



Análisis de Estabilidad Transitoria

Análisis de Estabilidad Transitoria

- ❑ Introducción al Análisis de Estabilidad Transitoria.
- ❑ Representación de la maquina síncrona en estudios de Estabilidad Transitoria.
- ❑ Una visión elemental de Estabilidad Transitoria.
- ❑ Estructura del modelo dinámico completo para estudios de Estabilidad Transitoria en SEP.
- ❑ Editor de Estudios de Estabilidad Transitoria de ETAP®11.0
- ❑ Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11.0

Bibliografía

- J. Machowski; J. Bialek; J. Bumby ***Power System Dynamics: Stability and Control***. Second Edition. Wiley, 2.008.
- P. Anderson & A. Fouad ***Power System Control and Stability***, Second Edition. Wiley, 2.003.
- P. Kundur ***Power System Stability and Control***, McGraw-Hill, Inc. 1994.
- **IEEE Std 1110™** - 2002: IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power Systems Stability Analyses.
- IEEE Task Force *Supplementary Definitions & Associated Test Methods for Obtaining Parameters for Synchronous Machine Stability Study Simulations* . **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-99, No. 4, July/August 1980, pp. 1625-1633.
- IEEE Task Force *Current Usage & Suggested Practices in Power System Stability Simulations for Synchronous Machines*. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. EC-1, No. 1, March 1986, pp. 77-93.

Bibliografía

- IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions *Definition and Classification of Power System Stability*. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 19, No. 2, May 2004, pp. 1387-1401.
- J. Undrill *Structure in the Computation of Power System Nonlinear Dynamical Response*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-88, No. 1, January 1969, pp. 1-6.
- M. Kent, W. Schmus, F. McCrackin, L. Wheeler *Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-88, No. 5, May 1969, pp. 756-763.
- E. Kimbark *Improvement of Power System Stability by Changes in the Network*. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-88, No. 5, May 1969, pp. 773-781.
- R. McFadden *Stability Considerations for Industrial Power System*. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. IA-13, No. 2, March/April 1977, pp. 107-115.

Bibliografía

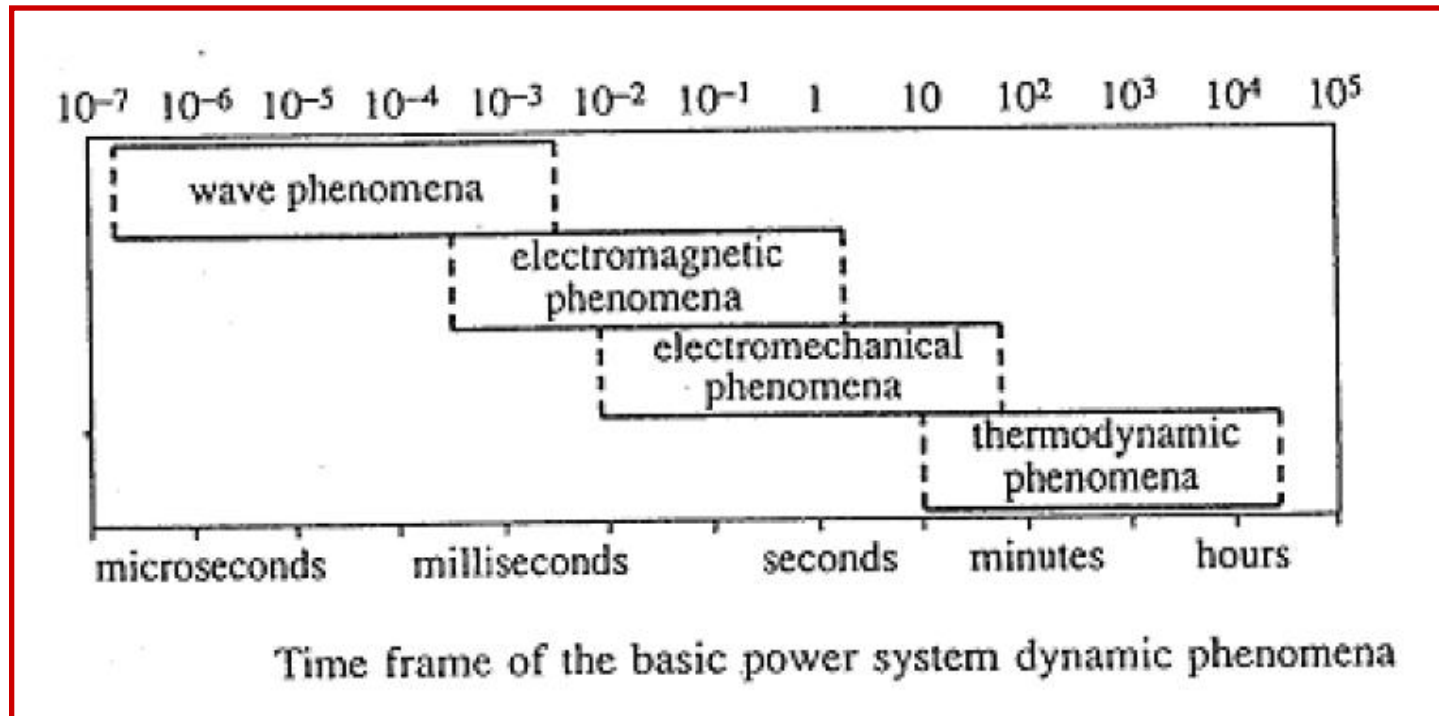
- W. Lee, M. Chen, L. Williams *Load Model for Stability Studies* . **IEEE Transactions on Industry Applications** , Vol. IA-23, No. 1, January/February 1987, pp. 159-165.
- Ph. Nobile *Power System Studies for Cogeneration: What's Really Needed?* **IEEE Transactions on Industry Applications** , Vol. IA-23, No. 5, September/October 1987, pp. 777-785.
- R. L. Doughty, L. Gise, E. W. Kalkstein, R. D. Willoughby *Electrical Studies for an Industrial Gas Turbine Cogeneration Facility*. **IEEE Transactions on Industry Applications** , Vol. 25, No. 4, July/August 1989, pp. 750-765.
- W. Lee, M. Chen, J. Gim, K. Yoshimura, S. Wang *Dynamic Stability Analysis of an Industrial Power System* . **IEEE Transactions on Industry Applications** , Vol. 31, No. 4, July/August 1995, pp. 675-681.

Bibliografía

- Ch. Hsu *Transient Stability Study of the Large Synchronous Motors Starting and Operating for the Isolated Integrated Steel-Making Facility*. **IEEE Transactions on Industry Applications** , Vol. 39, No. 5, September/October 2003, pp. 1436-1441.
- J. C. Das *Transient Stability of Small Plant Generators Connected to a Weak Utility System – A Case Study*. **IEEE Transactions on Industry Applications** , Vol. 41, No. 1, January/February 2005, pp. 155-162.
- **ETAP®11 User Guide**

Introducción al Análisis de Estabilidad

Escala temporal de los fenómenos dinámicos en SEP



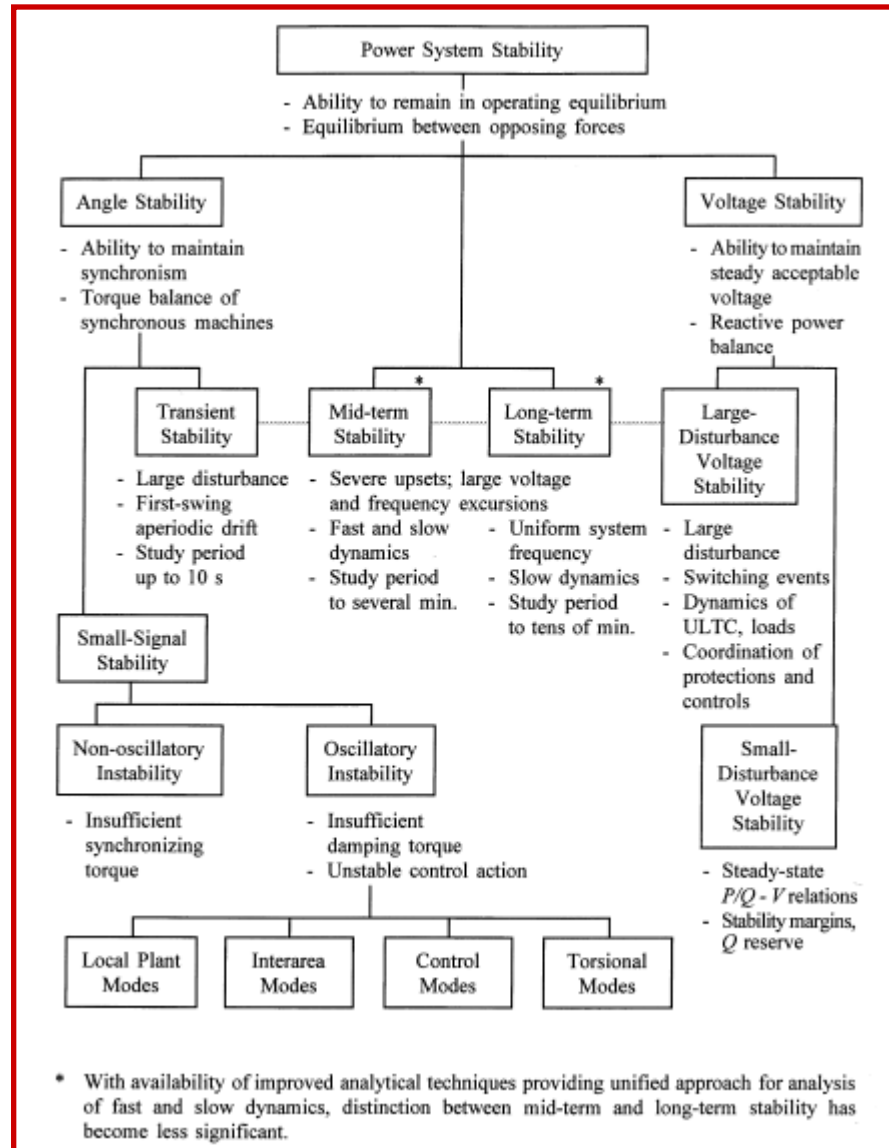
Introducción al Análisis de Estabilidad

La **Estabilidad de un Sistema de Potencia** puede definirse de manera genérica como la propiedad del sistema **que le permite permanecer en un estado de equilibrio (dinámico) bajo condiciones normales de operación y recuperar un estado de equilibrio (dinámico) aceptable después de haber sido sometido a una perturbación.**

La evaluación de la estabilidad esta relacionada con el comportamiento del sistema cuando es sometido a una perturbación transitoria. La perturbación puede ser pequeña o grande.

La inestabilidad de un Sistema de Potencia puede manifestarse de diferentes formas dependiendo de la configuración y del modo de operación del sistema.

Introducción al Análisis de Estabilidad



Una breve revisión histórica

La **Estabilidad de un Sistema de Potencia** es un tema complejo que ha desafiado a los ingenieros de sistemas de potencia desde hace muchos años. Fue reconocida como un tema de importancia en 1920:

✓ C.P. Steinmetz “Power Control and Stability of Electric Generating Stations”, *AIEE Trans.* Vol. XXXIX, Part II, pp. 1215, July-December, 1920.

Los resultados de una primera simulación analógica de laboratorio fueron informados en 1924:

✓ R.D. Evans and R.C. Bergvall “Experimental Analysis of Stability and Power Limitations”, *AIEE Trans.* pp. 39-58, 1924.

Los primeros ensayos de campo sobre sistemas eléctricos industriales fueron realizados en 1925:

✓ R. Wilkins “Practical Aspects of System Stability”, *AIEE Trans.* pp. 41-50, 1926.

✓ R.D. Evans and C.F. Wagner “Further Studies of Transmission System Stability”, *AIEE Trans.* pp. 51-80, 1926.

Una breve revisión histórica

Los primeros problemas de estabilidad estaban asociados a centrales hidroeléctricas que abastecían centros de demanda metropolitanos a través de líneas de transmisión de relativa extensión. Por razones económicas, tales sistemas eran operados a niveles cercanos a sus límites de estabilidad de régimen permanente. En algunas instancias, la inestabilidad se manifestaba durante la operación en régimen permanente, pero ocurría más frecuentemente a continuación de un cortocircuito u otra perturbación sobre el sistema:

✓ **AIEE Subcommittee on Interconnections and Stability Factors. “First Report of Power System Stability”, *AIEE Trans.* pp. 261-282, February 1937.**

Estos problemas de estabilidad estaban fuertemente condicionados por el sistema de transmisión, siendo la inestabilidad consecuencia de insuficiente par sincronizante. Los tiempos de eliminación de las fallas eran lentos, del orden de los 0,5 s a 2 s y aun mayores. Los métodos de análisis y los modelos usados eran acordes al estado del arte en computación y la teoría de estabilidad de sistemas dinámicos. Como se usaba regla de cálculo y calculadoras mecánicas, los métodos y modelos de análisis eran necesariamente muy simples. Adicionalmente, se desarrollaron técnicas gráficas como el “criterio de áreas iguales” y diagramas de círculo. Tales técnicas eran adecuadas para el análisis de sistemas simples que podían ser tratados como sistemas de dos máquinas.

