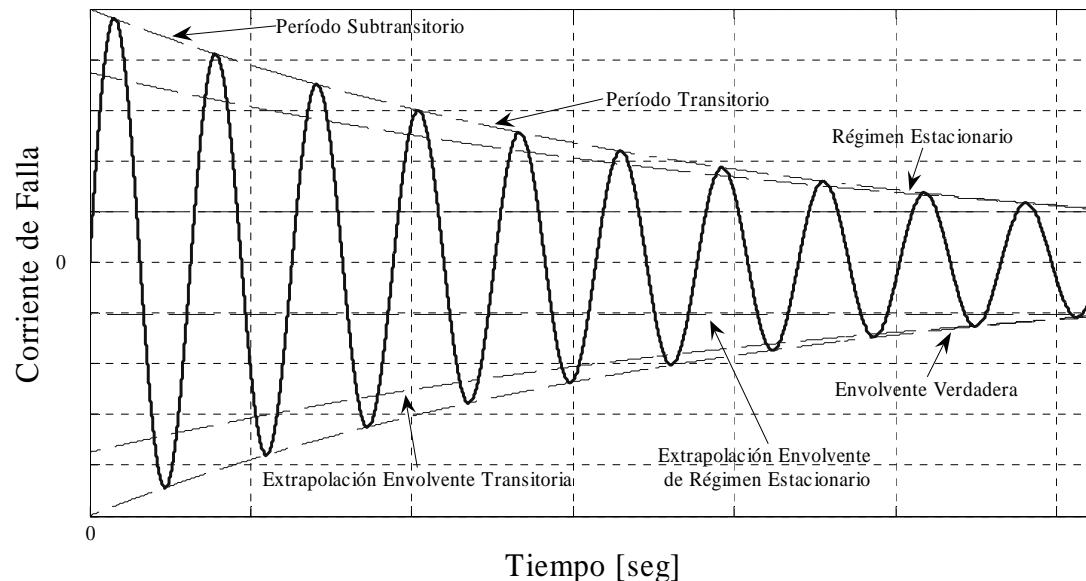
- Las reactancias que se estudian en el fenómeno de cortocircuito en una máquina síncrona, se denominan *reactancias de eje directo*
- Proviene del hecho que la *resistencia del inductor es muy pequeña*.
- En cortocircuito la corriente de fallo solo es limitada por la reactancia de la máquina, con lo que la corriente atrasa en un ángulo grande, (90°) a la tensión generada en vacío.

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

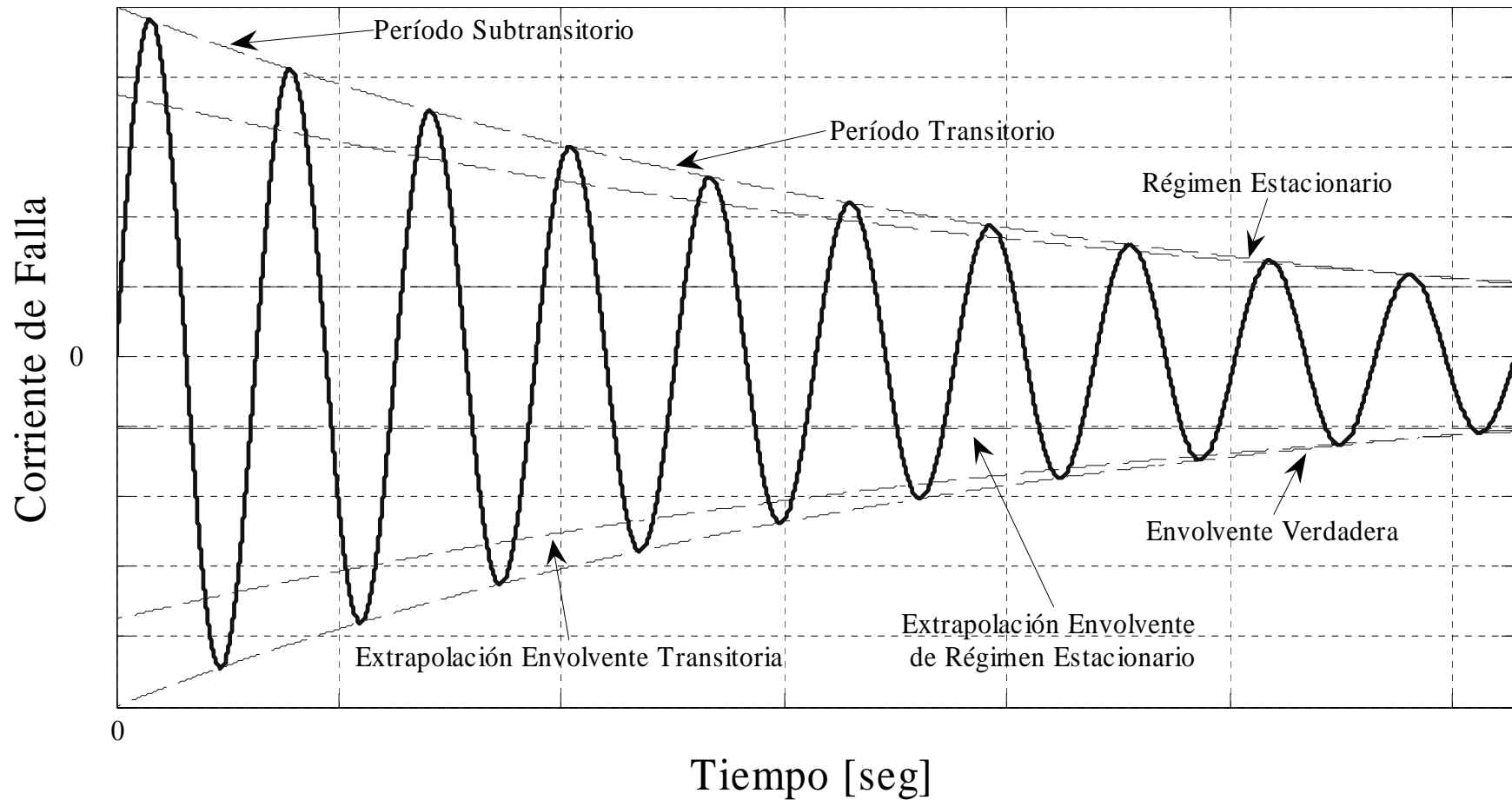
- La *reactancia de cuadratura* se suele utilizar las caídas de tensión originadas por aquella componente de la corriente en el inducido en cuadratura.
- El termino *cuadratura* proviene del hecho de *descomponer el flujo de reacción del inducido en dos ejes, un directo y otro de cuadratura.*

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- El fenómeno de cortocircuito se suele dividir en tres etapas:
 - Período Subtransitorio
 - Período Transitorio
 - Período Permanente

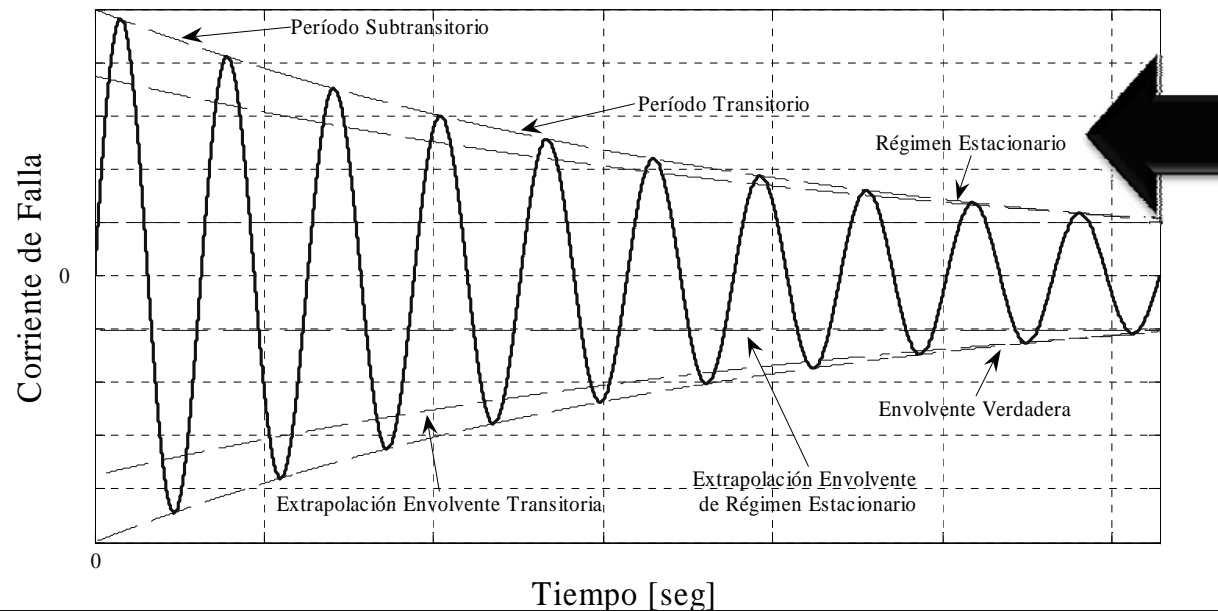


Corriente de Cortocircuito y Reactancias



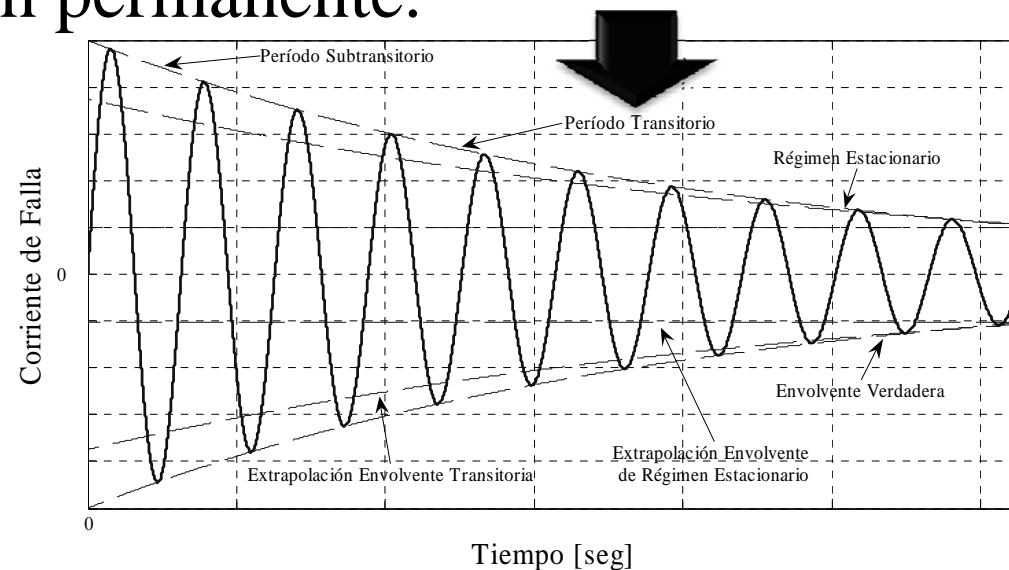
Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- El *régimen permanente* corresponde a las magnitudes de la corriente una vez que ha transcurrido mucho tiempo luego del cortocircuito.
- Se caracteriza porque los valores de corriente son los menores en magnitud de todo el fenómeno.



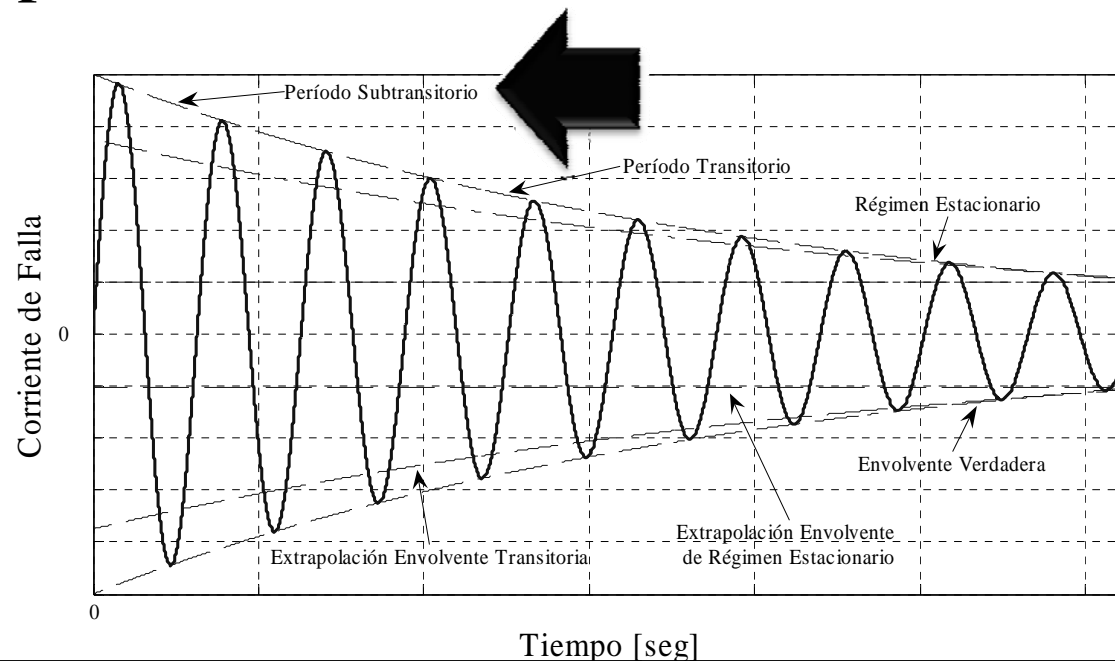
Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- El *período transitorio* corresponde al comportamiento de la corriente desde varios ciclos luego del cortocircuito hasta que se alcanza el régimen permanente.
- Los valores de las corrientes son más severos que las de régimen permanente.



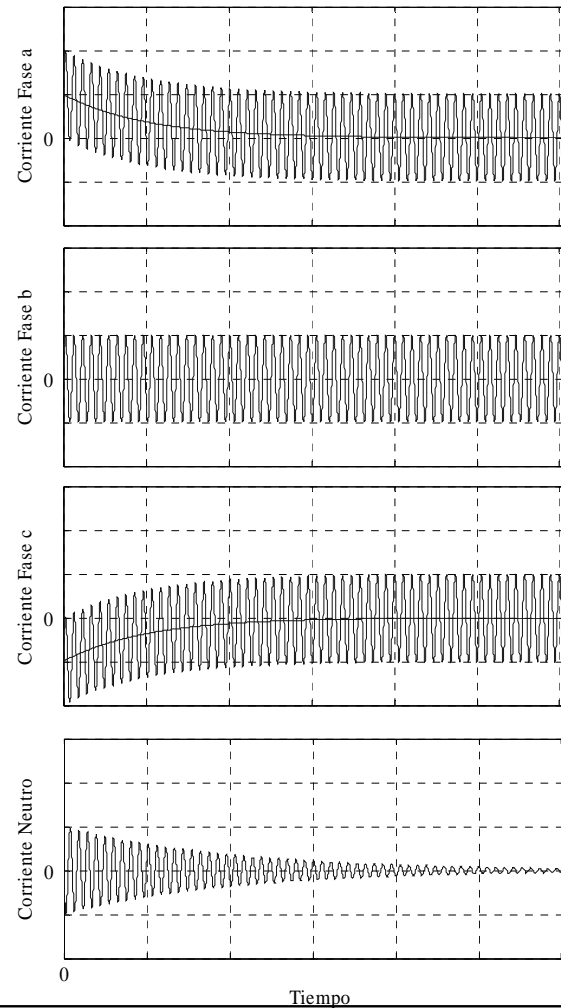
Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- El *período subtransitorio* es el más severo en los valores de las magnitudes de corrientes, tiene una duración muy corta, no mayor a varios ciclos, pero los efectos de las magnitudes de corrientes en este periodo pueden ser devastadores.