Una breve revisión histórica

Como los sistemas de potencia evolucionaron y la interconexión entre sistemas independientes resultó atractiva por razones económicas y operativas, la complejidad de los problemas de estabilidad se incrementó. Los sistemas ya no podían ser tratados como sistemas de dos máquinas.

Un avance significativo en el mejoramiento de los métodos de cálculo fue el desarrollo en 1930 del Analizador de Redes de corriente alterna (también llamado “tablero de cálculo de corriente alterna”).

Un Analizador de Redes es esencialmente un modelo a escala de un sistema de potencia, con capacitores, reactores y resistores ajustables que representan el sistema de transmisión y la demanda, con fuentes de tensión cuya magnitud y ángulo pueden ajustarse para representar a los generadores, y con instrumentos para medir tensiones, corrientes y potencia en la red.

Este desarrollo permitió analizar flujos de potencia de sistemas multimaquinas, sin embargo, las ecuaciones de oscilación aun debían resolverse manualmente utilizando métodos de integración numérica de un paso.

Una breve revisión histórica

~ 1915 hasta 1955 - Analizadores de Redes en CA y CC

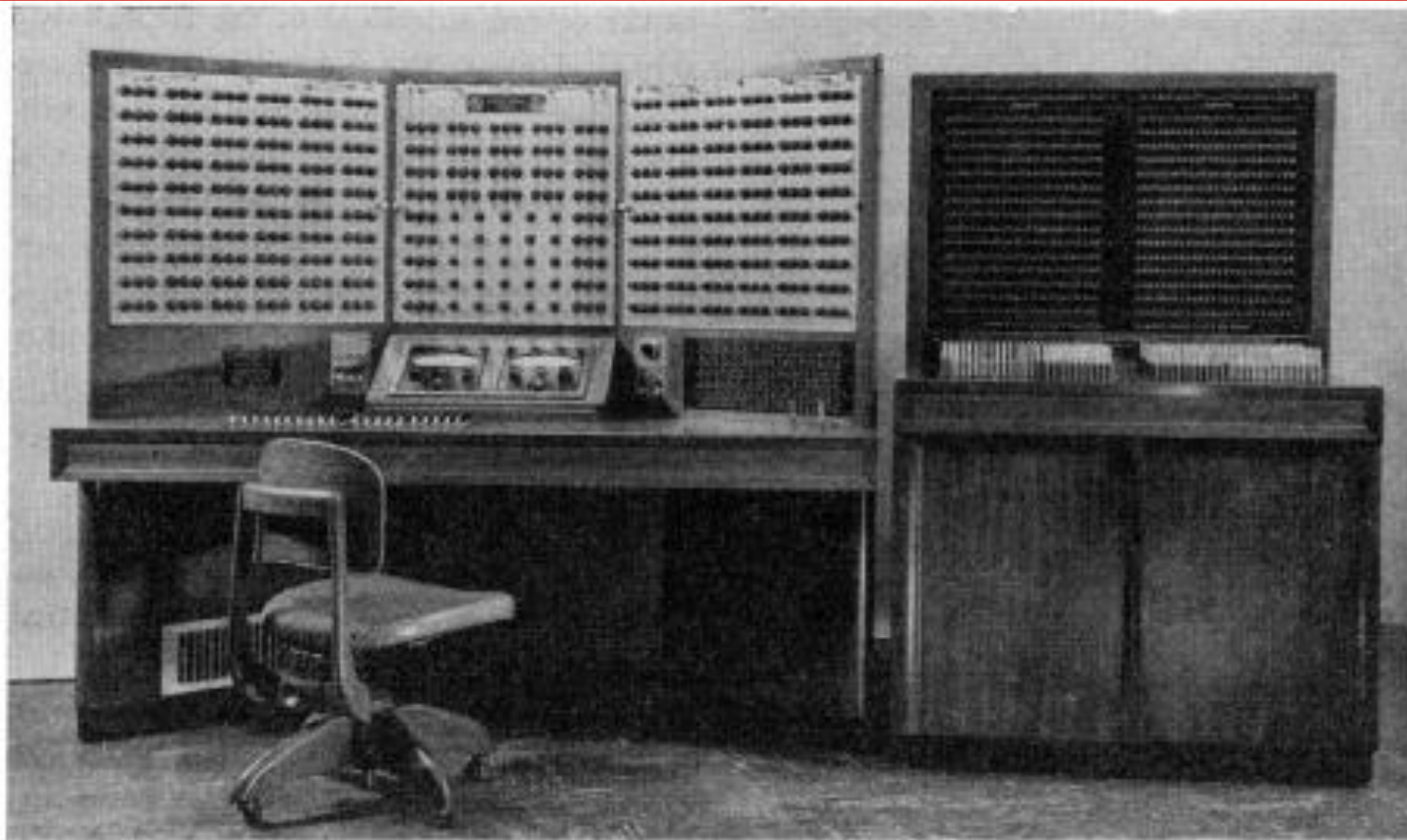


Fig. 1. One section of d-c network analyzer showing master console and connection unit

Una breve revisión histórica

Los desarrollos teóricos realizados en la década de 1920 y principios de 1930 sentaron los fundamentos básicos para la comprensión del fenómeno de estabilidad de sistemas de potencia por parte de la industria eléctrica. Los principales desarrollos y conocimientos sobre la estabilidad de sistemas de potencia en este primer periodo provenían del estudio de la transmisión a larga distancia, mas que de una extensión de la teoría de la maquina síncrona. El énfasis fue puesto en la red de transmisión, los generadores eran considerados como simples fuentes de tensión detrás de reactancias fijas, y las cargas eran consideradas como impedancias constantes. Esto fue una necesidad práctica ya que los medios de cálculo de la época eran adecuados para resolver ecuaciones algebraicas, pero no para resolver ecuaciones diferenciales. Las mejoras tecnológicas en la estabilidad de sistemas de potencia provinieron de una disminución en los tiempos de eliminación de falla y de reguladores de tensión de acción continua sin “banda muerta”. El beneficio de un sistema de excitación de rápida respuesta que permitía incrementar la estabilidad de régimen permanente ya era conocido desde 1920; sin embargo su uso en algunos casos producía una disminución en el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia. Esta inestabilidad oscilatoria se transformó así en una causa de problemas, mientras que la inestabilidad monótona de régimen permanente fue virtualmente eliminada.

Una breve revisión histórica

Esta tendencia requería mejorar las herramientas analíticas. Los modelos de la maquina síncrona y de su sistema de excitación debían ser mas detallados y las simulaciones debían tener un horizonte de estudio mas prolongado.

A principios de 1950, las computadoras analógicas electrónicas se usaron para el análisis de problemas especiales que requerían un modelado detallado de la maquina síncrona, de su sistema de excitación y de su regulador de velocidad. Tales simulaciones fueron adecuadas para un detallado estudio de los efectos de las características del equipamiento mas que del comportamiento conjunto del sistema multimaquina. Durante la década de 1950 también se produjo el desarrollo de la computadora digital; el primer programa para análisis de estabilidad fue desarrollado en 1956. Los modelos usados en las primeras simulaciones digitales eran similares a los usados en simulaciones analógicas. Rápidamente se hizo evidente que la computadora digital superaba a la computadora analógica (incluido el analizador de redes) tanto en el tamaño de la red que podía simularse así como en el modelado de las características dinámicas del equipamiento.

A partir de 1960 gran parte del esfuerzo y del interés de la industria se ha concentrado en la estabilidad transitoria de los sistemas de potencia. Han sido desarrollados muchos programas que permiten representar grandes sistemas con un elevado grado de detalle del equipamiento.

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ Eliminación de los terminos $p\psi_d$ y $p\psi_q$ en el estator

Los términos $p\psi_d$ y $p\psi_q$ representan transitorios en el estator. Sin estos términos las cantidades del estator contienen solo componentes de frecuencia fundamental y las ecuaciones de tensiones del estator son algebraicas. Esto permite utilizar relaciones de régimen permanente para representar a la red de transmisión.

$$e_d = -\psi_q \omega_r - R_a i_d$$

$$e_q = \psi_d \omega_r - R_a i_q$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ No consideración de los efectos de la variaciones de velocidad sobre las tensiones del estator

La suposición de que $\omega_r = 1.0$ (i.e., $\omega_r = \omega_0$ rad/s) en las ecuaciones de tensiones en el estator compensa el efecto de eliminar los términos $p\psi_d$ y $p\psi_q$.

$$e_d = -\psi_q - R_a i_d$$

$$e_q = \psi_d - R_a i_q$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

- ❑ No consideración de los devanados amortiguadores

Esta suposición minimiza el requerimiento de datos. Adicionalmente reduce el esfuerzo computacional al reducir el orden del modelo.

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd}$$

$$\psi_q = -L_q i_q$$

$$\psi_{fd} = -L_{ad} i_d + L_{ffd} i_{fd}$$

$$e_{fd} = p\psi_{fd} + R_{fd} i_{fd}$$



$$p\psi_{fd} = e_{fd} - R_{fd} i_{fd}$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

$$E_I = L_{ad} i_{fd} = \text{voltage proportional to } i_{fd}$$

$$E'_q = \frac{L_{ad}}{L_{ffd}} \psi_{fd} = \text{voltage proportional to } \psi_{fd}$$

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd} = \text{voltage proportional to } e_{fd}$$

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} \quad \longleftrightarrow \quad \psi_d = -L_d i_d + E_I$$

$$\psi_{fd} = -L_{ad} i_d + L_{ffd} i_{fd} \quad \longleftrightarrow \quad E'_q = -\frac{L_{ad}^2}{L_{ffd}} i_d + E_I$$

L_{ad}/L_{ffd}

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

$$L_d' = L_l + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad}+L_{fd}} = (L_d - L_{ad}) + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad}+L_{fd}} = L_d - \frac{L_{ad}^2}{L_{ffd}} \quad \longrightarrow \quad L_d - L_d' = \frac{L_{ad}^2}{L_{ffd}}$$

$$E_q' = -\frac{L_{ad}^2}{L_{ffd}}i_d + E_I \quad \longleftrightarrow \quad E_q' = E_I - (L_d - L_d')i_d$$

$$p\Psi_{fd} = e_{fd} - R_{fd}i_{fd} \quad \xrightarrow{L_{ad}/L_{ffd}} \quad p\left(\frac{L_{ad}}{L_{ffd}}\Psi_{fd}\right) = \frac{L_{ad}}{R_{fd}}\frac{R_{fd}}{L_{ffd}}e_{fd} - \frac{R_{fd}}{L_{ffd}}L_{ad}i_{fd}$$

$$\longrightarrow \quad pE_q' = \frac{1}{T_{d0}'}(E_{fd} - E_I)$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

$$e_d = -\psi_q - R_a i_d$$

$$e_q = \psi_d - R_a i_q$$

$$\psi_d = -L_d i_d + E_I$$

$$\psi_q = -L_q i_q$$

$$E'_q = E_I - (L_d - L'_d) i_d$$

$$pE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - E_I)$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

$$e_q = \psi_d - R_a i_q = -X_d i_d + X_{ad} i_{fd} - R_a i_q = -X_d i_d + E_I - R_a i_q \quad \longrightarrow \quad E_I = e_q + X_d i_d + R_a i_q$$

$$\longrightarrow \quad jE_I = j e_q + j X_d i_d + j R_a i_q \quad \longleftrightarrow \quad \tilde{E}_I = \tilde{e}_q + j X_d \tilde{i}_d + R_a \tilde{i}_q$$

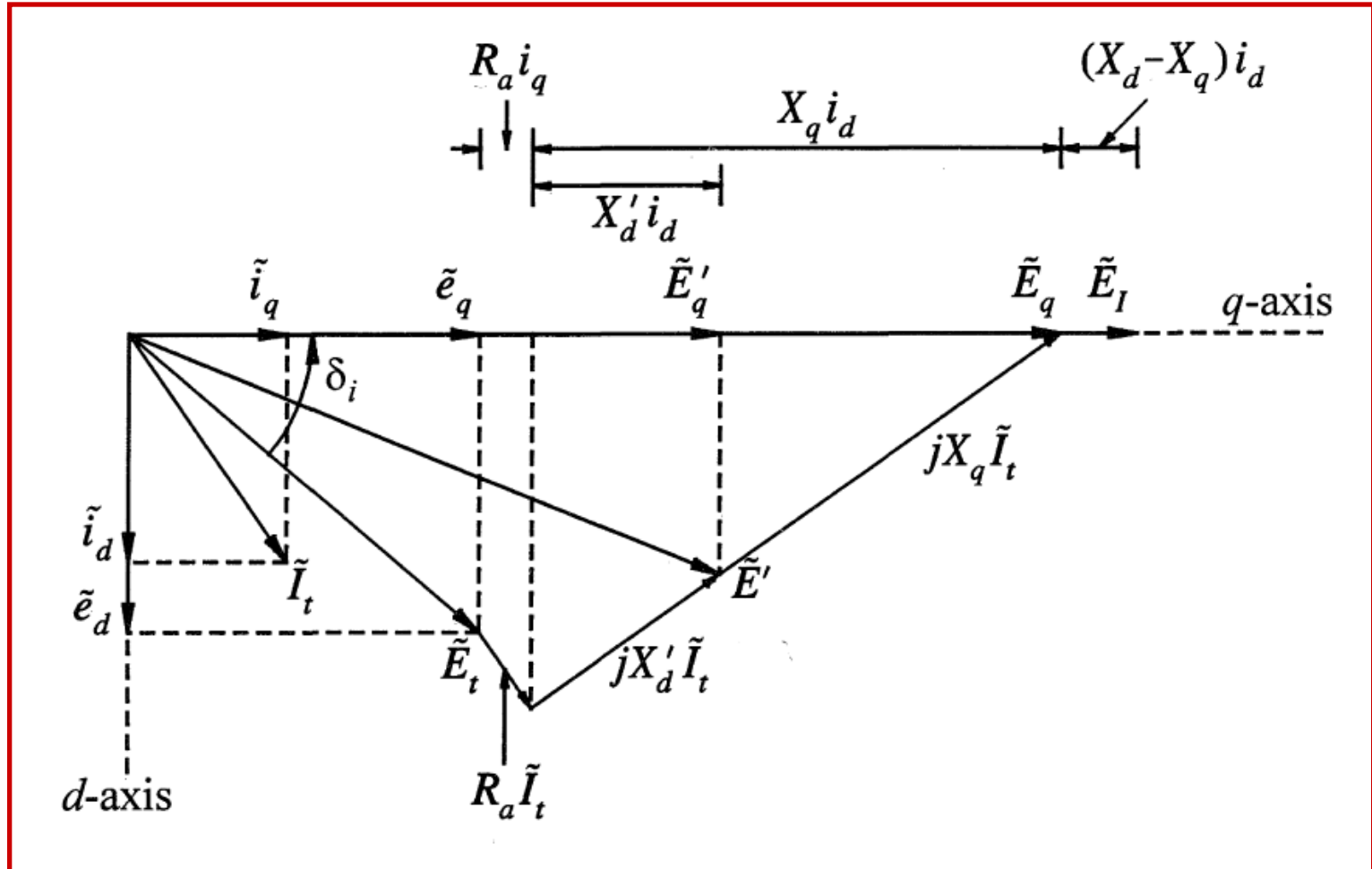
$$E'_q = E_I - (L_d - L'_d) i_d \quad \longrightarrow \quad E'_q = e_q + X_d i_d + R_a i_q - X_d i_d + X'_d i_d = e_q + X'_d i_d + R_a i_q$$

$X'_d = L'_d,$

$$\longrightarrow \quad jE'_q = j e_q + j X'_d i_d + j R_a i_q \quad \longleftrightarrow \quad \tilde{E}'_q = \tilde{e}_q + j X'_d \tilde{i}_d + R_a \tilde{i}_q$$

$$\tilde{E}_q = j[X_{ad} i_{fd} - (X_d - X_q) i_d] \quad \longrightarrow \quad \tilde{E}_I = \tilde{E}_q + j(X_d - X_q) \tilde{i}_d$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria



Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

$$\tilde{E}_t = e_d + je_q = \tilde{e}_d + \tilde{e}_q$$

$$\tilde{E}' = \tilde{E}_t + (R_a + jX_d')\tilde{I}_t$$

$$\begin{aligned}\tilde{E}'_q &= q\text{-axis component of } \tilde{E}' \\ &= \tilde{e}_q + R_a \tilde{i}_q + jX_d' \tilde{i}_d\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{E}_q &= \text{Voltage behind } R_a + jX_q \\ &= \tilde{E}_t + (R_a + jX_q)\tilde{I}_t \\ &= \tilde{e}_q + R_a \tilde{i}_q + jX_q \tilde{i}_d\end{aligned}$$

$$\tilde{E}_I = \tilde{E}_q + j(X_d - X_q)\tilde{i}_d$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

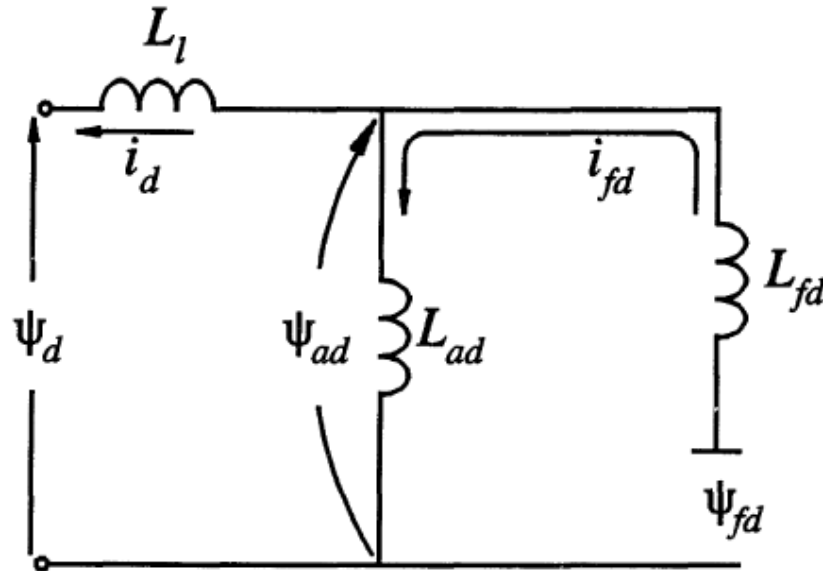
❑ Modelo de flujo concatenado constante (modelo clasico)

Para estudios en los cuales el periodo de análisis es pequeño comparado con T'_{d0}

El modelo de maquina síncrona anterior a menudo es simplificado suponiendo que E'_q es constante (o sea ψ_{fd} constante) . Esta suposición elimina la única ecuación diferencial restante asociada con las características eléctricas de la maquina. Una ulterior simplificación es considerar que $X'_d = X'_q$, y suponer que ψ_{1q} también es constante.

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ Modelo de flujo concatenado constante (modelo clasico)



$$\psi_{ad} = -L_{ad}i_d + L_{ad}i_{fd}$$

$$\psi_d = \psi_{ad} - L_l i_d \quad i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fd}}$$

$$\psi_{fd} = \psi_{ad} + L_{fd}i_{fd}$$

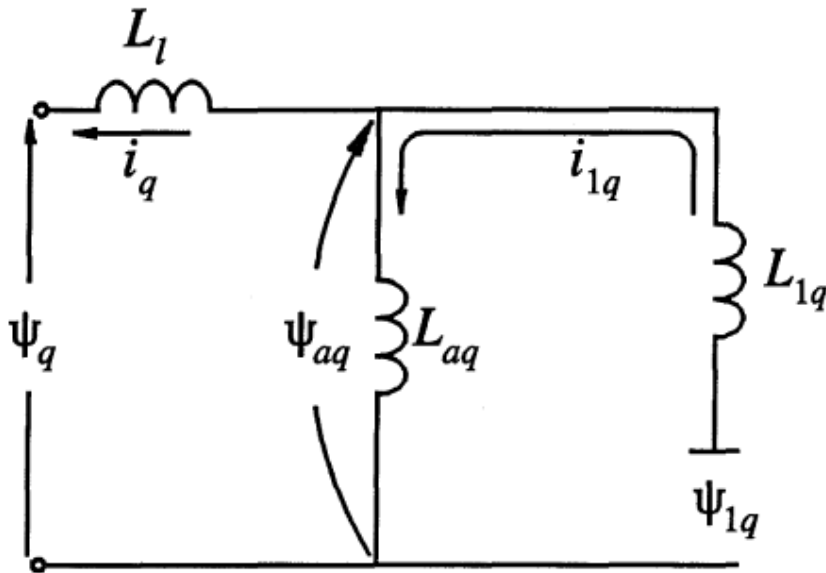
$$L'_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}}} = L'_d - L_l$$

$$\psi_{ad} = -L_{ad}i_d + \frac{L_{ad}}{L_{fd}}(\psi_{fd} - \psi_{ad})$$

$$\psi_{ad} = L'_{ad} \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} \right)$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ Modelo de flujo concatenado constante (modelo clasico)



$$\psi_{aq} = L'_{aq} \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} \right)$$

$$L_{aq} = L'_d - L_l$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ Modelo de flujo concatenado constante (modelo clasico)

$$\begin{aligned} e_d &= -R_a i_d - \omega \psi_q \\ &= -R_a i_d + \omega (L_l i_q - \psi_{aq}) \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} e_d &= -R_a i_d + \omega L_l i_q - \omega L'_{aq} \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} \right) \\ &= -R_a i_d + \omega (L_l + L'_{aq}) i_q - \omega L'_{aq} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} \right) \\ &= -R_a i_d + X'_q i_q + E'_d \end{aligned}$$

$$\rightarrow \quad E'_d = -\omega L'_{aq} \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} \right)$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

□ Modelo de flujo concatenado constante (modelo clasico)

$$e_q = -R_a i_q - X'_d i_d + E'_q \qquad E'_q = \omega L'_{ad} \left(\frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} \right)$$

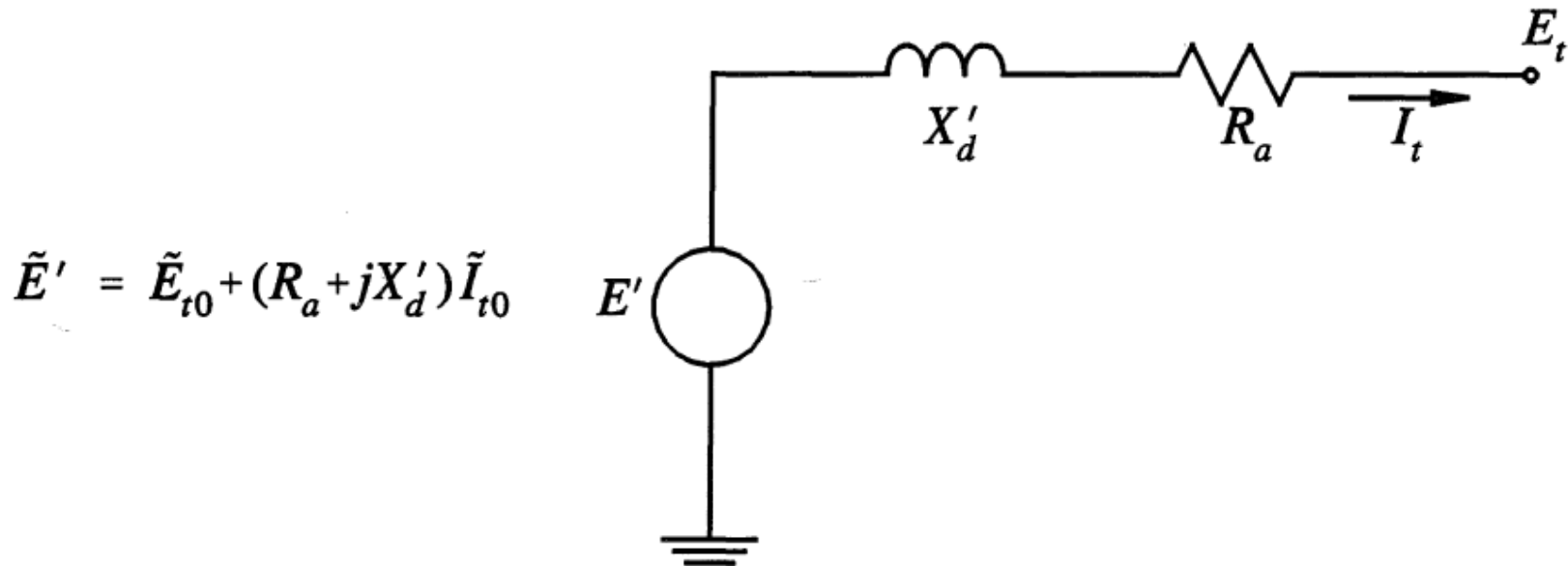
$$\begin{aligned} e_d + j e_q &= (E'_d + j E'_q) - R_a (i_d + j i_q) + X'_d (i_q - j i_d) \\ &= (E'_d + j E'_q) - R_a (i_d + j i_q) - j X'_d (i_d + j i_q) \end{aligned}$$

$$\tilde{E}_t = \tilde{E}' - (R_a + j X'_d) \tilde{I}_t$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}' &= E'_d + j E'_q \\ &= L'_{ad} \left(-\frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} + j \frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} \right) \end{aligned}$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