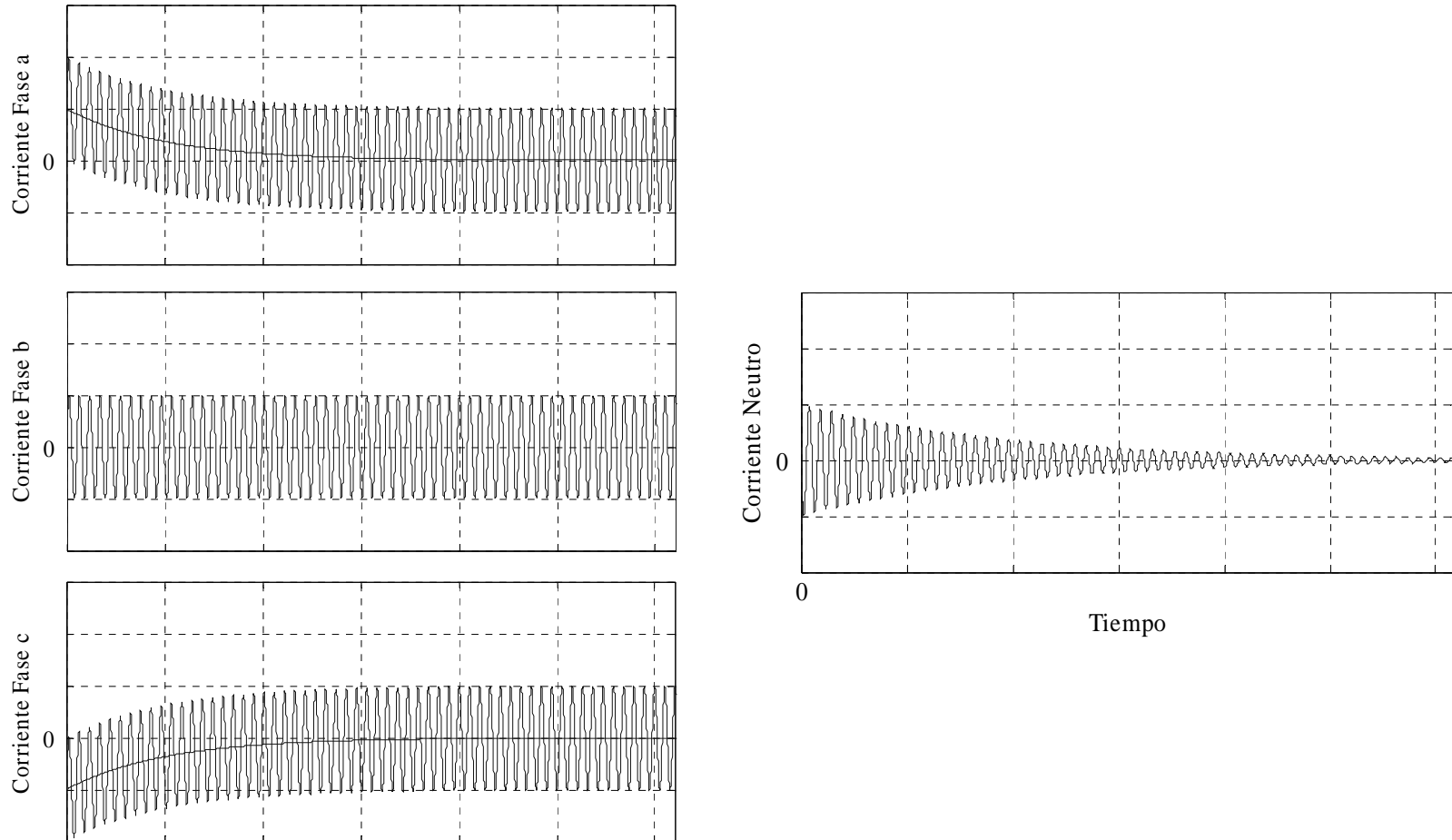
Corriente de Cortocircuito y Reactancias

Oscilograma de la corriente de cortocircuito en un generador sincrónico



Corriente de Cortocircuito y Reactancias

Oscilograma de la corriente de cortocircuito en un generador sincrónico



Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- La división del fenómeno en estos tres periodos obedece a la *disipación de energía del campo de la máquina es de forma logarítmica*.
- Cada *periodo corresponde a una constante de tiempo* asociada a la disipación de dicha energía.
- Las *tres constantes de tiempo involucradas* en el fenómeno de cortocircuito son respectivamente:
 - Constante Subtransitoria Longitudinal (τ''_d)
 - Constante Transitoria Longitudinal (τ'_d)
 - Constante de Régimen Longitudinal (τ_d)

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- La *reactancia sincrónica* del alternador o *reactancia sincrónica directa* X_d , de un alternador se define como la relación de la tensión en vacío de la máquina E entre el valor de la corriente I en régimen permanente.
- La *constante de tiempo transitoria longitudinal* τ'_d , determina la amortiguación de la onda de corriente mediante una envolvente exponencial.

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- La *reactancia transitoria directa* X'_d , se define como la relación entre la tensión en vacío de la máquina E y la corriente transitoria de eje directo.
- La *parte más dañina del cortocircuito es el periodo subtransitorio* cuya duración es muy corta escasamente alcanza los ocho ciclos.
- Las magnitudes de las corrientes son muy elevadas y caracterizadas por una elevada amortiguación, producto de una envolvente muy pronunciada gobernada por la *constante de tiempo longitudinal subtransitoria* (τ''_d).

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- La *reactancia Subtransitoria directa* X''_d se define como el cociente de la tensión en terminales en vacío de la máquina E , entre la corriente de régimen subtransitoria de cortocircuito I'' .

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- El código de ensayos de la IEEE para máquinas sincrónicas, describe diversos procedimientos para medir X''_d uno de los cuales se basa en conectar el arrollamiento de excitación en cortocircuito y se aplica una tensión monofásica a dos devanados de fase del circuito en serie (conectados para un desplazamiento de fase de 120°).

Corriente de Cortocircuito y Reactancias

- Se procede a bloquear el rotor en la posición angular para máxima corriente inducida.
- Entonces la reactancia subtransitoria X''_d , es igual a la mitad de la tensión aplicada dividida por la corriente resultante del inducido.

Componente Simétrica de la Corriente de Falla I_{ca}

- Resulta de restar a la corriente total de falla, la componente continúa o transitoria, esta componente simétrica es igual para las tres fases y no depende del instante en que ocurre la falla.
- En el momento del cortocircuito el flujo en el entrehierro es mayor que unos pocos ciclos después, la reducción en el flujo se debe a la F.M.M de reacción del inducido, pero es necesario un cierto tiempo para que se produzca esta reducción en el flujo magnético de la máquina (consecuencia directa de la ley de flujo constante) y esta disminución produce una reducción en la corriente (la F.E.M.

Efecto del Regulador de Voltaje

- Los generadores están equipados con un regulador automático de voltaje.
- Su tarea es controlar la corriente de excitación del generador de manera de mantener la tensión en terminales con amplitud constante e igual a un valor prefijado.

Efecto del Regulador de Voltaje

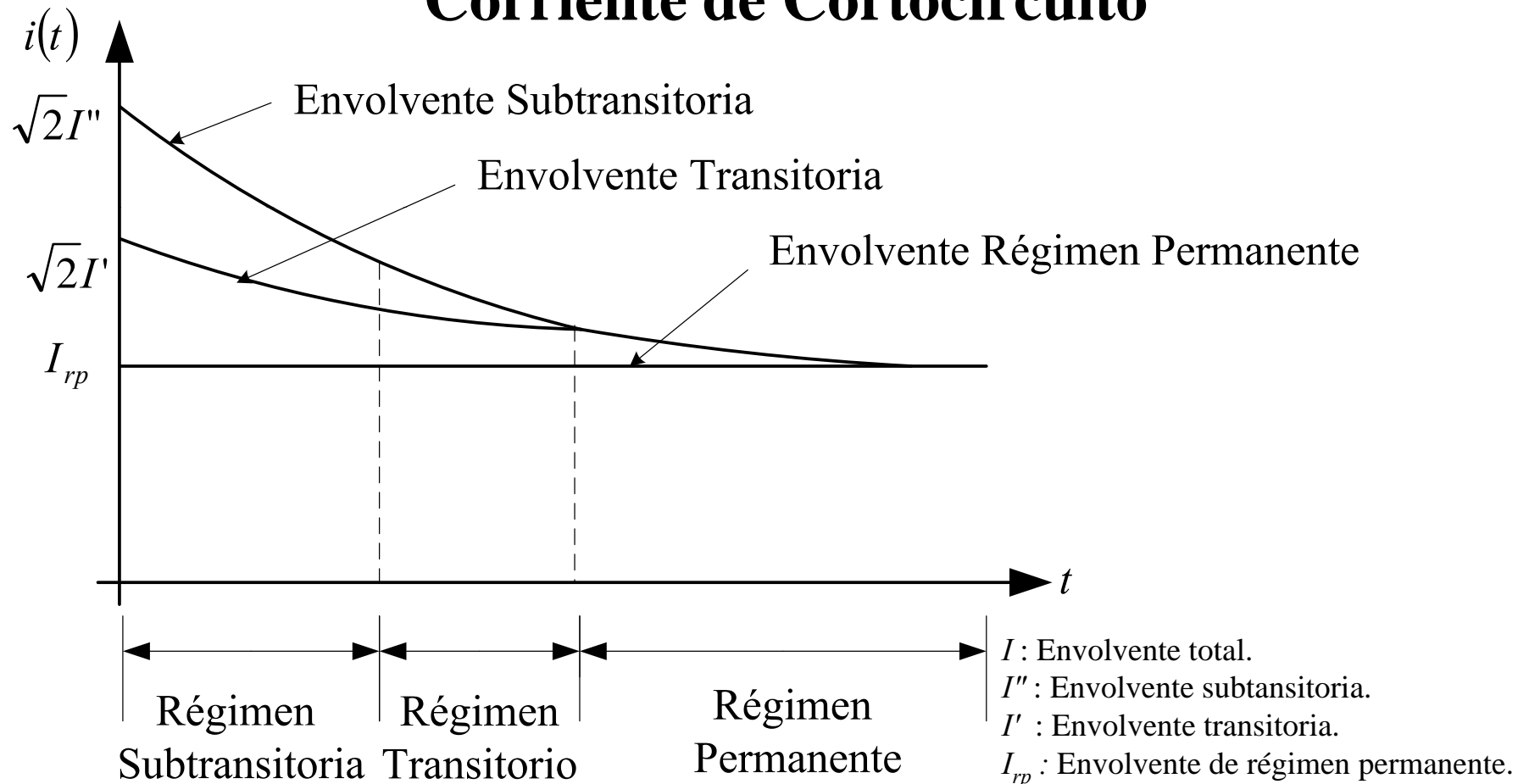
- En un cortocircuito en un generador, el voltaje en terminales se hace cero, pero el regulador intentara recuperar o restablecer la tensión aumentando la corriente de excitación, (siempre y cuando las protecciones no actúen)
- Se produce un aumento en la tensión interna de la máquina, lo cual hace que la corriente de cortocircuito aumente.

Efecto del Regulador de Voltaje

- Debido a las constantes de tiempo asociadas, la velocidad de respuesta es muy baja, por lo cual no será hasta unos 20 ciclos después que se note el efecto del regulador en el valor de la corriente de falla (los reguladores modernos de tipo electrónico son más rápidos).
- En el estudio de cortocircuito interesan las condiciones de falla los primeros ciclos, por lo que el efecto de los reguladores de tensión puede ser ignorado.
-

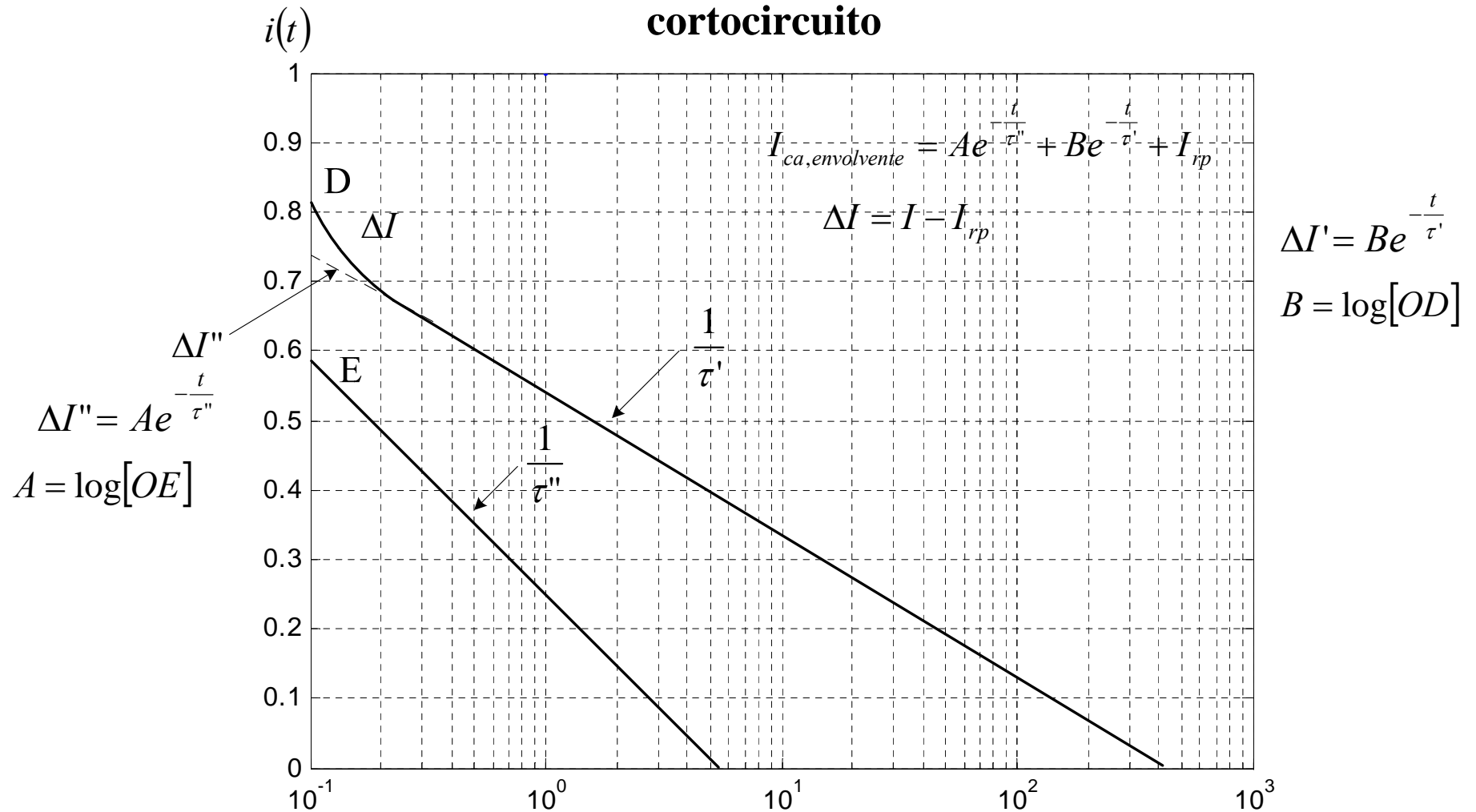
Corriente de Falla

Envolvente de la Componente Simétrica de la Corriente de Cortocircuito



Corriente de Falla

Gráfica en forma semilogarítmica de las componentes de la corriente de cortocircuito



Componente de Doble Frecuencia de la Corriente de Falla

- Las componentes de *corriente directa* presentes en las corrientes del estator, producen una *F.M.M* en el entrehierro que es *unidireccional* y *fija* en el espacio.
- El circuito de excitación atraviesa el campo producido por esta *F.M.M.* induciéndose una *corriente de doble frecuencia fundamental* (60Hz)
- La corriente de frecuencia fundamental en el rotor produce un campo el cual puede estudiar como si estuvieran *dos campos girando en sentido contrario a la velocidad sincrónica respecto al rotor.*

Componente de Doble Frecuencia de la Corriente de Falla

- Visto desde el estator el sentido contrario se ve estático, como si *girara la componente al doble de la velocidad sincrónica*.
- El *campo estático se opone al campo producido por las corrientes de componente continua*.
- El campo que gira produce corrientes de doble frecuencia en el estator.