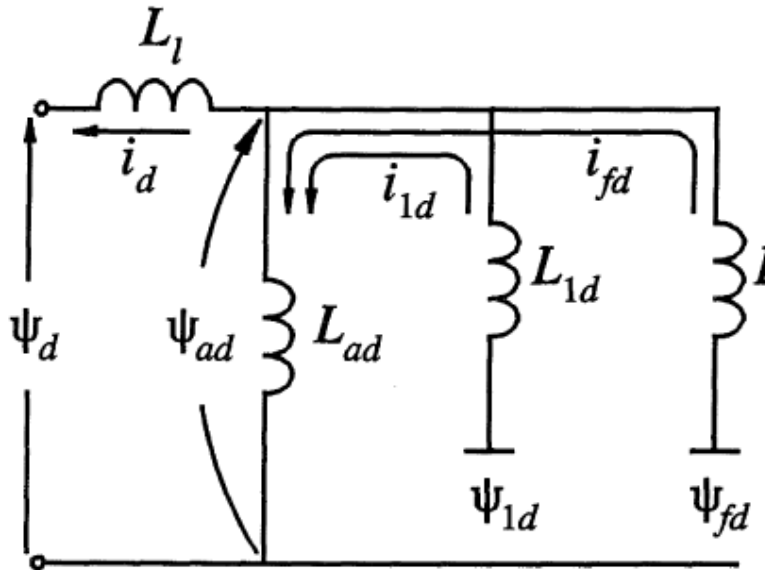
❑ Modelo de flujo concatenado constante (modelo clasico)



Simplified transient model

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

Modelo de flujo concatenado constante incluyendo circuitos subtransitorios

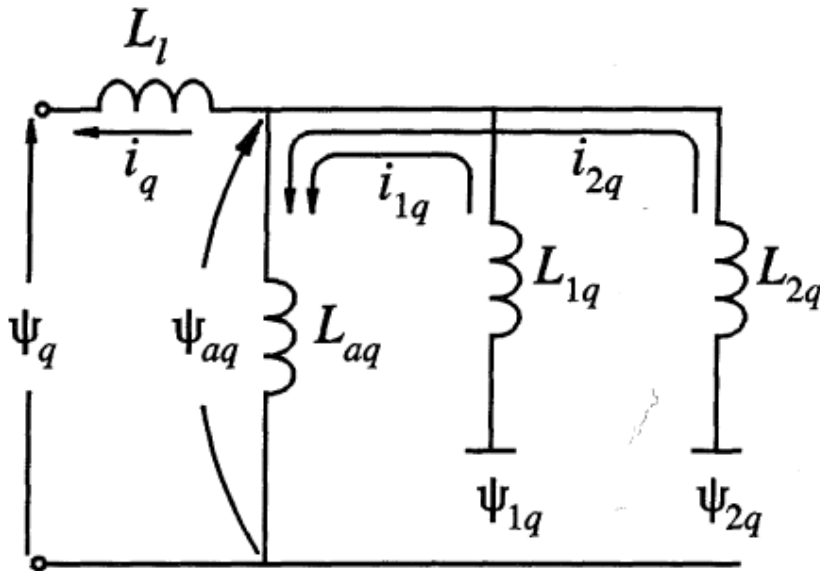


$$\begin{aligned}\psi_{ad} &= -L_{ad}i_d + L_{ad}i_{fd} + L_{ad}i_{1d} \\ &= -L_{ad}i_d + \frac{L_{ad}}{L_{fd}}(\psi_{fd} - \psi_{ad}) + \frac{L_{ad}}{L_{1d}}(\psi_{1d} - \psi_{ad}) \\ &= L_{ad}'' \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)\end{aligned}$$

$$L_{ad}'' = \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} = L_d'' - L_l$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

- Modelo de flujo concatenado constante incluyendo circuitos subtransitorios



$$\psi_{aq} = L_{aq}'' \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right)$$

$$L_{aq}'' = L_q'' - L_l$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ Modelo de flujo concatenado constante incluyendo circuitos subtransitorios

$$\begin{aligned}e_d &= -R_a i_d + \omega(L_l i_q - \psi_{aq}) \\&= -R_a i_d + \omega(L_l + L_{aq}'') i_q - \omega L_{aq}'' \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \\&= -R_a i_d + X_q'' i_q + E_d''\end{aligned}$$

$$e_q = -R_a i_q - X_d'' i_d + E_q''$$

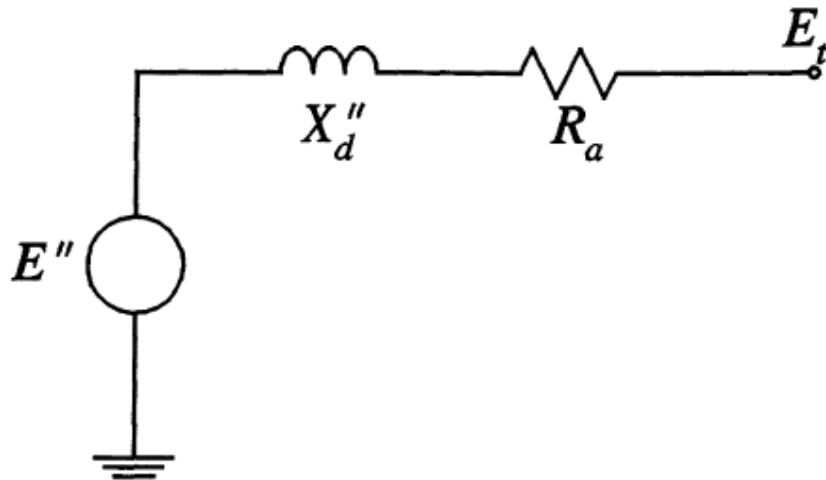
$$E_d'' = -\omega L_{aq}'' \left(\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right)$$

$$E_q'' = \omega L_{ad}'' \left(\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)$$

Representación de la maquina síncrona en estudios de estabilidad transitoria

❑ Modelo de flujo concatenado constante incluyendo circuitos subtransitorios

$$X_d'' = X_q''.$$

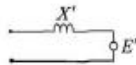
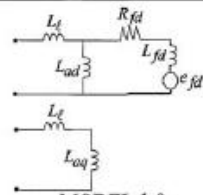
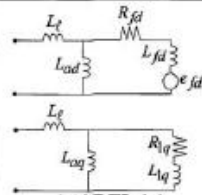
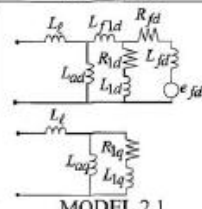
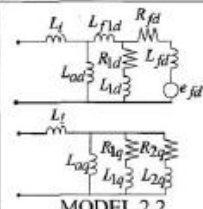
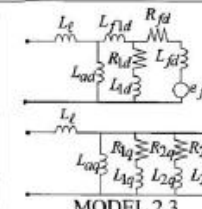
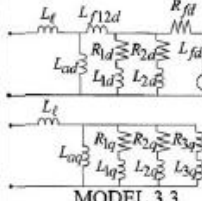


$$\begin{aligned}\tilde{E}_t &= e_d + je_q \\ &= (E_d'' + jE_q'') - (R_a + jX_d'')(i_d + ji_q) \\ &= \tilde{E}'' - (R_a + jX_d'')\tilde{I}_t\end{aligned}$$

Simplified model for subtransient period

Modelos Dinámicos de Generadores Síncronos

IEEE Std 1110™ - 2002: IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power Systems Stability Analyses

CONSTANT ROTOR FLUX LINKAGES	THEVENIN EQUIVALENT 			
	NO EQUIVALENT DAMPER CIRCUIT	ONE EQUIVALENT DAMPER CIRCUIT	TWO EQUIVALENT DAMPER CIRCUITS	THREE EQUIVALENT DAMPER CIRCUITS
Q-AXIS D-Axis				
FIELD CIRCUIT ONLY	 MODEL 1.0	 MODEL 1.1	NOT CONSIDERED	NOT CONSIDERED
FIELD CIRCUIT + ONE EQUIVALENT DAMPER CIRCUIT	NOT CONSIDERED	 MODEL 2.1	 MODEL 2.2	 MODEL 2.3
FIELD CIRCUIT + TWO EQUIVALENT DAMPER CIRCUITS	NOT CONSIDERED	NOT CONSIDERED	NOT CONSIDERED	 MODEL 3.3

Modelos Dinámicos de Generadores Síncronos

❑ Modelos Dinámicos de Generadores Síncronos provistos por ETAP®11

- ✓ Modelo Equivalente
- ✓ Modelo transitorio para generadores de rotor cilíndrico
- ✓ Modelo subtransitorio para generadores de rotor cilíndrico
- ✓ Modelo transitorio para generadores de polos salientes
- ✓ Modelo subtransitorio para generadores de polos salientes

Modelos Dinámicos de Generadores Síncronos

Notaciones y Símbolos en ETAP®11

X_d''	=	Direct-axis subtransient synchronous reactance
X_d'	=	Direct-axis transient synchronous reactance
X_d	=	Direct-axis synchronous reactance
X_q''	=	Quadrature-axis subtransient synchronous reactance
X_q	=	Quadrature-axis synchronous reactance
X_q'	=	Quadrature-axis transient synchronous reactance
X_l	=	Armature leakage reactance
R_a	=	Armature resistance
X/R	=	Machine X/R ration ($= X_d''/R_a$)
T_{do}''	=	Direct-axis subtransient open-circuit time constant
T_{do}'	=	Direct-axis transient open-circuit time constant
T_{qo}''	=	Quadrature -axis subtransient open-circuit time constant
T_{qo}'	=	Quadrature -axis transient open-circuit time constant
S_{100}	=	Saturation factor corresponding to 100 percent terminal voltage
S_{120}	=	Saturation factor corresponding to 120 percent terminal voltage
H	=	Total inertia of the shaft
D	=	Shaft damping factor

Modelo Equivalente

Synchronous Generator Editor - G1

PSS	Harmonic	Protection	Reliability	Fuel Cost	Remarks	Comment																								
Info	Rating	Capability	Imp/Model	Grounding	Inertia	Exciter	Governor																							
16.5 kV 247.5 MW Swing																														
Impedance <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%</th> <th></th> <th>%</th> <th></th> <th>Ohm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Xd"</td> <td>19</td> <td>Xd"/Ra</td> <td>19</td> <td>Ra</td> <td>0.011</td> </tr> <tr> <td>X2</td> <td>18</td> <td>X2/R2</td> <td>9</td> <td>R2</td> <td>0.022</td> </tr> <tr> <td>X0</td> <td>7</td> <td>X0/R0</td> <td>7</td> <td>R0</td> <td>0.011</td> </tr> </tbody> </table>					%		%		Ohm	Xd"	19	Xd"/Ra	19	Ra	0.011	X2	18	X2/R2	9	R2	0.022	X0	7	X0/R0	7	R0	0.011	Xd" Tolerance + 0 %		
	%		%		Ohm																									
Xd"	19	Xd"/Ra	19	Ra	0.011																									
X2	18	X2/R2	9	R2	0.022																									
X0	7	X0/R0	7	R0	0.011																									
Dynamic Model ☐ Subtransient ☐ Transient ☒ Equivalent				Inertia H 9.55																										
Typical Data Xd 155 % Xq 155 % Tdo' 6.5 Sec Xdu 165 % Xqu 165 % Xd' 28 % XL 15 %				Sbreak 0.8 S100 1.07 S120 1.18 Damping 0																										
Type Gen. Steam Turbo Rotor Round-Rotor				IEC 60909 S.C. Exciter Type Turbine 130% Compound Exc. ☐ PG 7.5 %																										