Componente de Doble Frecuencia de la Corriente de Falla

- Los armónicos debidos a corrientes de frecuencia fundamental en el rotor son pequeños, y si la falla es un punto alejado de la máquina, son más reducidos;
- *La componente de doble frecuencia de la corriente de cortocircuito en los estudios de falla normalmente se desprecia.*

$$I_{Falla} = I_{ca} + I_{cd} + I_{2a}$$

Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

- Se conoce que el comportamiento transitorio del alternador, siendo la corriente de armadura dada por:

$$I_{Falla} = I_{ca} + I_{cd} + I_{2a}$$

en donde:

$$I_{cd} = \frac{\sqrt{2}E}{2} \left[\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_d} \right] \text{sen} \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I_{ca} = \sqrt{2}E \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{\frac{-t}{\tau''}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{\tau'}} + \frac{1}{X_d} \right] \text{sen} \left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I_{2a} = \frac{\sqrt{2}E}{2} \left[\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] e^{\frac{-t}{\tau_a}} \text{sen} \left(2\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

$$I_{Falla} = I_{ca} + I_{cd} + I_{2a}$$

$$I_{cd} = \frac{\sqrt{2}E}{2} \left[\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_d} \right] \text{sen} \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I_{ca} = \sqrt{2}E \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{\frac{-t}{\tau''}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{\tau'}} + \frac{1}{X_d} \right] \text{sen} \left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I_{2a} = \frac{\sqrt{2}E}{2} \left[\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] e^{\frac{-t}{\tau_a}} \text{sen} \left(2\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)$$

τ_a : Constante de tiempo del circuito de armadura.

τ'' : Constante de tiempo subtransitoria según el eje directo.

τ' : Constante de tiempo transitoria según el eje directo.

X''_d : Reactancia Subtransitoria según el eje directo.

X_d : Reactancia Sincrónica según el eje directo.

X'_d : Reactancia Transitoria según el eje directo.

X''_g : Reactancia subtransitoria según el eje en cuadratura

Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

- La envolvente de la componente de corriente alterna viene dada por:

$$I_{ca,envolvente} = Ae^{-\frac{t}{\tau''}} + Be^{-\frac{t}{\tau'}} + i_{rp}$$

donde:

$$A = \frac{\sqrt{2}E}{\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right)} \quad B = \frac{\sqrt{2}E}{\left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right)}$$

$$i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X_d}$$

Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

- En la ecuación de la corriente de cortocircuito en una máquina en vacío, se debe cumplir que la corriente en $t = 0$ es igual a la corriente Subtransitoria:

$$I_{ca,envolvente}(t = 0) = A + B + i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X''_d} \sqrt{2}I''$$

$$I'' = \frac{E}{X''_d}$$

- Esta corriente puede ser interpretada como el valor eficaz del fasor que representa la corriente de falla, si la envolvente se mantiene constante en su valor inicial correspondiente a $t = 0^+$.

Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

- Una vez que se extingue el período Subtransitorio entra en juego el período transitorio y para el cual se cumple:

$$I_{ca,envolvente}(t=0) = B + i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X'_d} \sqrt{2}I'$$

$$I' = \frac{E}{X'_d}$$

- La interpretación de esta corriente es como el valor eficaz del fasor que representa la corriente de falla sino existiera el periodo Subtransitorio, y el valor de la envolvente obtenido por la extrapolación de la envolvente transitoria en $t=0^+$ se mantuviese constante.

Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

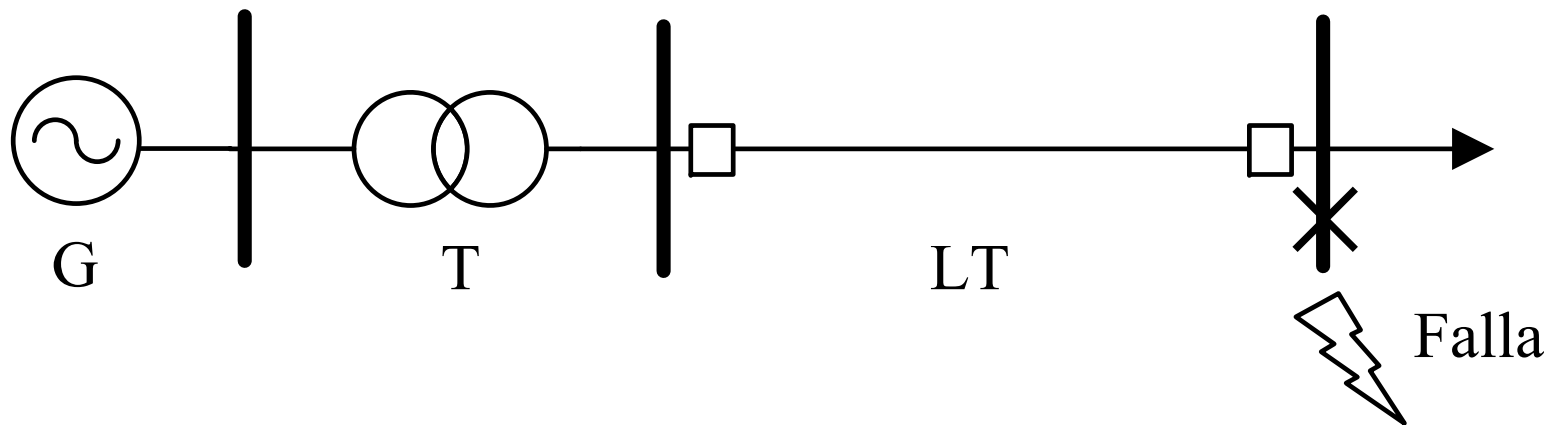
- Por último se obtiene el valor de la corriente en régimen permanente de cortocircuito.

$$i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X_d} \sqrt{2}I_{rp}$$

$$I_{rp} = \frac{E}{X_d}$$

Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

- El estudio realizado a un generador que es sometido repentinamente a un cortocircuito trifásico en los terminales, es muy similar al fenómeno que ocurre cuando la falla se sucede a través de una impedancia externa.

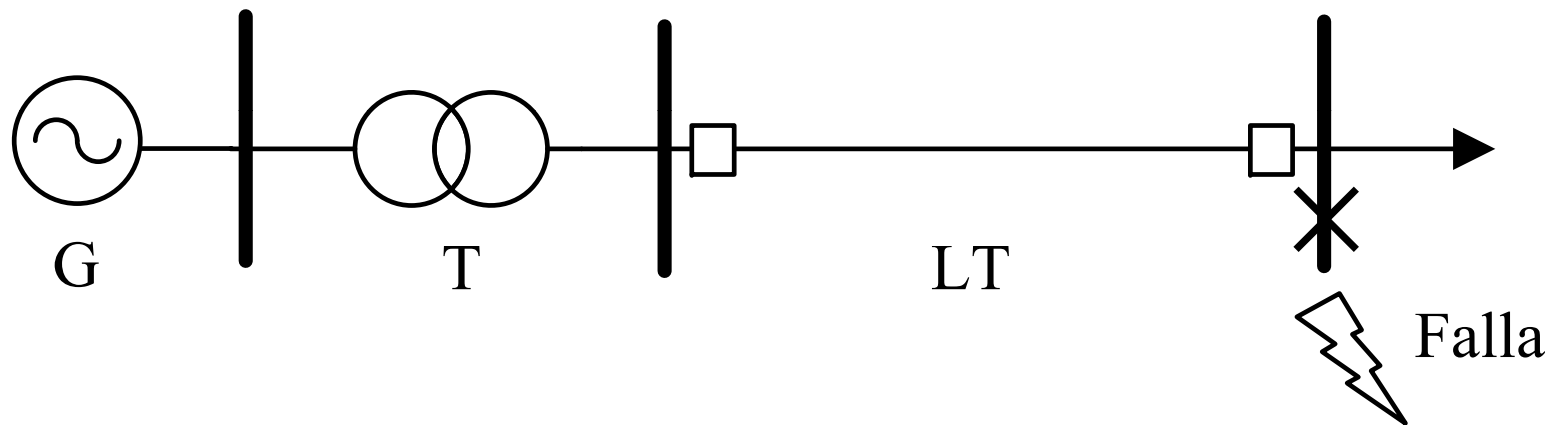


Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

- Supóngase un alternador sincrónico, que se encuentra impulsado a su velocidad nominal y excitado para obtener en terminales la tensión nominal.
- Súbitamente se acontece una falla a través de una impedancia externa $Z_e = R_e + jX_e$, en este caso si se considera que la resistencia externa es muy pequeña comparada con la reactancia,
- Se puede considerar simplemente la reactancia externa X_e , como parte de la reactancia de dispersión del estator de la máquina, modificando las reactancias de la siguiente manera.

Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

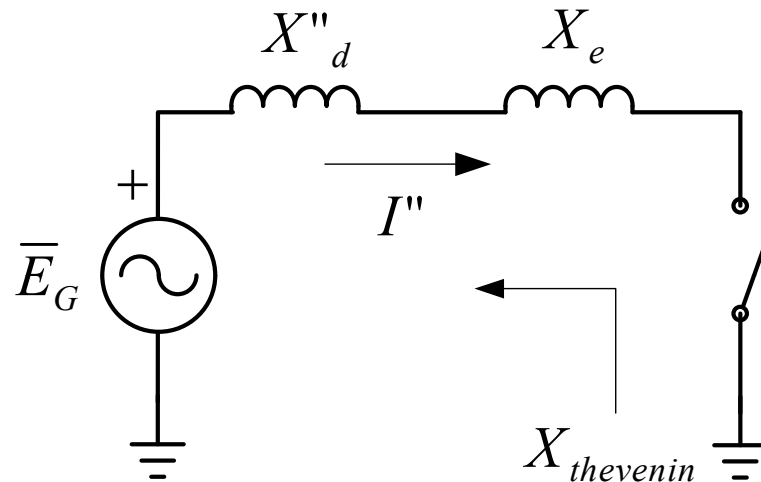
Esquema de un generador alimentando por medio de un transformador una carga, en la que sucede un cortocircuito



$$I_{caemvolute} = \sqrt{2}E \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_q} \right) e^{\frac{-t}{\tau''}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{\tau'}} + \frac{1}{X_d} \right]$$

Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

- *Condición Subtransitoria:*



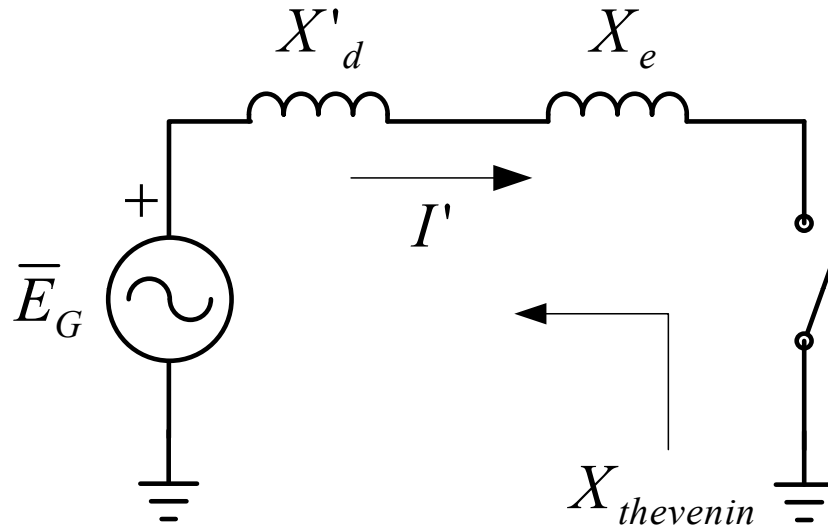
Modelo equivalente de un generador con una carga externa en condiciones subtransitorias

$$I'' = \frac{E_g}{X''_d + X_e}$$

$$X_{Thevenin} = X''_d + X_e$$

Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

- *Condición Transitoria*



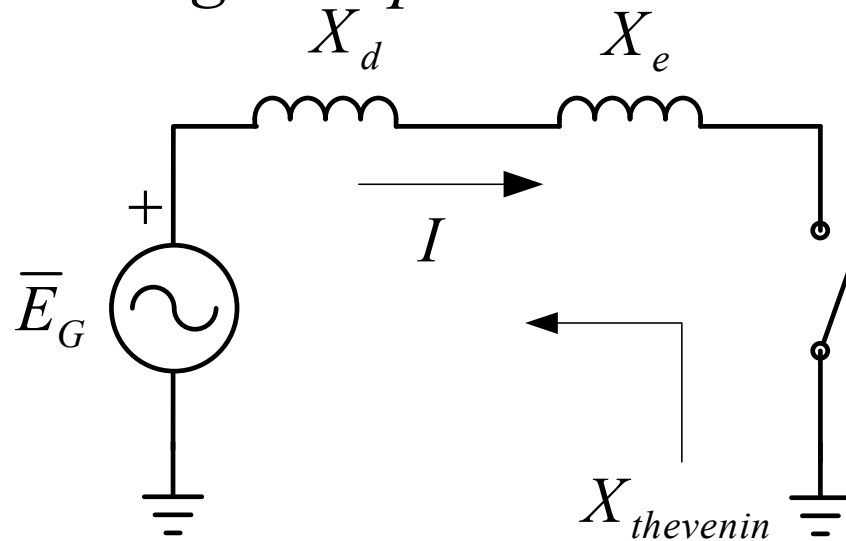
Modelo equivalente de un generador con una carga externa en condiciones transitorias

$$I' = \frac{E_g}{X'_d + X_e}$$

$$X_{Thevenin} = X'_d + X_e$$

Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

- *Condición de régimen permanente*



Modelo equivalente de un generador con una carga externa en condiciones de régimen permanente

$$I = \frac{E_g}{X_d + X_e}$$

$$X_{Thevenin} = X_d + X_e$$

Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

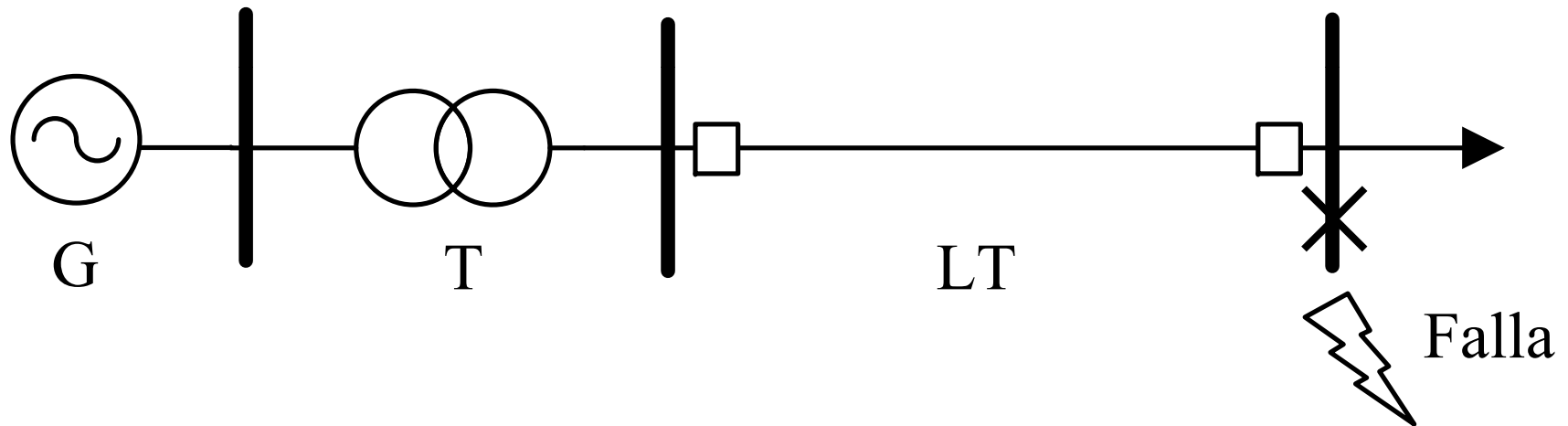
- La parte resistiva de la impedancia externa conectada al generador en el momento del cortocircuito trifásico, realiza una modificación de las constantes de tiempo τ''_d , τ'_d , τ_d , etc.
- Las nuevas constantes de tiempo son obtenidas realizando un cambio similar, se sustituye la resistencia de la armadura por una equivalente que contempla esta última y la resistencia externa.

Cortocircuito Trifásico en un Alternador Sincrónico Bajo Carga

- Las fallas de los generadores en vacío (sin carga) es una situación de muy poca ocurrencia -aunque es educativo-.
- Los cortocircuitos en las máquinas suceden en operación, sufriendo una determinada potencia al sistema.
- El comportamiento del alternador durante un cortocircuito trifásico que se encuentra operando bajo carga es básicamente el mismo desde el punto de vista de circuito eléctrico y magnético, que la misma situación pero el alternador en vacío.

Cortocircuito Trifásico en un Alternador Sincrónico Bajo Carga

Esquema de un generador alimentando por medio de un transformador una carga, en la que sucede un cortocircuito



Cortocircuito Trifásico en un Alternador Sincrónico Bajo Carga

- El análisis de un alternador que se somete a un cortocircuito trifásico súbitamente, estando en operación con carga, resulta un estudio bastante complicado, siendo la expresión de la corriente en función del tiempo resultan sumamente engorrosas, y están fuera de este curso.
- En los casos en que se requiera un conocimiento respecto de la envolvente de la corriente simétrica de cortocircuito en función del tiempo, se suele utilizar bajo ciertas "aproximaciones" la expresión de la corriente de falla del generador en vacío.

Cortocircuito Trifásico en un Alternador Sincrónico Bajo Carga

- Para el estudio de las condiciones de las corrientes transitorias en un alternador en condiciones de cortocircuito trifásico, existen dos métodos:
 - Método de la F.E.M.
 - Método de Thevenin.

ELC-30514
Sistemas de Potencia I

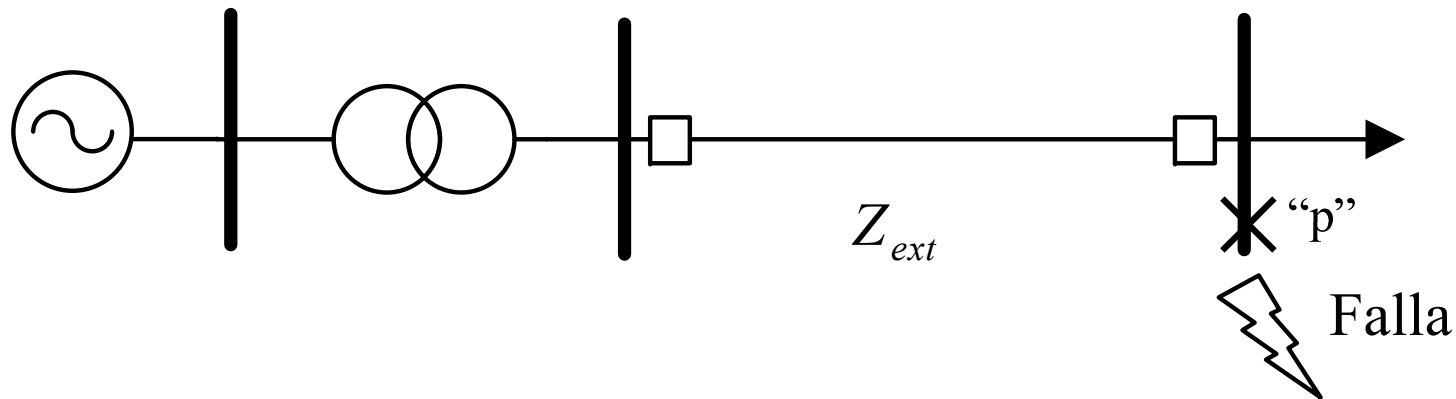
Método de la Fuerza
Electromotriz Inducida

Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- Para comprender el método, se hará a partir del análisis simplista de la situación particular.
- Considérese un alternador sincrónico (que se considera por simplicidad de rotor liso) el cual alimenta a una cierta carga estática Z_{load} , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar Z_{ext} , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga Z_{load} .

Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- Considérese un alternador sincrónico el cual alimenta a una cierta carga estática Z_{load} , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar Z_{ext} , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga Z_{load} .

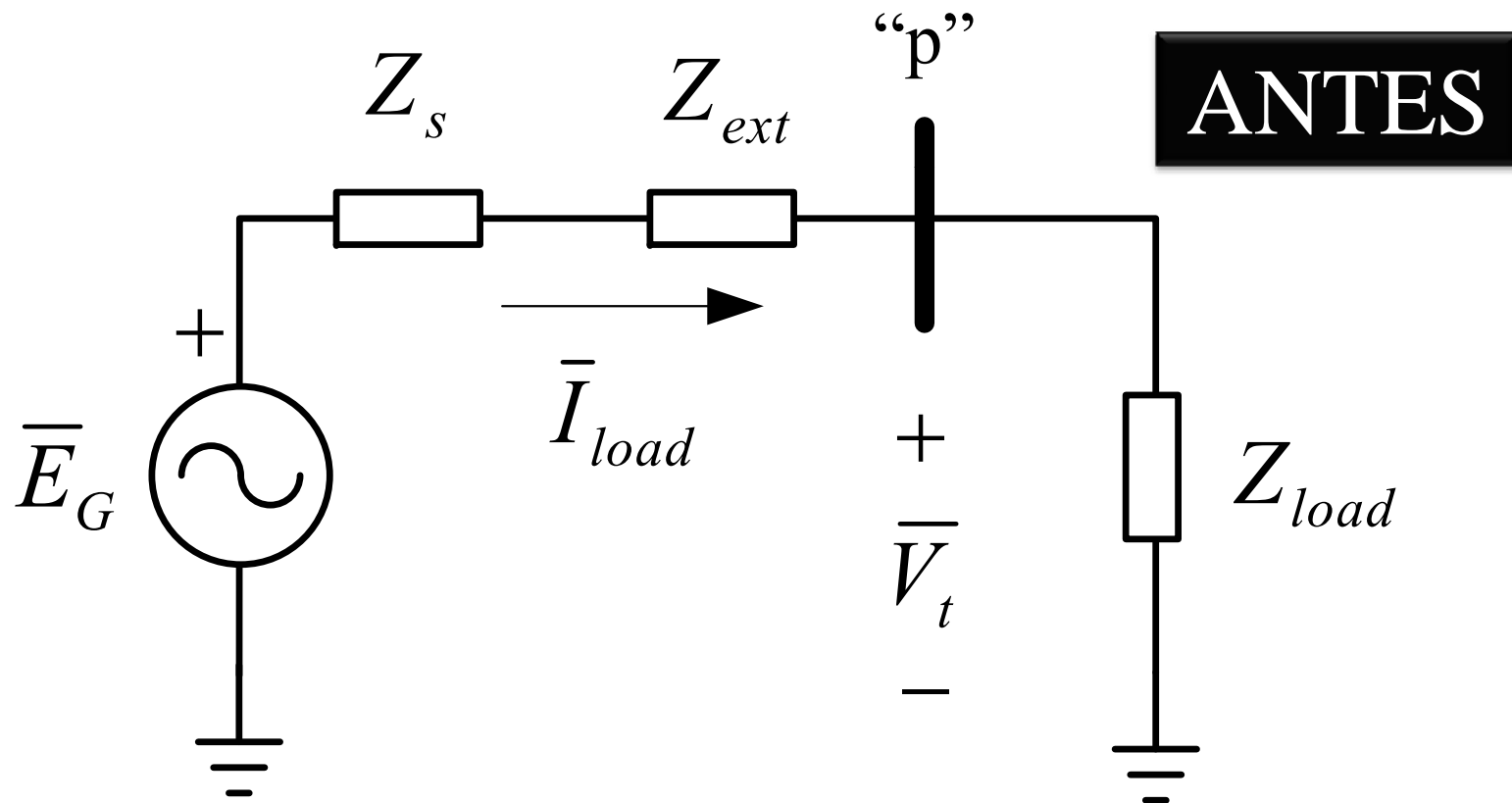


Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- En estas circunstancias se han de entender y diferenciar perfectamente dos situaciones:
- ANTES de la falla, en la cual el generador se encuentra suministrando energía en forma estable a la carga trifásica equilibrada Z_{load} , y
- DURANTE la falla en la que se pone de manifiesto el régimen transitorio del cortocircuito (evidenciando sus tres períodos: subtransitoria, transitorio, y régimen permanente).

Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

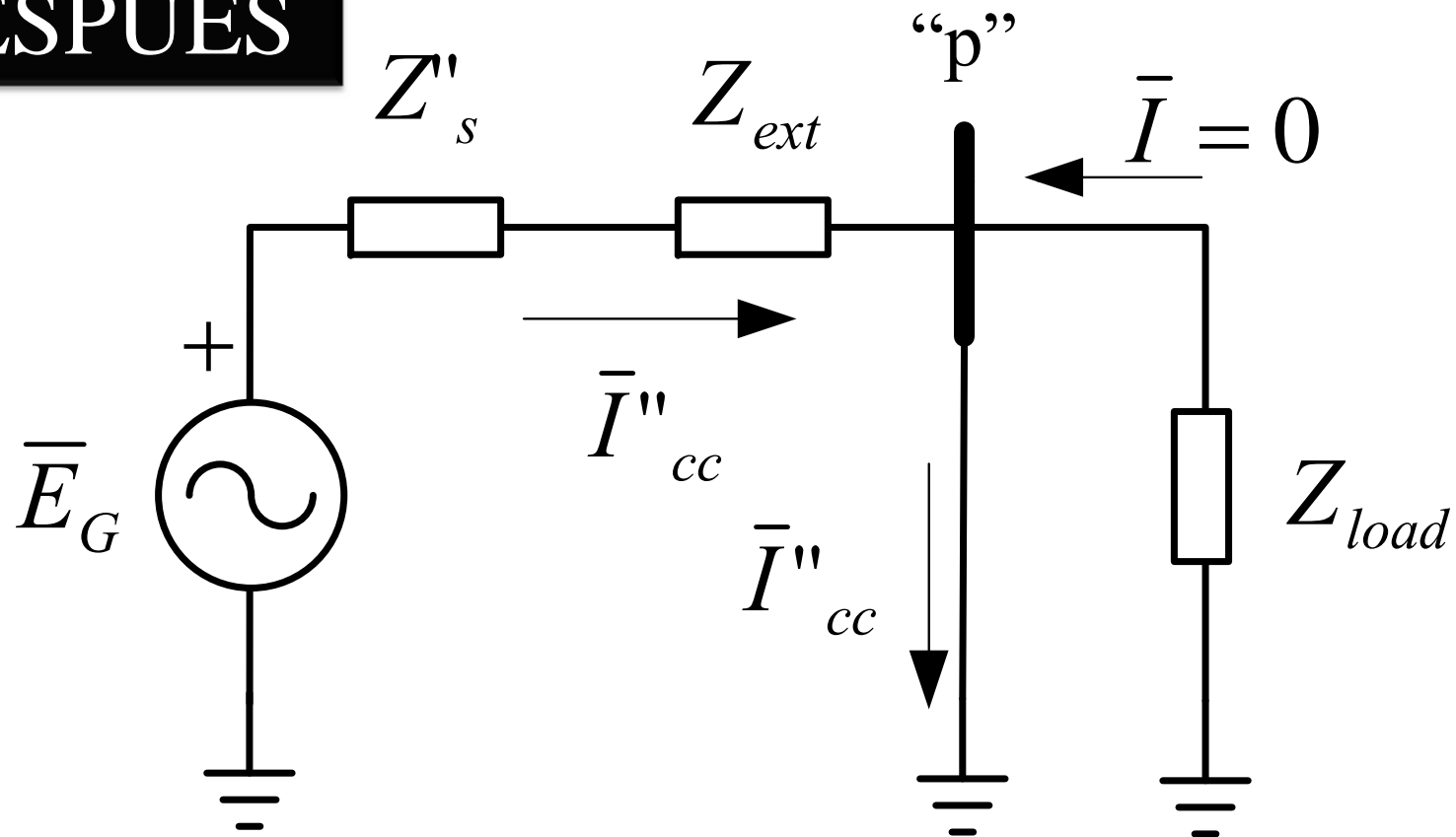
Circuito equivalente del sistema de potencia fallado, antes de la falla



Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

Circuito equivalente del sistema de potencia fallado, después de la falla

DESPUÉS



Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- El modelo antes de la falla del sistema de potencia, queda compuesto por el modelo del generador sincrónico en régimen permanente, y las respectivas impedancias de la carga Z_{load} , y las componentes externas Z_{ext} .