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E'_i)$$

$$E_q = E'_q + j(X_q - X'_d)I_d$$

$$E_t = E_q - (R_a + jX_q)I_t$$

$$E_i = E_t + R_a I_t + j(X_d I_d + X_q I_q) + f(E'_q)$$

Modelo transitorio para generadores de rotor cilíndrico

Synchronous Generator Editor - G1

PSS	Harmonic	Protection	Reliability	Fuel Cost	Remarks	Comment																																				
Info	Rating	Capability	Imp/Model	Grounding	Inertia	Governor																																				
16.5 kV 247.5 MW Swing																																										
Impedance <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%</th> <th></th> <th>%</th> <th></th> <th>Ohm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Xd"</td> <td>19</td> <td>Xd"/Ra</td> <td>19</td> <td>Ra</td> <td>0.011</td> </tr> <tr> <td>X2</td> <td>18</td> <td>X2/R2</td> <td>9</td> <td>R2</td> <td>0.022</td> </tr> <tr> <td>X0</td> <td>7</td> <td>X0/R0</td> <td>7</td> <td>R0</td> <td>0.011</td> </tr> </tbody> </table>					%		%		Ohm	Xd"	19	Xd"/Ra	19	Ra	0.011	X2	18	X2/R2	9	R2	0.022	X0	7	X0/R0	7	R0	0.011	Xd" Tolerance + 0 % - 0 %														
	%		%		Ohm																																					
Xd"	19	Xd"/Ra	19	Ra	0.011																																					
X2	18	X2/R2	9	R2	0.022																																					
X0	7	X0/R0	7	R0	0.011																																					
Dynamic Model ☐ Subtransient ☒ Transient ☐ Equivalent Typical Data				<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%</th> <th>%</th> <th>Sec</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Xd</td> <td>155</td> <td>Xq</td> <td>155</td> <td>Tdo'</td> <td>6.5</td> </tr> <tr> <td>Xdu</td> <td>165</td> <td>Xqu</td> <td>165</td> <td>S100</td> <td>1.07</td> </tr> <tr> <td>Xd'</td> <td>28</td> <td>Xq'</td> <td>65</td> <td>Tqo'</td> <td>1.25</td> </tr> <tr> <td>X_L</td> <td>15</td> <td></td> <td></td> <td>S120</td> <td>1.18</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Damping</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>				%	%	Sec			Xd	155	Xq	155	Tdo'	6.5	Xdu	165	Xqu	165	S100	1.07	Xd'	28	Xq'	65	Tqo'	1.25	X _L	15			S120	1.18					Damping	0
	%	%	Sec																																							
Xd	155	Xq	155	Tdo'	6.5																																					
Xdu	165	Xqu	165	S100	1.07																																					
Xd'	28	Xq'	65	Tqo'	1.25																																					
X _L	15			S120	1.18																																					
				Damping	0																																					
Type Gen. Steam Turbo Rotor Round-Rotor				IEC 60909 S.C. Exciter Type Turbine 130% ☐ Compound Exc. PG 7.5 %																																						

$$E_h = E_t + (R_h + jX_h)I_t$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E'_i)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{qo}} E'_d$$

$$E'_q = E_{hq} + (X_d - X_h)I_d$$

$$E'_d = E_{hd} - (X'_q - X_h)I_q$$

$$E_q = E_{hq} + (X_d - X_h)I_d$$

$$E_d = E_{hd} - (X_q - X_h)I_q$$

$$E_i = E_q + f(E_q)$$

$$R_h + jX_h = \frac{R_a^2 + X'_d X'_q}{R_a - j(X'_d X'_q) / 2}$$

Modelo subtransitorio para generadores de rotor cilíndrico

Synchronous Generator Editor - G1

PSS	Harmonic	Protection	Reliability	Fuel Cost	Remarks	Comment																																								
Info	Rating	Capability	Imp/Model	Grounding	Inertia	Exciter																																								
16.5 kV 247.5 MW Swing																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Impedance</th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> </tr> <tr> <th></th> <th>%</th> <th></th> <th>%</th> <th></th> <th>Ohm</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Xd"</td> <td>19</td> <td>Xd"/Ra</td> <td>19</td> <td>Ra</td> <td>1</td> <td>Ra</td> <td>0.011</td> </tr> <tr> <td>X2</td> <td>18</td> <td>X2/R2</td> <td>9</td> <td>R2</td> <td>2</td> <td>R2</td> <td>0.022</td> </tr> <tr> <td>X0</td> <td>7</td> <td>X0/R0</td> <td>7</td> <td>R0</td> <td>1</td> <td>R0</td> <td>0.011</td> </tr> </tbody> </table>							Impedance									%		%		Ohm			Xd"	19	Xd"/Ra	19	Ra	1	Ra	0.011	X2	18	X2/R2	9	R2	2	R2	0.022	X0	7	X0/R0	7	R0	1	R0	0.011
Impedance																																														
	%		%		Ohm																																									
Xd"	19	Xd"/Ra	19	Ra	1	Ra	0.011																																							
X2	18	X2/R2	9	R2	2	R2	0.022																																							
X0	7	X0/R0	7	R0	1	R0	0.011																																							
				Xd" Tolerance																																										
				+ 0 %																																										
				Inertia																																										
				H 9.55																																										
Dynamic Model																																														
☒ Subtransient		Xd	155	Xq	155	Tdo'	6.5																																							
☐ Transient		Xdu	165	Xqu	165	Tdo"	0.035																																							
☐ Equivalent		Xd'	28	Xq'	65	Tqo'	1.25																																							
☐ Typical Data		X _L	15	Xq"	19	Tqo"	0.035																																							
						Sbreak	0.8																																							
						S100	1.07																																							
						S120	1.18																																							
						Damping	0																																							
Type																																														
Gen.		Steam Turbo																																												
Rotor		Round-Rotor																																												
IEC 60909 S.C.																																														
Exciter Type		Turbine 130%																																												
		PG 7.5																																												
		☐ Compound Exc.																																												

$$E_h = E_t + (R_h + jX_h)I_t$$

$$\frac{dE_q''}{dt} = \frac{1}{T_{do}''} \left[E_q' + (X_d' - X_d'')I_d - E_q'' \right]$$

$$\frac{dE_d''}{dt} = -\frac{1}{T_{qo}''} \left[E_d' - (X_q' - X_q'')I_q - E_d'' \right]$$

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{do}'} (E_{fd} - E_i)$$

$$\frac{dE_d'}{dt} = -\frac{1}{T_{qo}'} E_d'$$

$$E_q' = E_{hq} + (X_d' - X_h)I_d$$

$$E_d' = E_{hd} - (X_q' - X_h)I_q$$

$$E_q = E_{hq} + (X_d - X_h)I_d$$

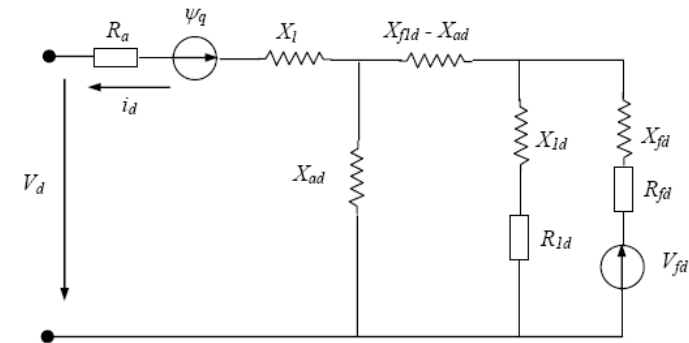
$$E_d = E_{hd} - (X_q - X_h)I_q$$

$$E_i = E_q + f(E_q)$$

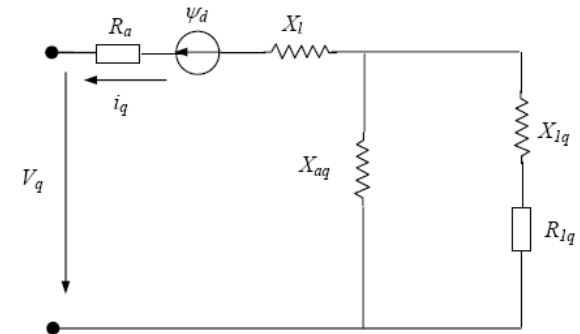
Modelo transitorio para generadores de polos salientes

Synchronous Generator Editor - G1

PSS	Harmonic	Protection	Reliability	Fuel Cost	Remarks	Comment																																				
Info	Rating	Capability	Imp/Model	Grounding	Inertia	Exciter	Governor																																			
16,5 kV 247,5 MW Swing																																										
Impedance <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">Ohm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X_d''</td> <td>25</td> <td>X_d''/R_a</td> <td>25</td> <td>R_a</td> <td>0,011</td> </tr> <tr> <td>X_2</td> <td>18</td> <td>X_2/R_2</td> <td>9</td> <td>R_2</td> <td>0,022</td> </tr> <tr> <td>X_0</td> <td>7</td> <td>X_0/R_0</td> <td>7</td> <td>R_0</td> <td>0,011</td> </tr> </tbody> </table>							%		%		Ohm		X_d''	25	X_d''/R_a	25	R_a	0,011	X_2	18	X_2/R_2	9	R_2	0,022	X_0	7	X_0/R_0	7	R_0	0,011												
%		%		Ohm																																						
X_d''	25	X_d''/R_a	25	R_a	0,011																																					
X_2	18	X_2/R_2	9	R_2	0,022																																					
X_0	7	X_0/R_0	7	R_0	0,011																																					
Dynamic Model ☐ Subtransient ☒ Transient ☐ Equivalent Typical Data																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">Sec</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X_d</td> <td>99</td> <td>X_q</td> <td>66</td> <td>$T_{do'}$</td> <td>5,25</td> </tr> <tr> <td>X_{du}</td> <td>105</td> <td>X_{qu}</td> <td>70</td> <td>Sbreak</td> <td>0,8</td> </tr> <tr> <td>X_d'</td> <td>35</td> <td>X_q'</td> <td>66</td> <td>S100</td> <td>1,07</td> </tr> <tr> <td>X_L</td> <td>15</td> <td></td> <td></td> <td>S120</td> <td>1,18</td> </tr> <tr> <td colspan="4"></td> <td>Damping</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>							%		%		Sec		X_d	99	X_q	66	$T_{do'}$	5,25	X_{du}	105	X_{qu}	70	Sbreak	0,8	X_d'	35	X_q'	66	S100	1,07	X_L	15			S120	1,18					Damping	0
%		%		Sec																																						
X_d	99	X_q	66	$T_{do'}$	5,25																																					
X_{du}	105	X_{qu}	70	Sbreak	0,8																																					
X_d'	35	X_q'	66	S100	1,07																																					
X_L	15			S120	1,18																																					
				Damping	0																																					
Type <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Gen.</td> <td>Steam Turbo</td> </tr> <tr> <td>Rotor</td> <td>Salient-Pole</td> </tr> </tbody> </table>							Gen.	Steam Turbo	Rotor	Salient-Pole																																
Gen.	Steam Turbo																																									
Rotor	Salient-Pole																																									
IEC 60909 S.C. Exciter Type: Salient Pole 160% ☐ Compound Exc. PG: 7,5%																																										
OK Cancel																																										



D-Axis Equivalent Circuit for Transient Model



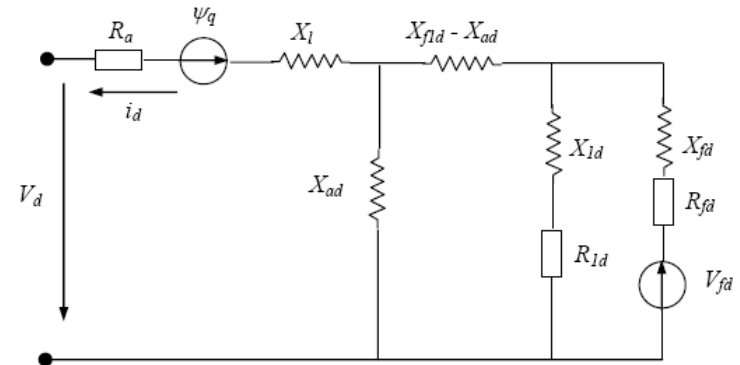
Q-Axis Equivalent Circuit for Transient Model

Modelo subtransitorio para generadores de polos salientes

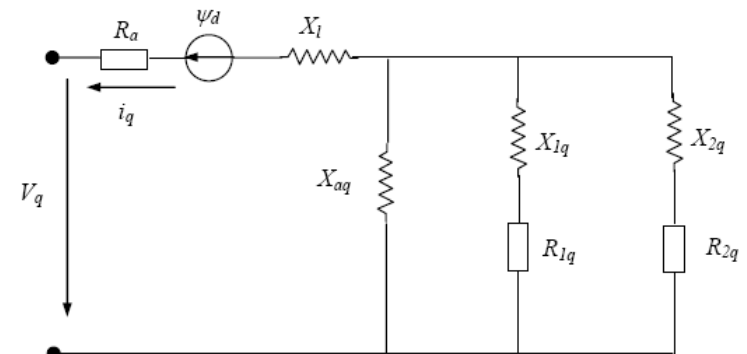
Synchronous Generator Editor - G1

PSS	Harmonic	Protection	Reliability	Fuel Cost	Remarks	Comment																														
Info	Rating	Capability	Imp/Model	Grounding	Inertia	Governor																														
16,5 kV 247,5 MW Swing																																				
Impedance <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">Ohm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X_d''</td> <td>25</td> <td>X_d''/R_a</td> <td>25</td> <td>R_a</td> <td>0,011</td> </tr> <tr> <td>X_2</td> <td>18</td> <td>X_2/R_2</td> <td>9</td> <td>R_2</td> <td>0,022</td> </tr> <tr> <td>X_0</td> <td>7</td> <td>X_0/R_0</td> <td>7</td> <td>R_0</td> <td>0,011</td> </tr> </tbody> </table>							%		%		Ohm		X_d''	25	X_d''/R_a	25	R_a	0,011	X_2	18	X_2/R_2	9	R_2	0,022	X_0	7	X_0/R_0	7	R_0	0,011						
%		%		Ohm																																
X_d''	25	X_d''/R_a	25	R_a	0,011																															
X_2	18	X_2/R_2	9	R_2	0,022																															
X_0	7	X_0/R_0	7	R_0	0,011																															
Dynamic Model ☒ Subtransient ☐ Transient ☐ Equivalent Typical Data <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">%</th> <th colspan="2">Sec</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X_d</td> <td>99</td> <td>X_q</td> <td>66</td> <td>T_{d0}'</td> <td>5,25</td> </tr> <tr> <td>X_{du}</td> <td>105</td> <td>X_{qu}</td> <td>70</td> <td>T_{d0}''</td> <td>0,03</td> </tr> <tr> <td>X_d'</td> <td>35</td> <td>X_q'</td> <td>66</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>X_L</td> <td>15</td> <td>$X_{q''}$</td> <td>33</td> <td>T_{qo}''</td> <td>0,05</td> </tr> </tbody> </table>							%		%		Sec		X_d	99	X_q	66	T_{d0}'	5,25	X_{du}	105	X_{qu}	70	T_{d0}''	0,03	X_d'	35	X_q'	66			X_L	15	$X_{q''}$	33	T_{qo}''	0,05
%		%		Sec																																
X_d	99	X_q	66	T_{d0}'	5,25																															
X_{du}	105	X_{qu}	70	T_{d0}''	0,03																															
X_d'	35	X_q'	66																																	
X_L	15	$X_{q''}$	33	T_{qo}''	0,05																															
Type Gen. Steam Turbo Rotor Salient-Pole IEC 60909 S.C. Exciter Type Salient Pole 160% ☐ Compound Exc. PG 7,5 %																																				
Xd'' Tolerance + 0 % Inertia H 9,55																																				

OK Cancel



D-Axis Equivalent Circuit for Subtransient Model



Q-Axis Equivalent Circuit for Subtransient Model

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

La Estabilidad Transitoria es la habilidad del SEP de mantenerse en sincronismo frente a disturbios transitorios severos (falta de líneas de transmisión, pérdida de generación, o la pérdida de una gran demanda).