El modelo del generador se toma el de régimen permanente ya que la máquina se asume en comportamiento estable alimentando a la carga con una corriente I_{load} , siendo la tensión en terminales de la carga V_T .

Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

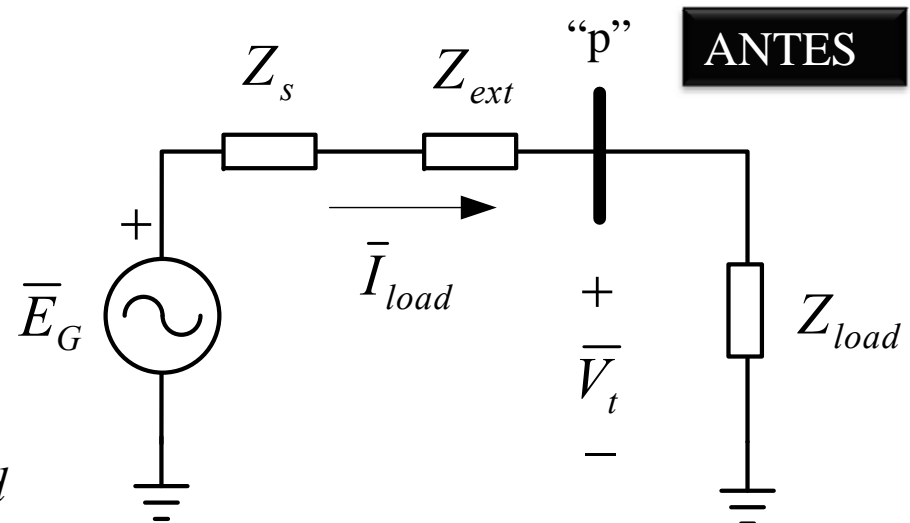
- Conocida las condiciones de carga del generador, se puede determinar el valor de la tensión interna de la misma.

Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- Bajo estas condiciones de operación el generador posee una tensión interna E_G ajustada para que se cumplan las condiciones anteriores, en serie con la impedancia interna de la máquina de régimen permanente Z_s .

$$\bar{E}_G = (Z_s + Z_{ext})\bar{I}_{load} + \bar{V}_t$$

$$\bar{E}_G = (Z_s + Z_{ext} + Z_{load})\bar{I}_{load}$$



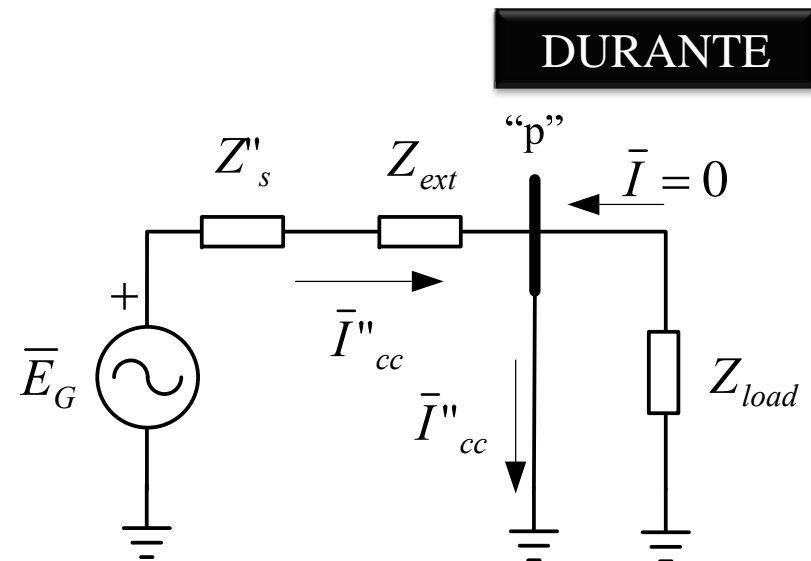
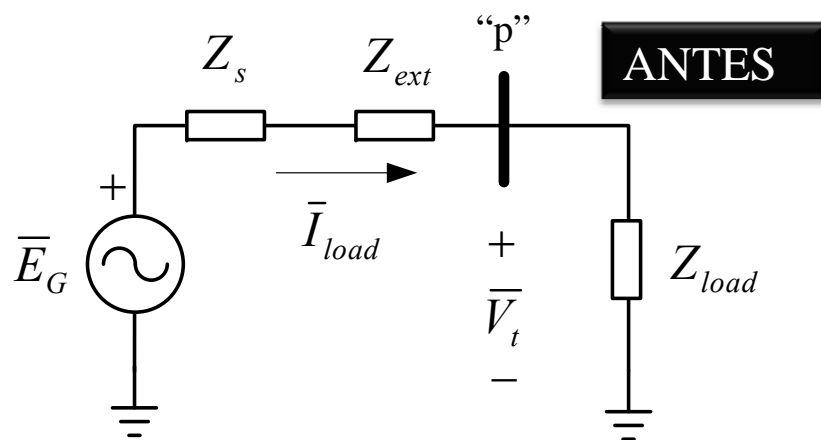
Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- En el instante de ocurrir el cortocircuito trifásico en el punto "p", las condiciones de operación del sistema y de la máquina deben cambiar, pasando a un régimen dinámico asociado al cortocircuito.
- Caracterizado por la aparición de las constantes de tiempo para régimen de la máquina, de manera que se pueda estimar el comportamiento del alternador durante la falla.

Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- Asumiendo que la máquina se encuentra operando en condiciones normales y estables, la tensión interna de la máquina antes de la falla y durante no cambia;

$$\bar{E}''_g = \bar{E}_g$$

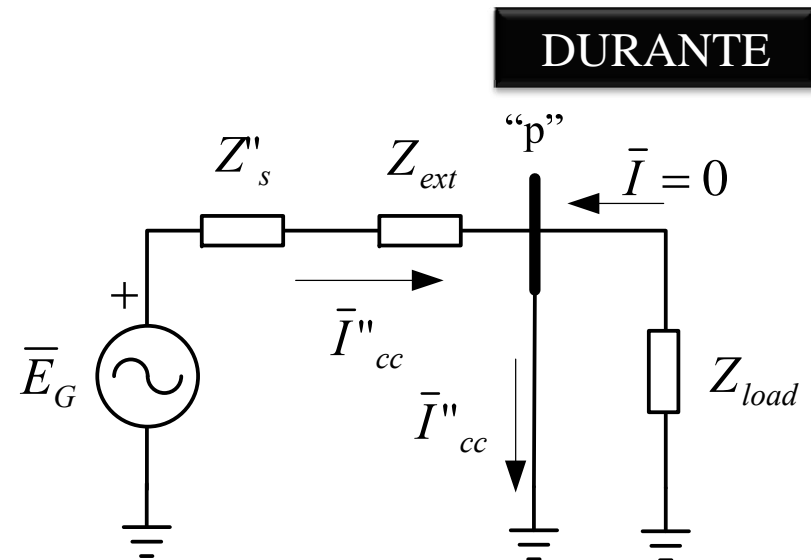


Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- La corriente subtransitoria de falla, I''_{cc} , se puede calcular sencillamente con un recorriendo de malla, aplicando la ley de tensión de Kirchoff.

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{E}''_g}{Z''_s + Z_{ext}}$$

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{Z_s + Z_{ext} + Z_{load}}{Z''_s + Z_{ext}} \bar{I}_{load}$$



Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

- El método de la F.E.M. recibe su nombre del hecho de que para el cálculo de la corriente de cortocircuito, se debe calcular la F.E.M. interna de cada una de las máquinas que intervienen en el sistema de potencia fallado.
- Para el cálculo de las F.E.M. se hace necesario conocer los datos de carga previos a la falla, y realizar los artificios eléctricos que sean necesarios para tal fin.
- La corriente subtransitoria de falla determinada I''_{cc} , depende en forma directa de la corriente de carga del sistema I_{load} .

ELC-30514
Sistemas de Potencia I

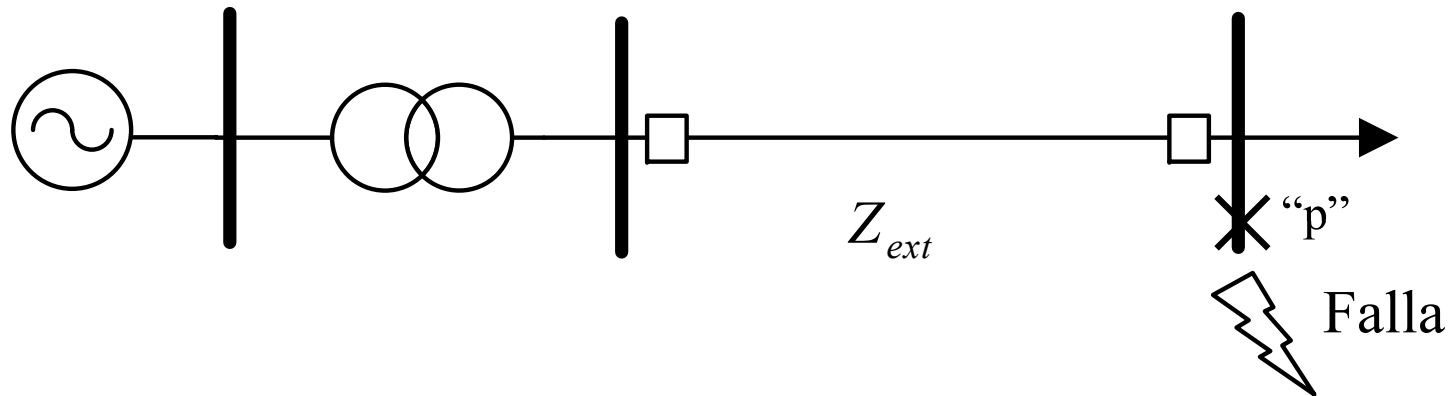
Método Thevenin

Método de Thevenin

- El método de Thevenin ampliado para los sistemas de potencia, en el cálculo de la corriente de cortocircuito guarda especial relación con su aplicación para circuitos eléctricos.
- Considérese un generador sincrónico (que se considera por simplicidad de rotor liso) el cual alimenta a una cierta carga estática Z_{load} , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar Z_{ext} , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga Z_{load} .

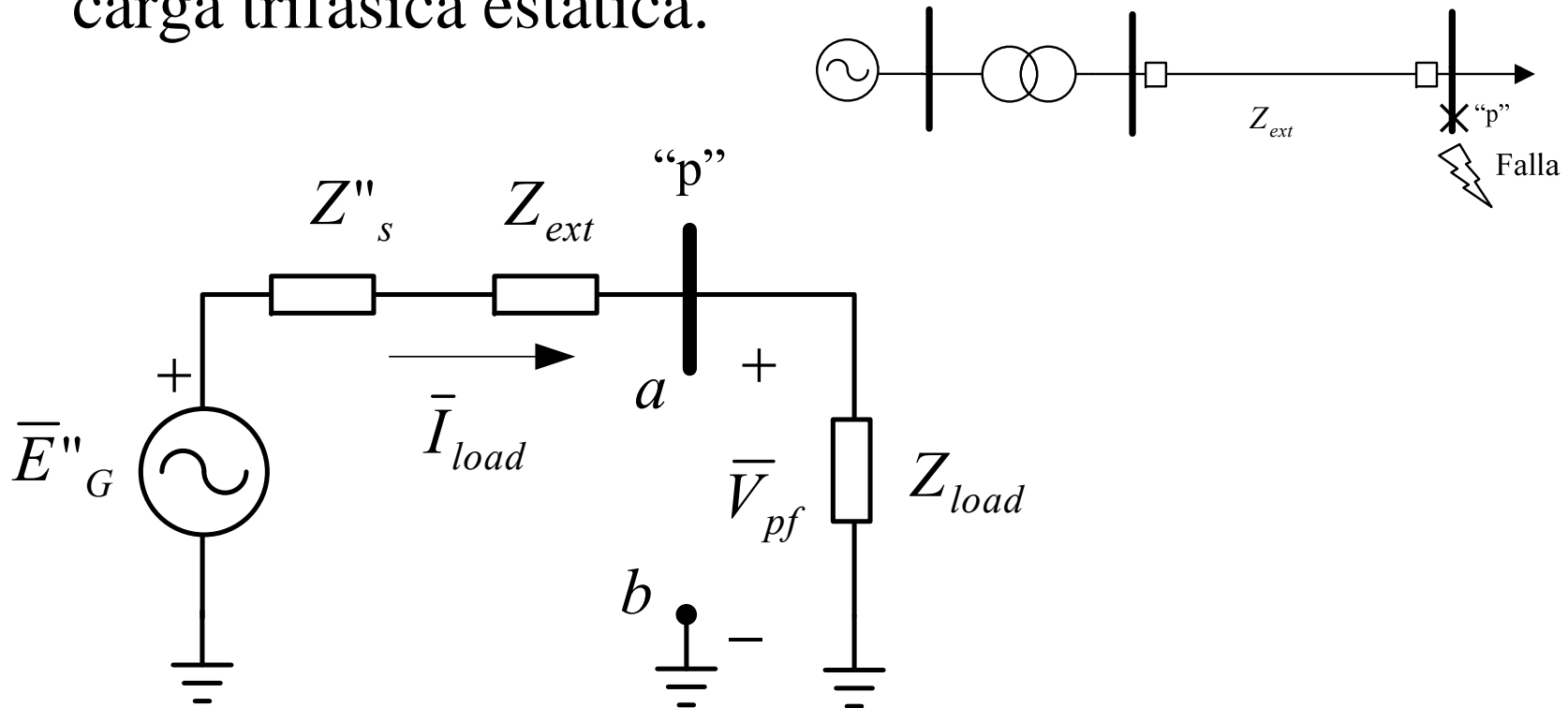
Método de Thevenin

- Considérese un generador sincrónico (el cual alimenta a una cierta carga estática Z_{load} , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar Z_{ext} , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga Z_{load} .



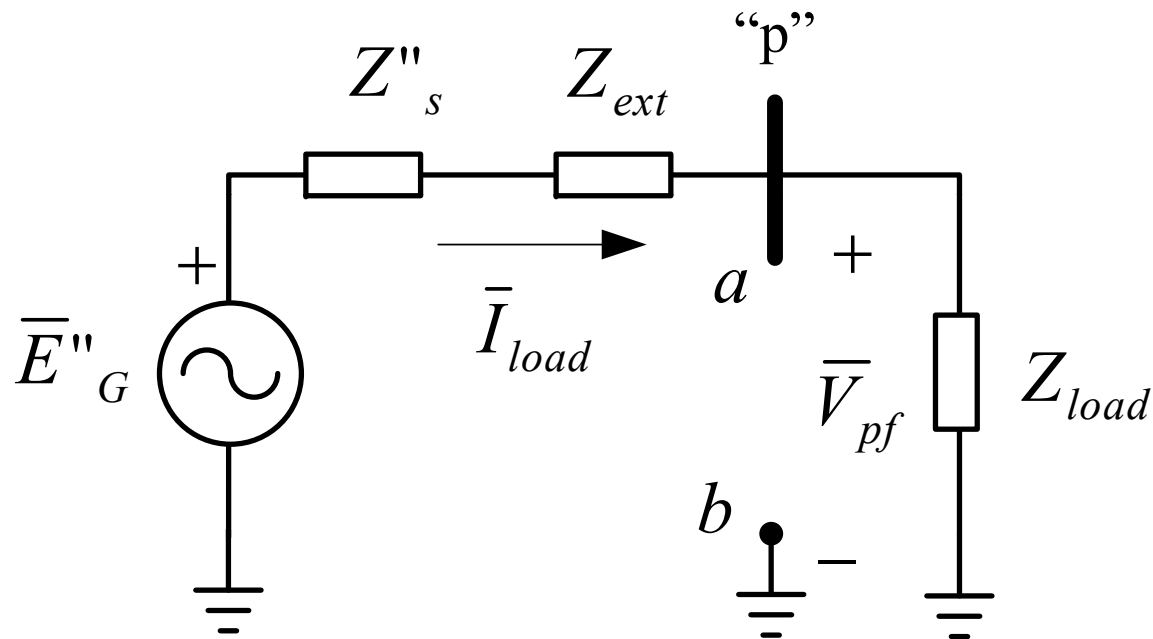
Método de Thevenin

- El circuito equivalente antes de la falla, considerando que el generador se encuentra operando en condiciones estables de carga, y que se trata de una carga trifásica estática.



Método de Thevenin

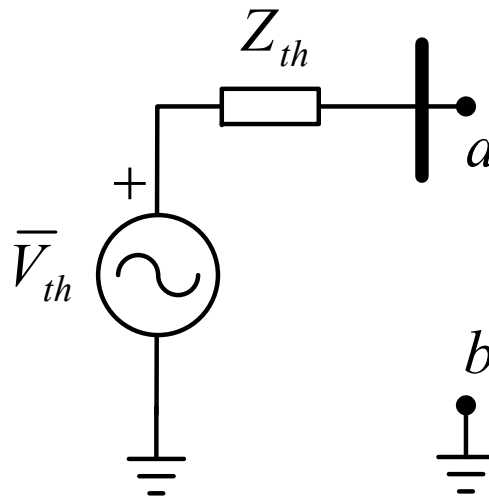
- Siendo V_{pf} , el voltaje que existe en el punto "p", antes que se produzca la falla.



- Resulta posible simular el evento del cortocircuito en el sistema de potencia, mediante la aplicación del *Teorema de Thevenin*.

Método de Thevenin

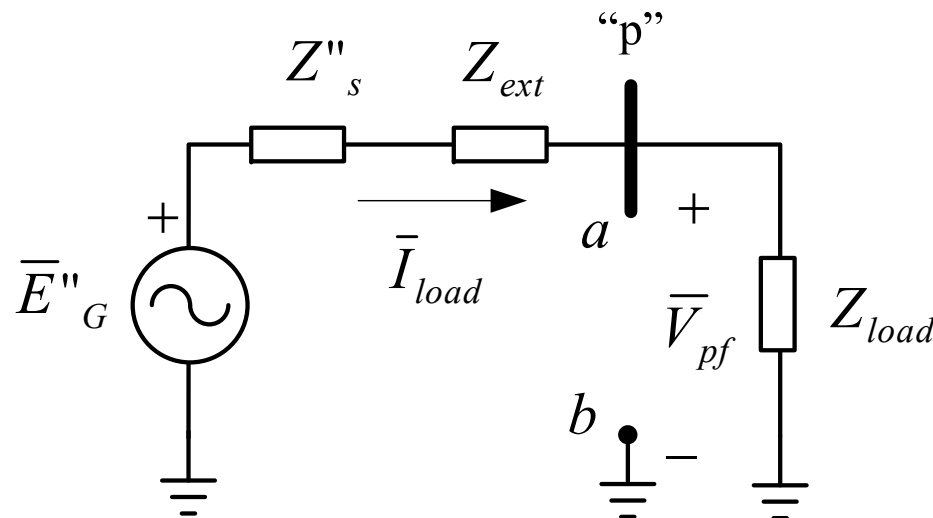
- Resulta posible simular el evento del cortocircuito en el sistema de potencia, mediante la aplicación del Teorema de Thevenin.
- Suponiendo como es conocido que el modelo final ha de constar de una fuente ideal de tensión de valor V_{th} , en serie con una impedancia Z_{th} .



Método de Thevenin

- En el caso particular del alternador sincrónico alimentando una carga Z_{load} a través de una impedancia externa resulta Z_{ext} :

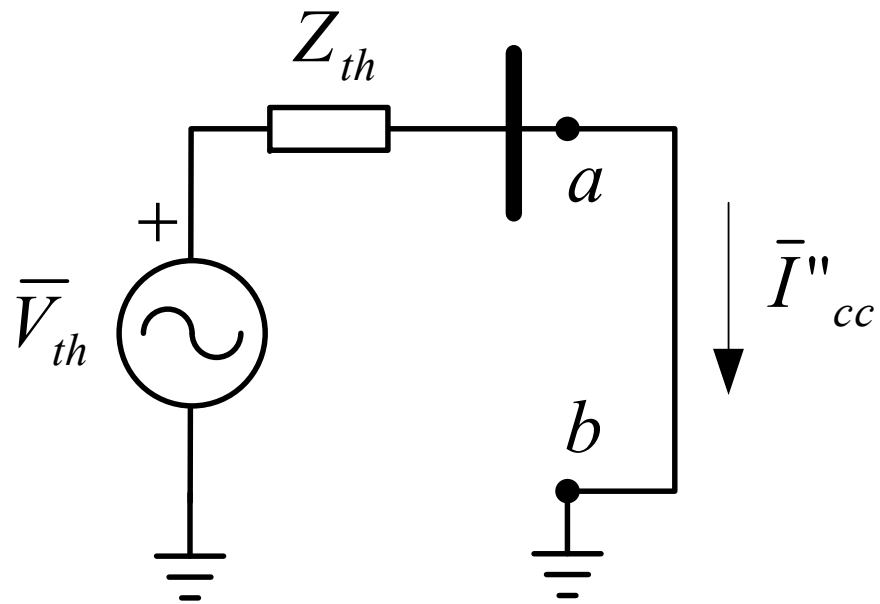
$$Z_{th} = \frac{Z_{load} (Z''_s + Z_{ext})}{Z_{load} + Z_{ext} + Z''_s}$$



Método de Thevenin

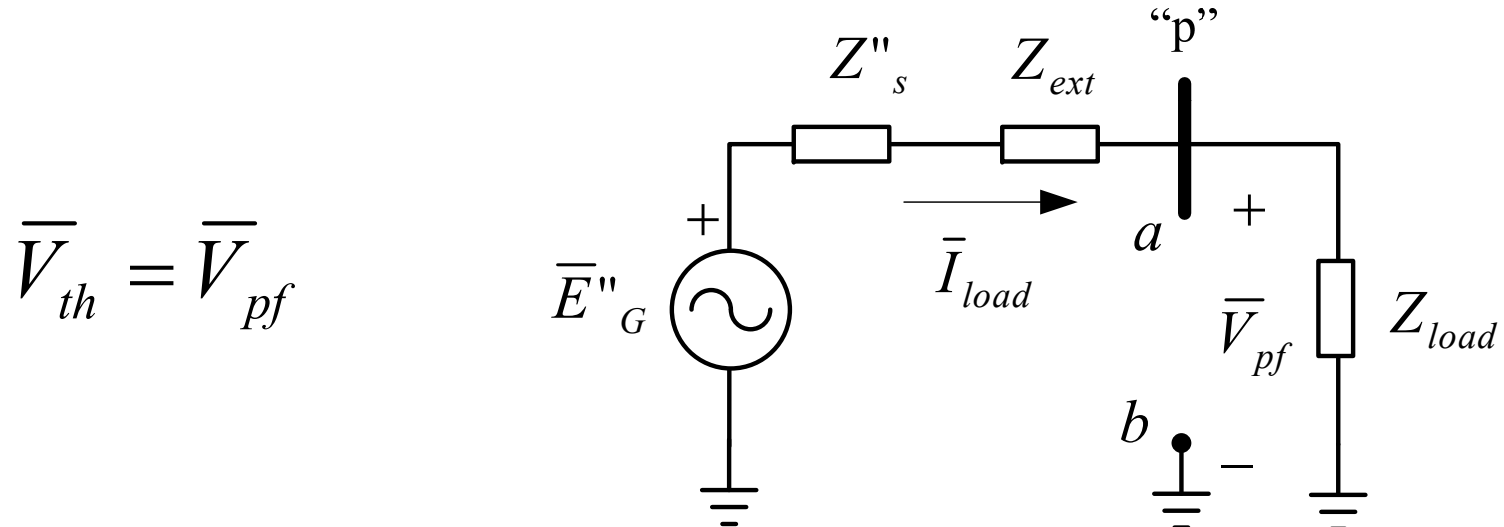
- Para el cálculo de la corriente de cortocircuito en el punto de falla solo, se requiere de aplicar un cortocircuito al modelo de Thevenin y se estima la corriente subtransitoria \bar{I}''_{cc} .

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{V}_{th}}{Z_{th}}$$



Método de Thevenin

- La tensión de Thevenin, se obtiene de retirar el cortocircuito en el sistema de potencia estudiado y encontrar la tensión que existen en ese punto.



- Siendo V_{pf} , el voltaje previa a la falla en el punto "p".

Método de Thevenin

- En el caso particular en que el sistema posee una tensión en ese punto, en por unidad de $V_{pf} = 1.0$ p.u., resulta sencillo la expresión de la corriente de cortocircuito.

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_{th}} [p.u.]$$

- El procedimiento es similar para el cálculo de los otros regímenes de cortocircuito, con la salvedad de que las impedancias de las máquinas giratorias, han de ser las del régimen pertinente.

ELC-30514
Sistemas de Potencia I

Método Thevenin

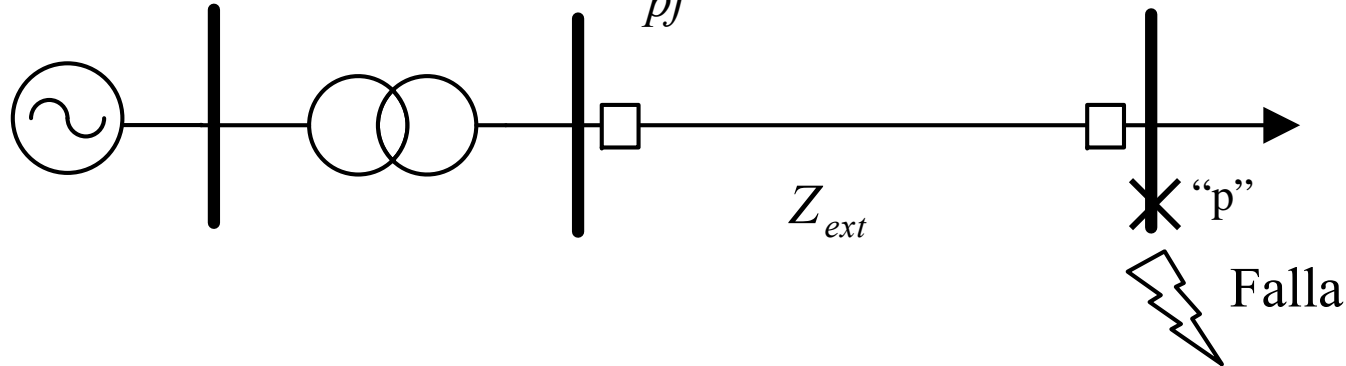
Demostracion

Método de Thevenin

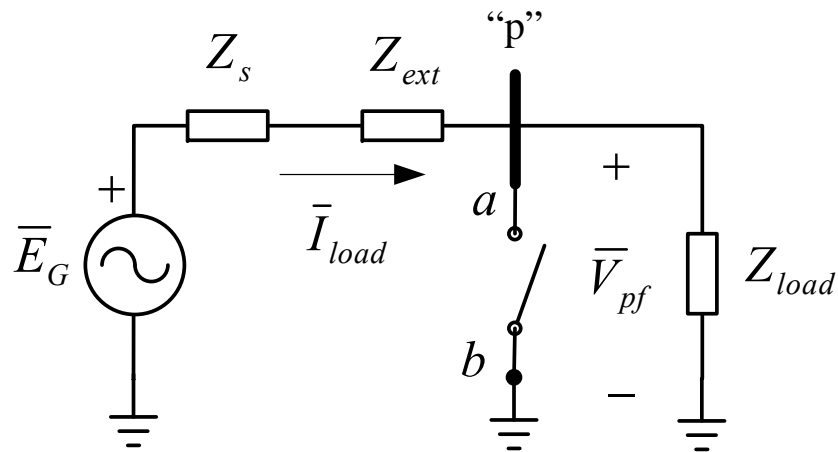
- El método de Thevenin permite el cálculo de la corriente de cortocircuito debida exclusivamente a la reducción a cero de la tensión en el punto de falla.
- Si en el sistema de potencia, en el punto de falla se presentan varias ramas en paralelo, la corriente de cortocircuito calculada por este método será la sumatoria algebraica de ellas.

Método de Thevenin

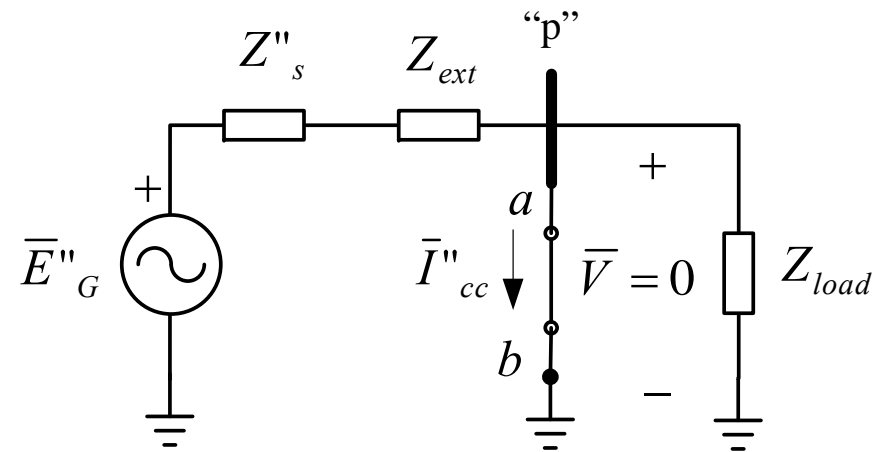
- Supóngase nuevamente un generador sincrónico el cual alimenta a una cierta carga estática Z_{load} , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar Z_{ext} , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga Z_{load} .
- Supóngase además que la tensión en terminales de la falla antes de ocurrir es V_{pf} .