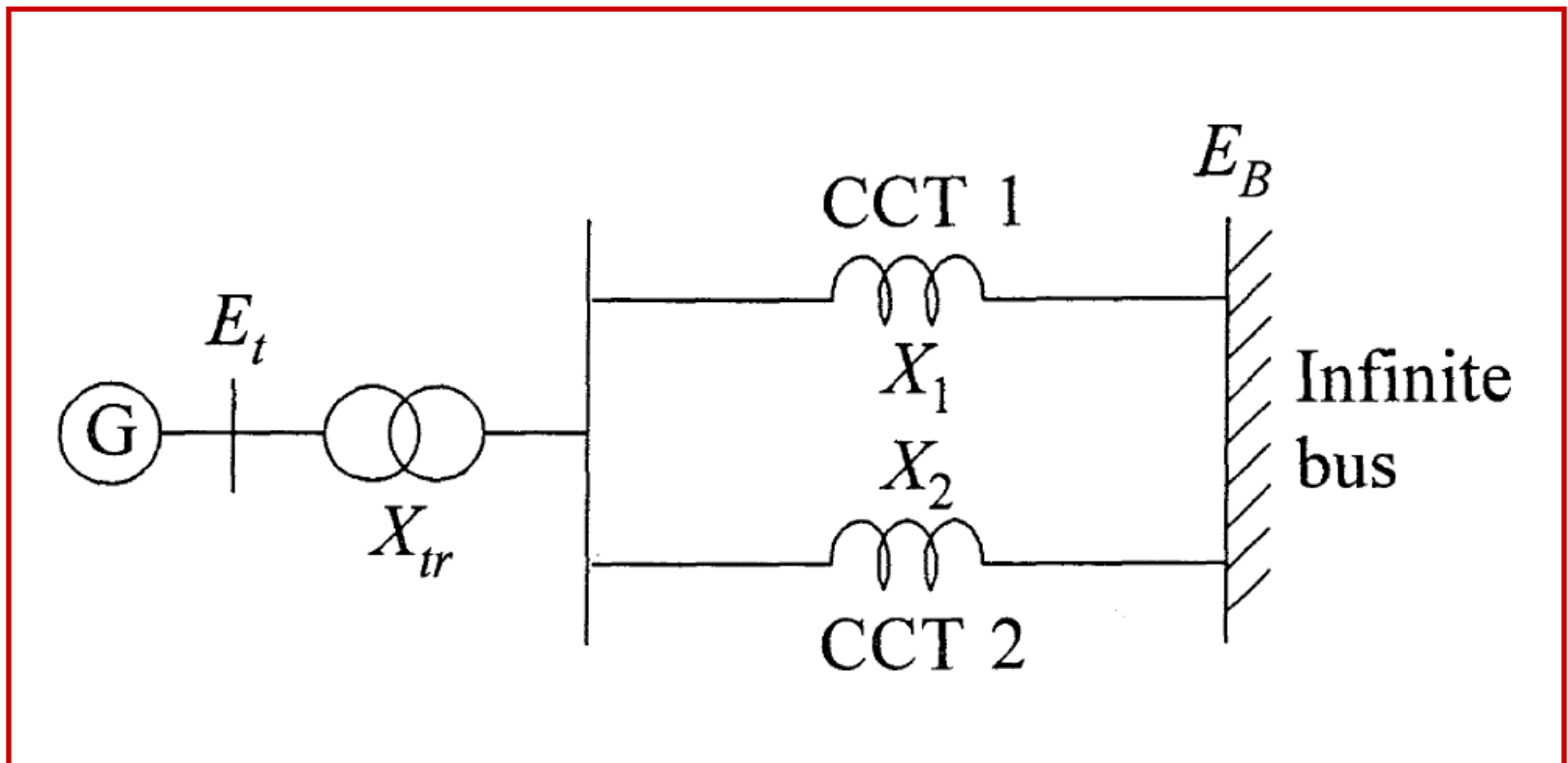
El sistema responde a tales perturbaciones con grandes excursiones de los ángulos de los rotores de los generadores síncronos, flujo de potencia, tensiones en barras y otras variables del sistema. La estabilidad es influenciada por las características no lineales del SEP.

Si la separación angular resultante entre los generadores en el SEP se mantiene acotada, el sistema mantiene el sincronismo.

La pérdida de sincronismo, debido a inestabilidad transitoria, si ocurre, usualmente se manifiesta dentro de los primeros 2 a 3 segundos de producida la perturbación.

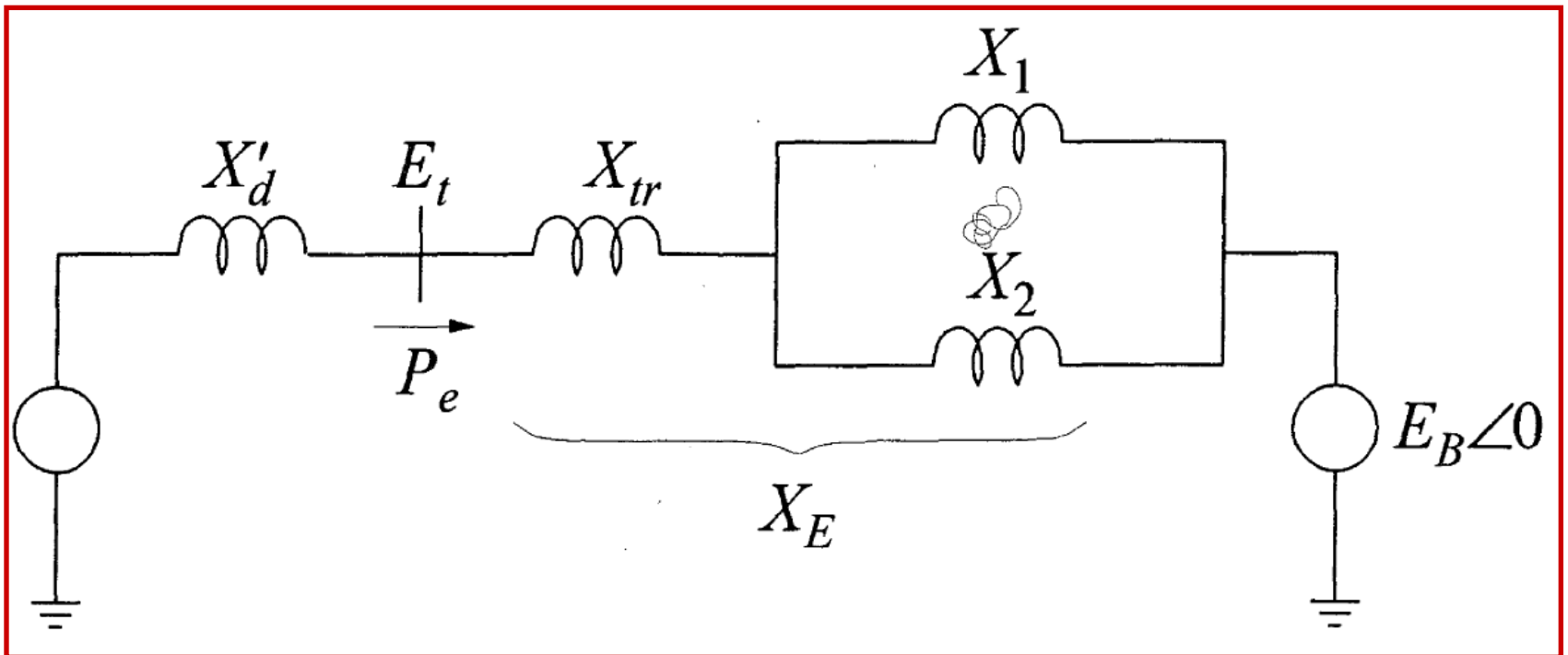
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

- ❑ Generador síncrono trifásico conectado a un gran sistema de potencia



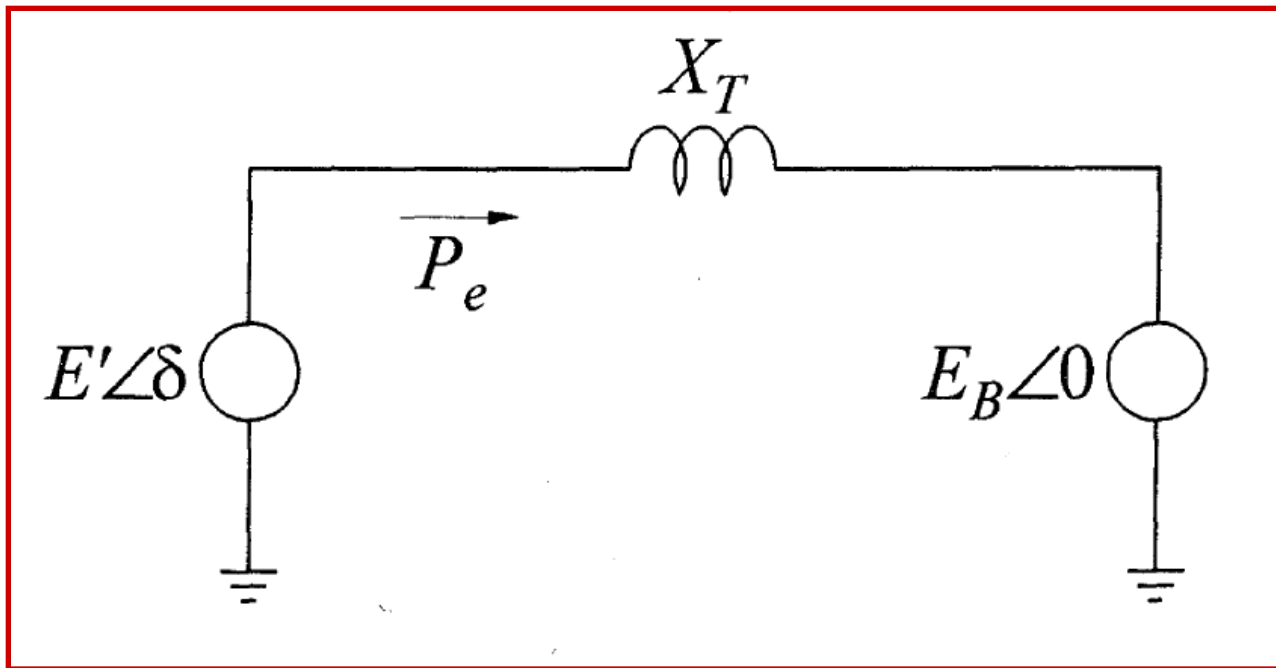
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Circuito equivalente



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Circuito equivalente reducido



$$\tilde{E}' = \tilde{E}_{t0} + jX'_d \tilde{I}_{t0}$$
$$X_T = X'_d + X_E$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

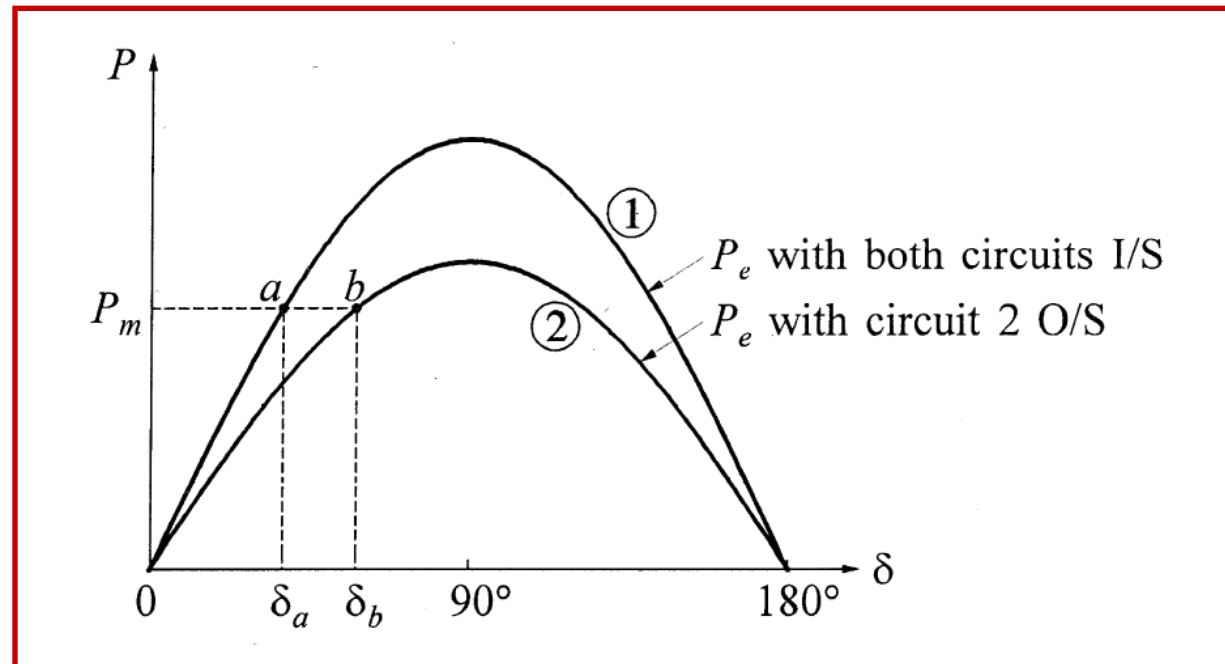
❑ Característica ángulo-potencia del generador síncrono trifásico

La relación potencia vs. ángulo con ambas líneas de transmisión en servicio se muestra en la figura como curva 1.

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta = P_{max} \sin \delta$$

En régimen permanente la potencia mecánica P_m iguala a la potencia eléctrica $P_{max} \sin(\delta)$ y la condición de operación se representa por el punto a de la curva.

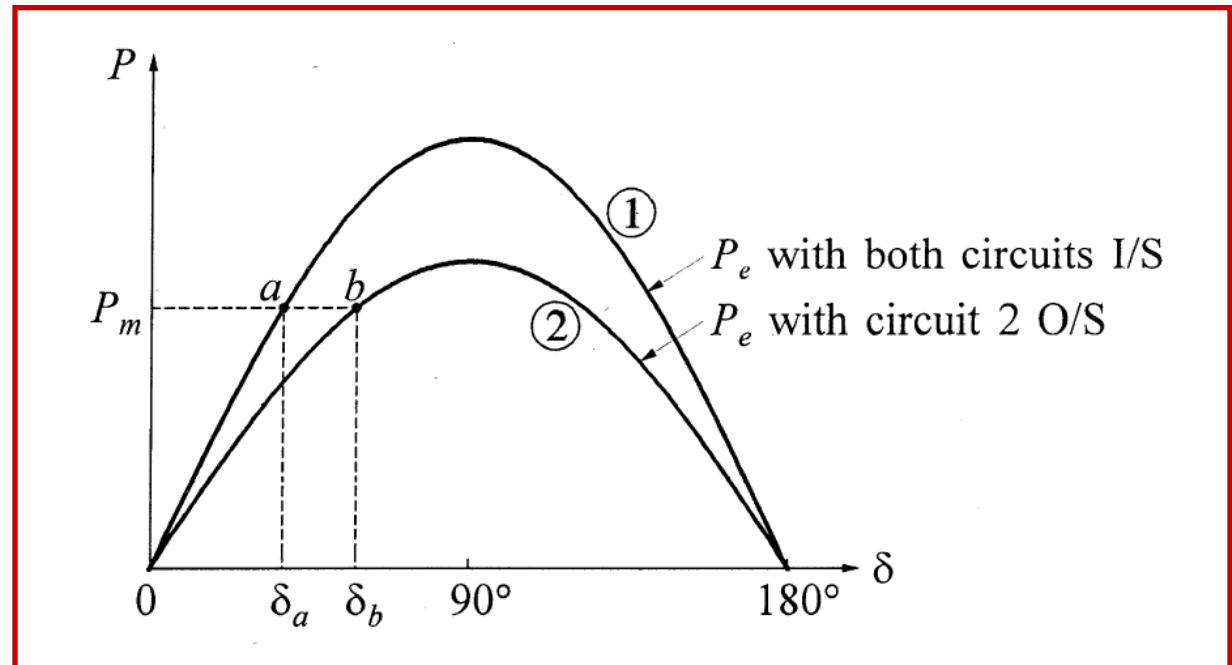
El ángulo del rotor es δ_a .



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Característica ángulo-potencia del generador síncrono trifásico

Si una de las líneas de transmisión sale de servicio la reactancia X_T aumenta. La relación potencia vs. ángulo se muestra en la figura como curva 2. La potencia eléctrica máxima $P_{\max}$ es ahora menor.

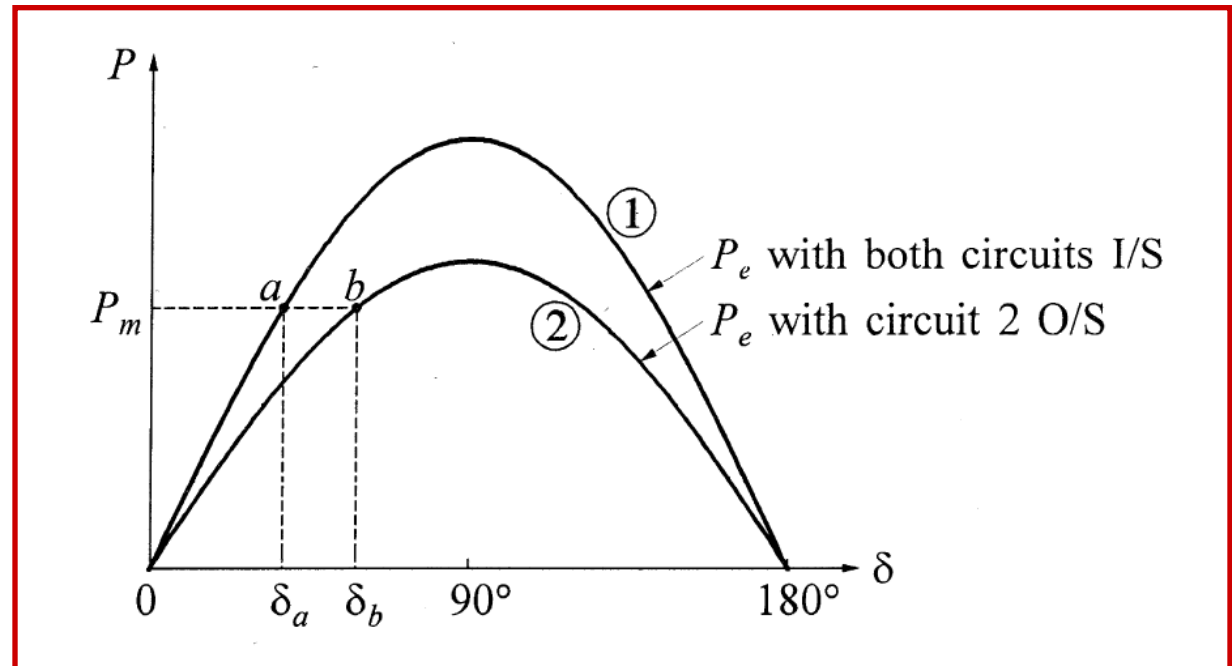


En régimen permanente, con una potencia mecánica P_m el ángulo del rotor ahora es δ_b y la condición de operación se representa por el punto b de la curva.

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Característica ángulo-potencia del generador síncrono trifásico

Con una reactancia X_T mayor, el ángulo del rotor debe ser mayor para poder transmitir la misma potencia eléctrica P_e . Durante la perturbación, la oscilación del ángulo del rotor esta superpuesta a la velocidad de sincronismo ω_0

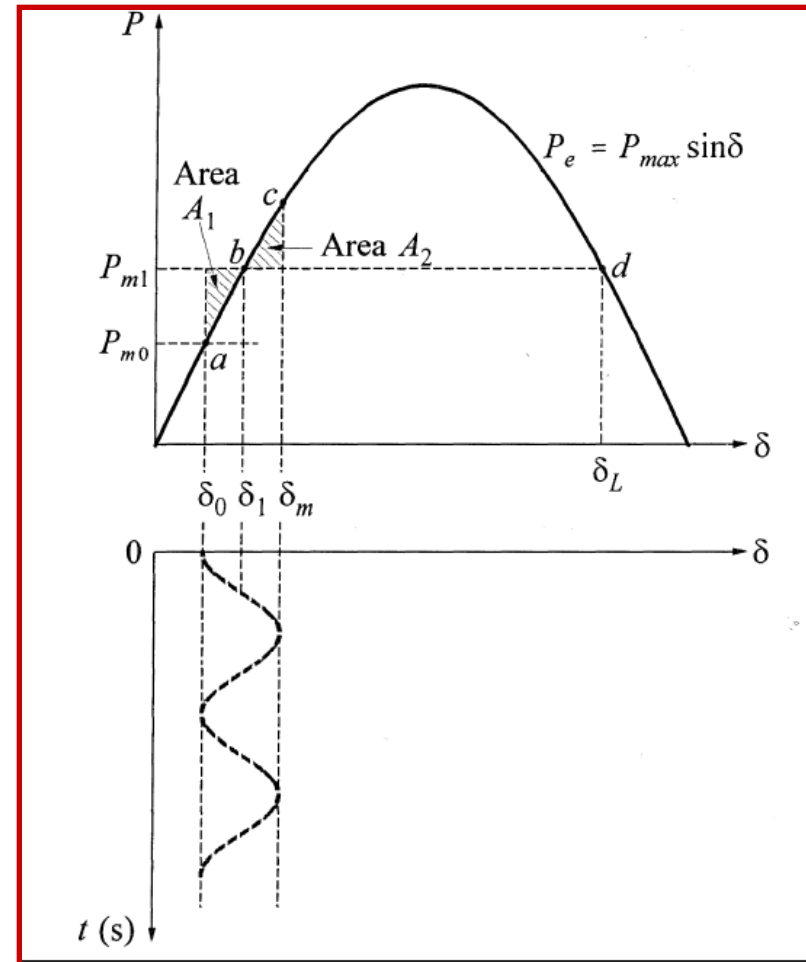


pero su desviación $\Delta\omega_r$ es mucho mas pequeña que ω_0 , por lo tanto la velocidad del generador es prácticamente igual a ω_0 . (➡ P_e [p.u.] $\approx T_e$ [p.u.])

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Característica ángulo-potencia del generador síncrono trifásico

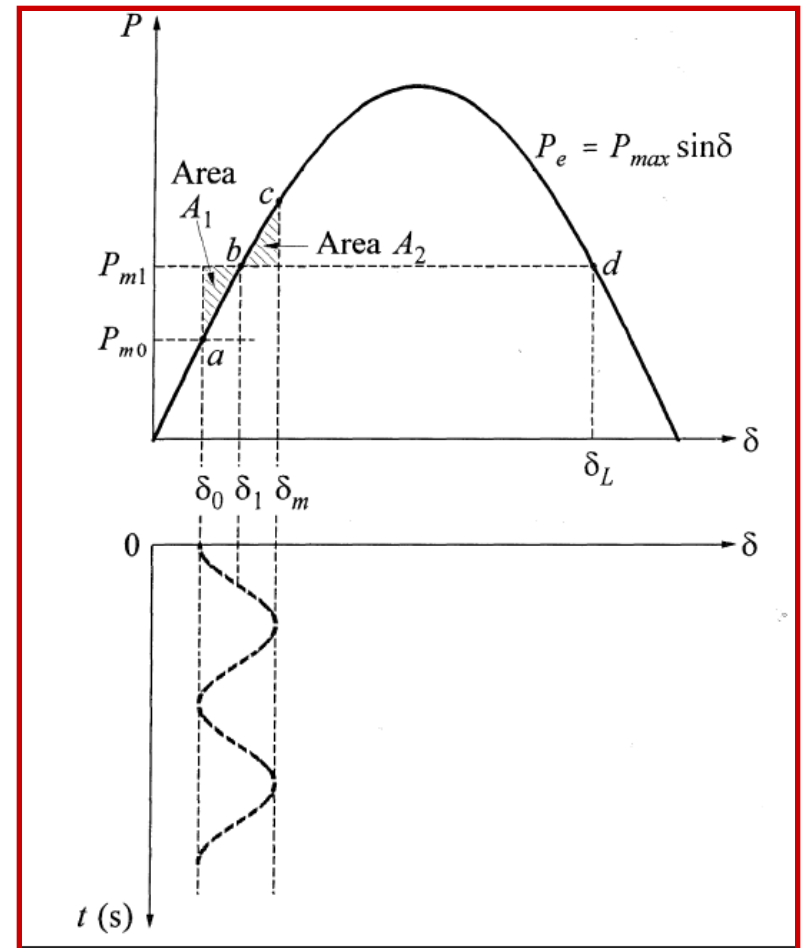
Analizamos a continuación el comportamiento transitorio del sistema, con ambas líneas en servicio, frente a un incremento súbito de la potencia mecánica de entrada al generador del valor P_{m0} al valor P_{m1} como se muestra en la figura siguiente. Debido a la inercia del rotor, el ángulo no puede cambiar súbitamente del valor δ_0 al valor δ_1 correspondiente al nuevo punto de equilibrio b tal que $P_{m1} = P_e$. La potencia mecánica ahora es mayor que la potencia eléctrica, razón por la cual actúa un par (o cupla o torque) que acelera al rotor del generador desde el punto inicial de operación al nuevo punto de equilibrio b , moviéndose por la curva P_e vs. δ a una tasa determinada por la ecuación de oscilación.