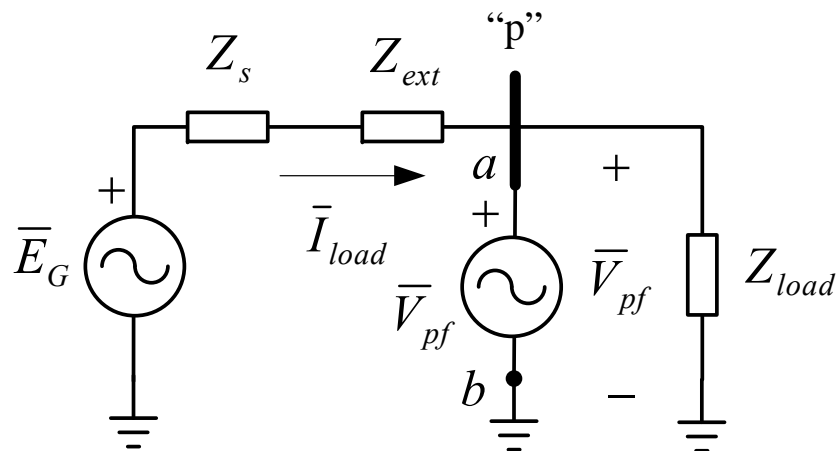
Método de Thevenin



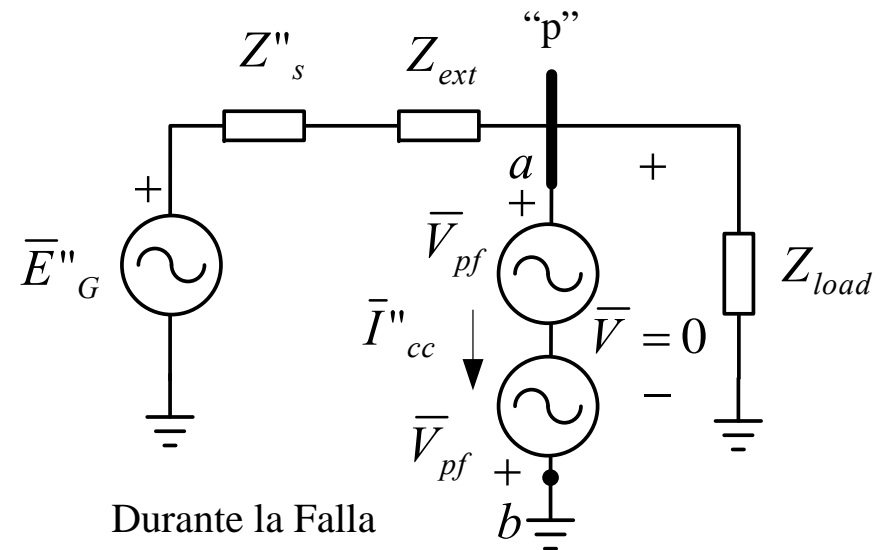
Antes de la Falla



Durante la Falla



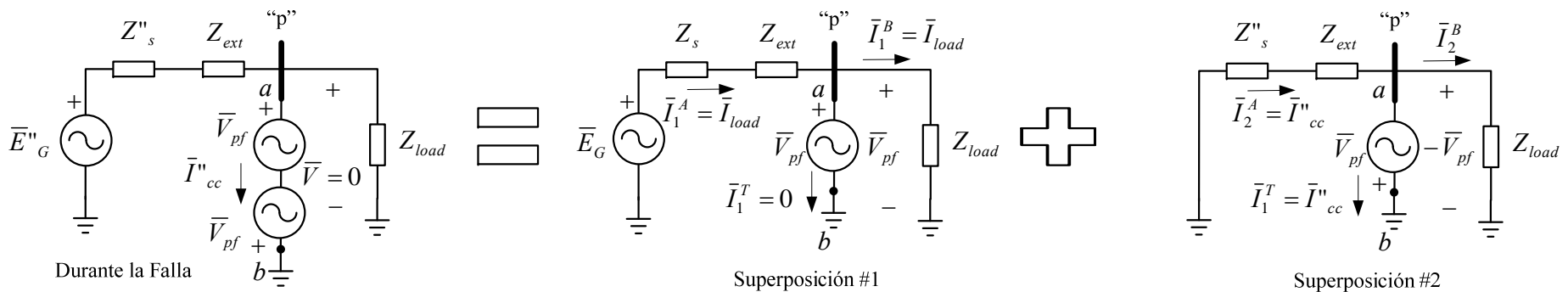
Antes de la Falla



Durante la Falla

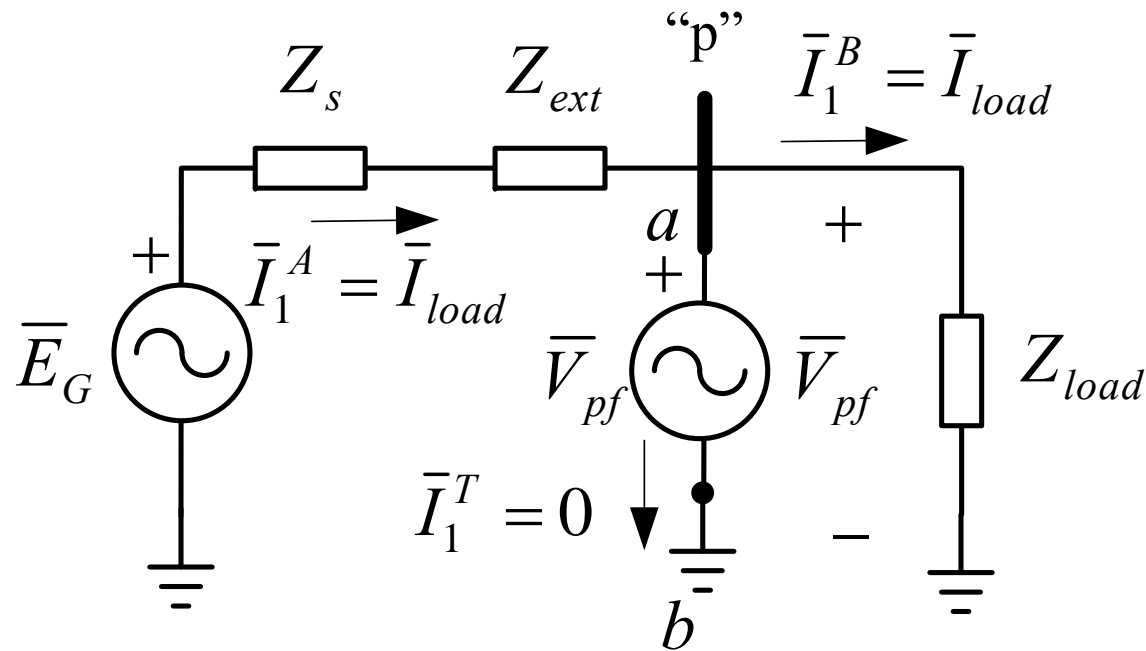
Método de Thevenin

- Se toma la condición de colocar dos fuentes en el punto de falla con tensión V_{pf} en contraposición.
 - Se inopera la fuente hipotética $-V_{pf}$ que se coloca para simula el cortocircuito, y se deja operando la fuente V_{pf} y la tensión interna del generador E''_G .
 - Se procede a cortocircuitar las fuentes E''_G y $+V_{pf}$, con lo que el sistema queda solo la fuente de $-V_{pf}$.



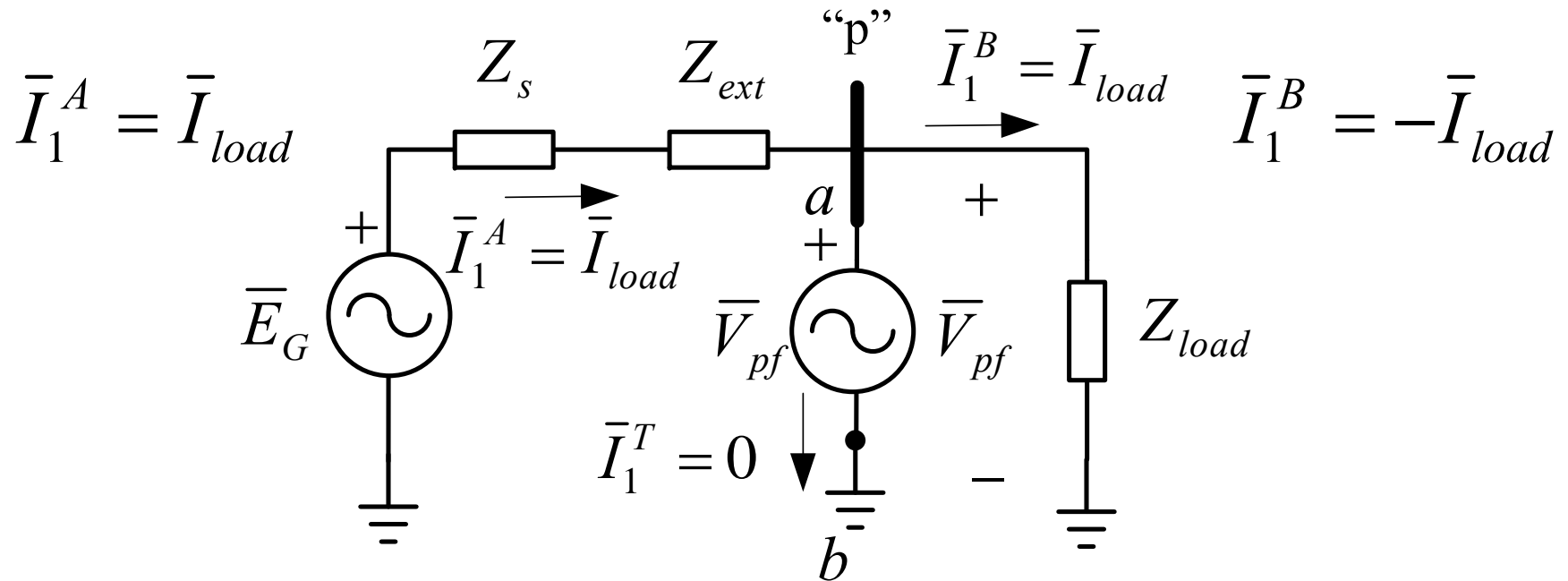
Método de Thevenin

- Superposición 1:
- En ésta superposición se dejan operando la fuente $+V_{pf}$ y la E''_G (que es igual a E_G , ya que se asume que el regulador no ha actuado).



Método de Thevenin

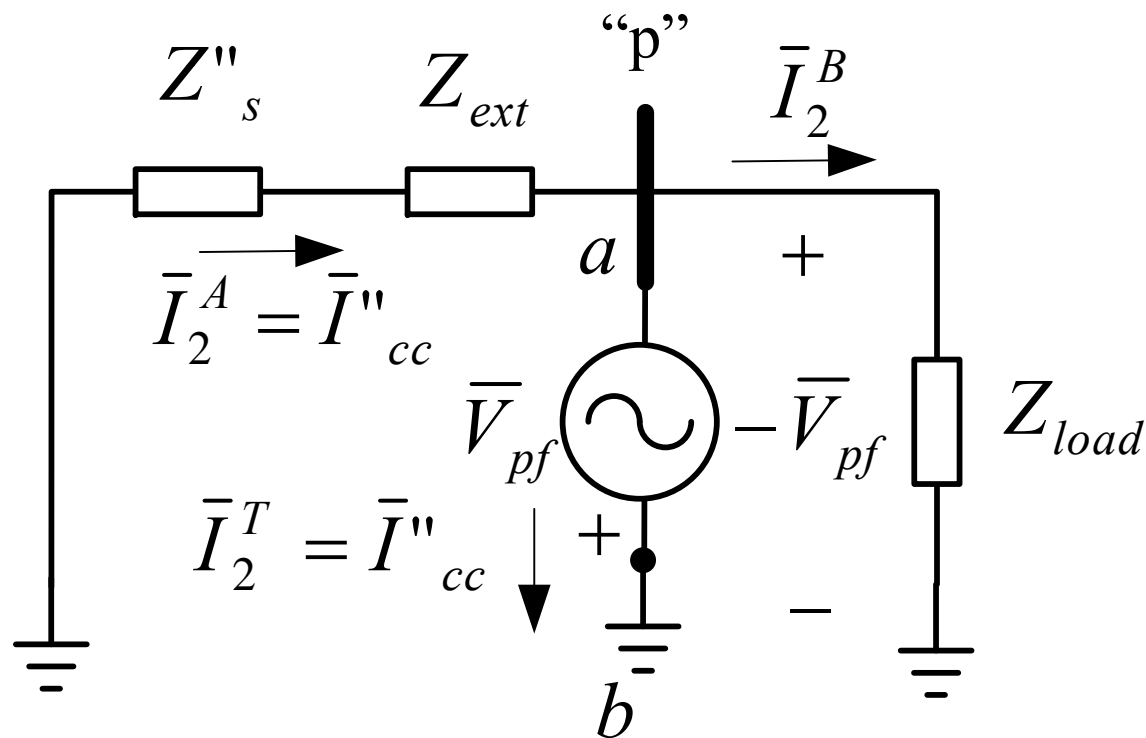
- Superposición 1:



$$\bar{I}_1^T = \bar{I}_1^A + \bar{I}_1^B = 0$$

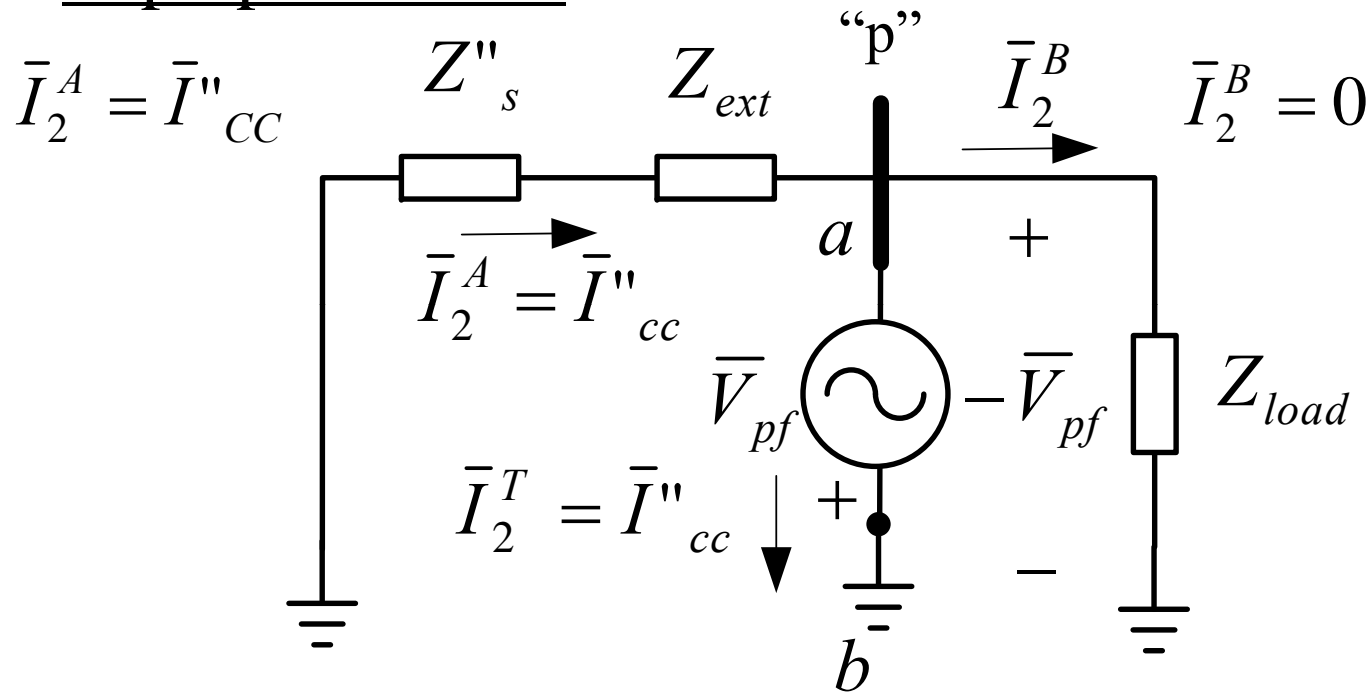
Método de Thevenin

- Superposición 2:
- Esta superposición consta de solo dejar operando la fuente $-V_{pf}$ y se inopera E''_G y $+V_{pf}$.



Método de Thevenin

- Superposición 2:

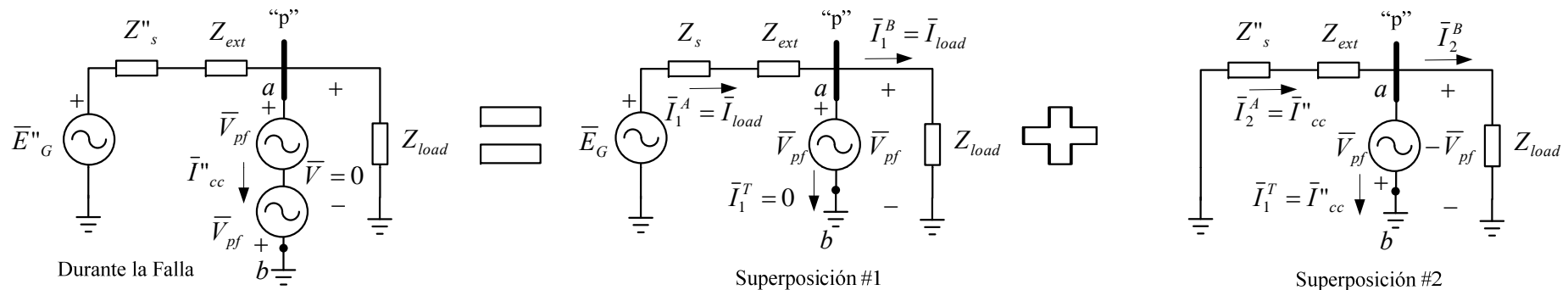


$$\bar{I}_2^T = \bar{I}_2^A + \bar{I}_2^B = \bar{I}''_{cc}$$

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{V}_{pf} (Z_{LOAD} + Z''_S + Z_{EXT})}{Z_{load} (Z''_S + Z_{EXT})}$$

Método de Thevenin

- La corriente de cortocircuito, finalmente será la suma de las dos superposiciones.



$$\bar{I}_T = \bar{I}_1^T + \bar{I}_2^T = \bar{I}''_{CC}$$

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{V}_{pf} (Z_{LOAD} + Z''_S + Z_{EXT})}{Z_{load} (Z''_S + Z_{EXT})}$$

ELC-30514
Sistemas de Potencia I

Fuentes de Corriente de Cortocircuito

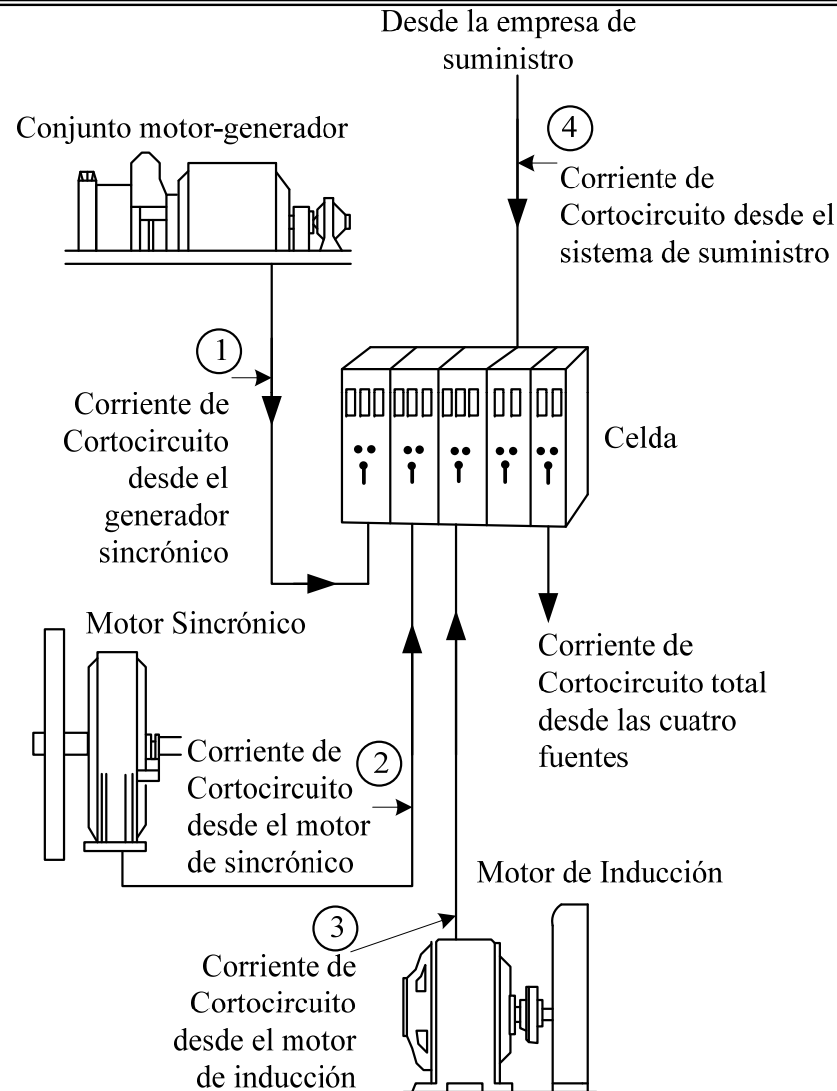
Fuentes de Corriente de Falla

- En los grandes sistemas de potencia las fuentes de corriente de cortocircuito son mayoritariamente los generadores sincrónicos conectados a la red
- Existen una cierta cantidad de equipos eléctricos (máquinas giratorias) que en situación de falla pueden entregar, bajo ciertas condiciones y por un período de tiempo determinado, energía a la falla, y que por lo general al nivel de centrales de subtransmisión o transmisión son despreciados.

Fuentes de Corriente de Falla

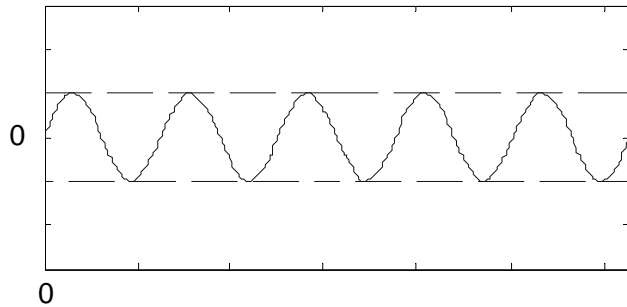
- Las fuentes básicas de corriente de cortocircuito son cuatro:
 - Sistema de Generadores Locales.
 - Motores Sincrónicos.
 - Motores de Inducción.
 - Sistema de suministro eléctrico (*Electric Utility Systems*) o generación remota.

Fuentes de Corriente de Falla

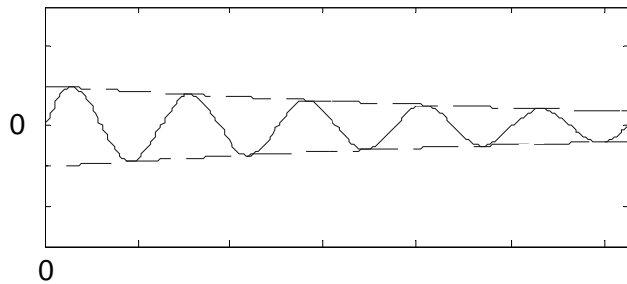


Fuentes de Corriente de Falla

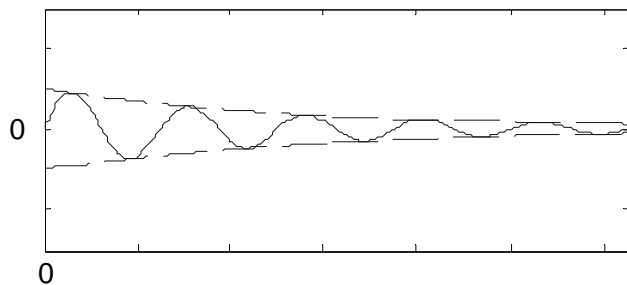
Contribución de la Fuente



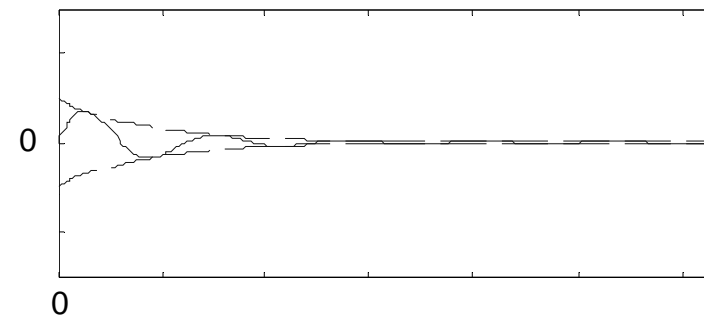
Contribución del Generador



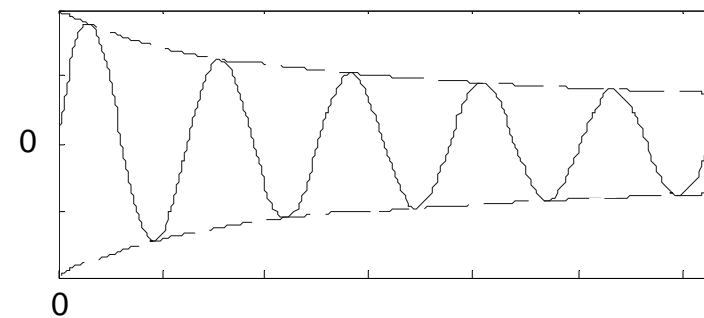
Contribución del Motor de Síncronico



Contribución del Motor de Inducción



Corriente de Cortocircuito Total



Representación Equivalente de un Sistema de Potencia

Representación Equivalente

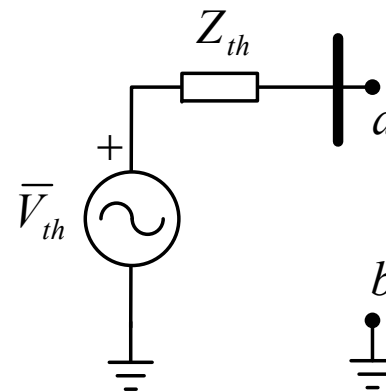
- En ocasiones se presentan sistemas de potencia que poseen muchas interconexiones, pero solo se desea realizar el análisis de una parte de ellos; en estas condiciones resulta útil y ventajoso
- Realizar una representación simplificada de las áreas fuera del análisis y realizar solo la representación detallada de aquella parte del sistema de potencia de mayor interés.

Representación Equivalente

- El modelo simplificado del sistema de potencia, recibe el nombre de *Sistema Exterior*.
- No se desea conocer en profundidad su estructura, de hecho no es necesaria, pero si interesa su contribución o efecto sobre una falla en el sistema bajo estudio.
- Un sistema exterior, puede ser considerado como una abstracción de los restantes elementos del sistema de potencia que rebasan los límites del estudio en ejecución.

Representación Equivalente

- En el modelo de Thevenin obtenido se puede realizar una abstracción imaginando que se trata de un generador equivalente a todo el sistema de potencia y con una impedancia equivalente asociada.
- Si se conoce la impedancia equivalente de Thevenin (Z_{th}), y las condiciones en los terminales a y b (V_{ab} e I_{ab}), entonces es fácil obtener la tensión del modelo equivalente de Thevenin V_{th} .



Representación Equivalente

- Supóngase que se tiene un sistema exterior, que se encuentra conectado a través de la barra "p" y un interruptor "M" a un sistema de potencia.

Representación Equivalente

- Si se supone que el interruptor "M" se encuentra en abierto, y que en esta condición la tensión en la barra "p" es V_{oc} (*open circuit*), como tensión de línea a línea, entonces si se supone que el sistema exterior va a ser modelado por el teorema de Thevenin, en la condición en que el interruptor "p" se encuentra en abierto, y se produce un cortocircuito en la barra "p", entonces si se desprecia la parte resistiva de la impedancia equivalente y además se conoce que en estas condiciones en el cortocircuito se disipa un potencia $S_{cc3\phi}$ (MVA).

Representación Equivalente

- Si ahora se tomo como bases para el cálculo en el sistema por unidad:

$$S_{base} = S_{cc3\phi} [MVA]$$

$$V_{base} = V_{oc} [kV]$$

- Entonces:

$$S_{cc3\phi} = 1.0 p.u$$

$$V_{th} = V_{oc} = 1.0 p.u$$

Representación Equivalente

- Por teoría del sistema por unidad se conoce que:

$$S_{cc3\phi} = V_{oc} I_{cc} [p.u]$$

$$Z_{th} = \frac{V_{oc}^2}{S_{cc3\phi}}$$

- Finalmente sustituyendo los valores en por unidad resulta:

$$Z_{th} = 1.0 p.u$$

Representación Equivalente

- La impedancia equivalente de un sistema externo es un en el sistema por unidad siempre que se tome como base:

$$Z_{th} = 1.0 p.u$$

- Voltaje base: El voltaje de circuito abierto del sistema exterior.
- Potencia base: En la condición de tensión base, la capacidad de cortocircuito trifásico