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Característica ángulo-potencia del generador síncrono trifásico

La diferencia entre P_{m1} y P_e en cualquier instante representa la potencia acelerante. Cuando el punto b se alcanza, la potencia acelerante sobre el rotor del generador es nula, pero la velocidad del rotor es superior a la velocidad de sincronismo ω_0 ; en consecuencia el ángulo del rotor continua incrementándose. Para valores de $\delta > \delta_1$ resulta $P_e > P_{m1}$ y en consecuencia el rotor del generador se desacelera. Para algún valor pico δ_m el rotor recupera la velocidad de sincronismo ω_0 pero como $P_e > P_{m1}$ el rotor continua desacelerando y su velocidad cae por debajo de la velocidad de sincronismo ω_0 , entonces el punto de operación recorre la curva P_e vs. δ de $c \rightarrow b$ y de $b \rightarrow a$.

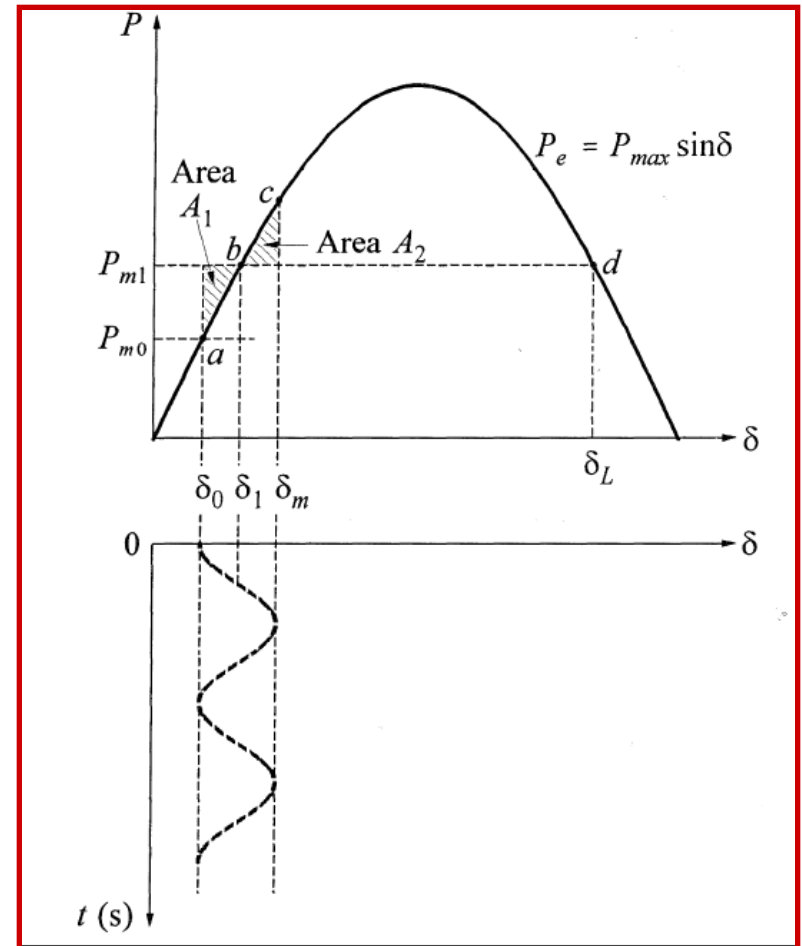


Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Característica ángulo-potencia del generador síncrono trifásico

El ángulo δ del rotor oscila indefinidamente alrededor del nuevo ángulo de equilibrio δ_1 con una amplitud constante como se representa en el grafico δ en función del tiempo. Este comportamiento es el predicho por el modelo clásico; en la práctica, existen muchas causas que amortiguan el movimiento del rotor, como por ejemplo variaciones en el flujo del campo y circuitos de amortiguación rotóricos.

Para el sistema considerado (generador-barra infinita) no es necesario resolver la ecuación de oscilación para determinar si el ángulo del rotor se incrementa perdiéndose el sincronismo o bien si oscila en torno a una posición de equilibrio.



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

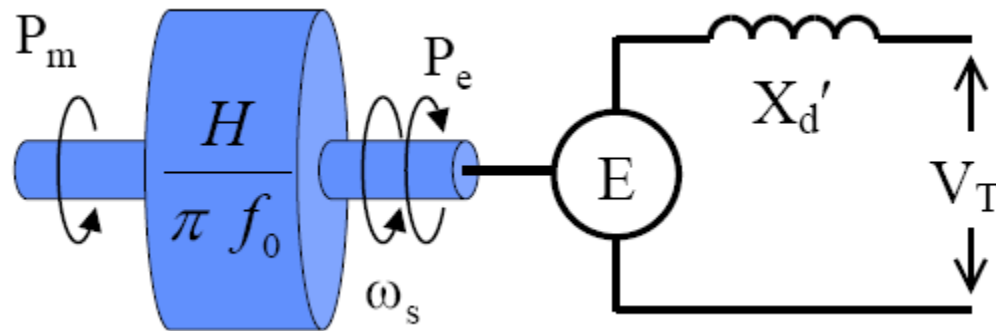
□ Ecuación de oscilación del generador síncrono trifásico en estudios de sistema

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - \underbrace{\frac{E' E_B}{X_T} \text{sen}(\delta)}_{P_e} = P_m - P_{\max} \text{sen}(\delta)$$

donde

- P_m = Potencia mecánica de entrada, en p.u.
- P_e = Potencia eléctrica de salida, en p. u
- $P_{\max}$ = Potencia eléctrica máxima de salida, en p. u.
- H = Constante de inercia, en MW. s / MVA
- δ = ángulo del rotor, en grados eléctricos
- t = tiempo, en segundos

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria



$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - \underbrace{\frac{E' E_B}{X_T}}_{P_e} \sin(\delta) = P_m - P_{\max} \sin(\delta)$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Criterio de áreas iguales

La información relativa al máximo ángulo de excursión δ_m del rotor puede calcularse de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}\frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \Rightarrow 2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) 2 \frac{d\delta}{dt} \\ \Rightarrow \frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right\} &= \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \Rightarrow \\ \Rightarrow \int_0^{t_{\text{pico}}} \frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right\} dt &= \int_0^{t_{\text{pico}}} \left\{ \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \right\} dt\end{aligned}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Criterio de áreas iguales

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{\text{pico}}} \frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right\} dt &= \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \Big|_{t_{\text{pico}}} - \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \Big|_0 = \\ &= \left(\omega(t_{\text{pico}}) \right)^2 - \left(\omega(0) \right)^2 = \omega_0 - \omega_0 = 0 \\ \int_0^{t_{\text{pico}}} \left\{ \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \right\} dt &= \int_{\delta_0}^{\delta_m} \left\{ \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \right\} d\delta \quad \therefore \\ \int_{\delta_0}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta &= 0 \end{aligned}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Criterio de áreas iguales

$$0 = \int_{\delta_0}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta$$

$$\underbrace{\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta}_{\substack{\text{energía} \\ \text{cinética} \\ \text{ganada}}} = \underbrace{\int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta}_{\substack{\text{energía} \\ \text{cinética} \\ \text{perdida}}}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Criterio de áreas iguales

Como no hemos considerado pérdidas, la energía cinética ganada por el rotor del generador en su excursión de δ_0 hasta δ_1 necesariamente debe ser igual a la energía cinética perdida por el rotor del generador en su excursión de δ_1 hasta δ_m ; o sea en la figura el área A_1 debe ser igual al área A_2 .

El ángulo δ_1 (o δ_c) se lo denomina **ángulo de aislamiento (o crítico de corte)**. Veamos ahora como calcularlo. Definamos primero:

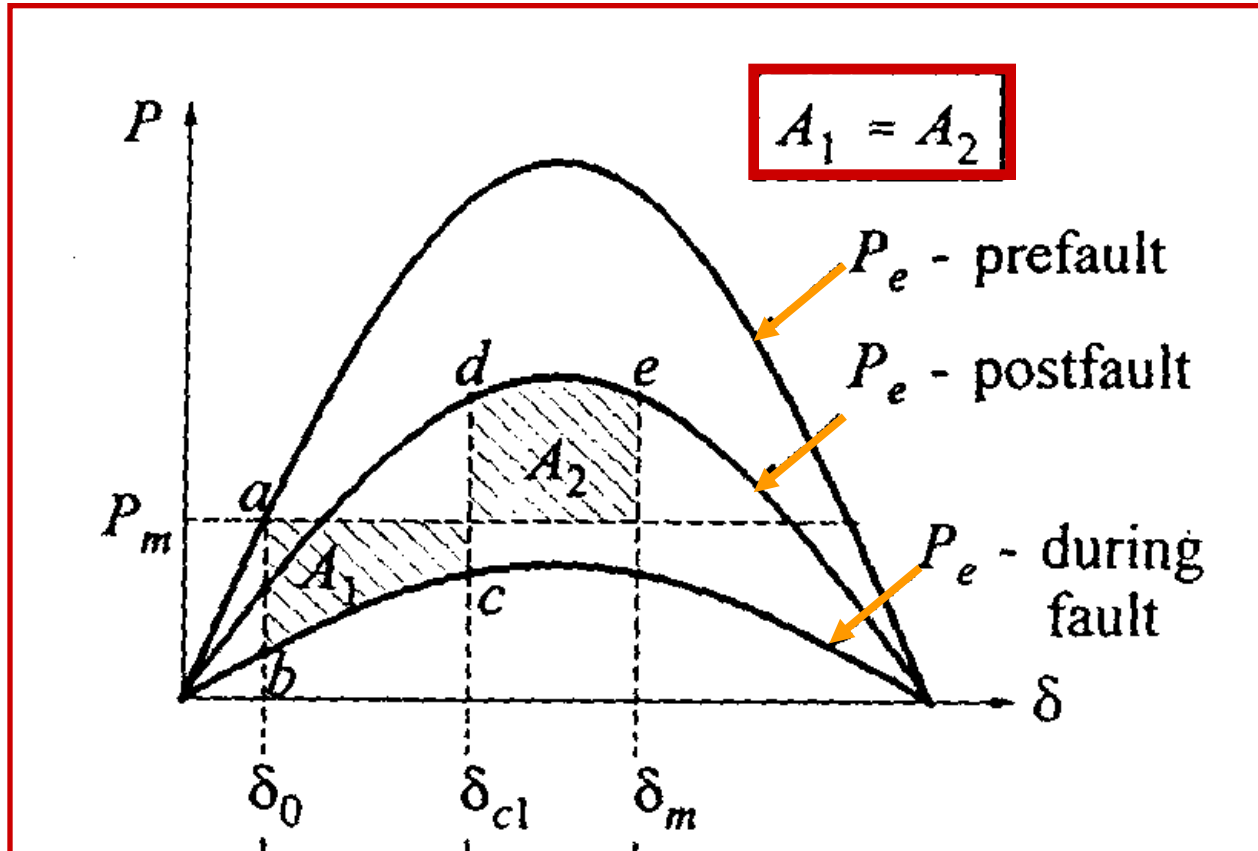
$$P_e = P_{\max} \sin(\delta) \quad (\text{Pre} - \text{Falla})$$

$$P_e = r_1 P_{\max} \sin(\delta) \quad (\text{Falla})$$

$$P_e = r_2 P_{\max} \sin(\delta) \quad (\text{Post} - \text{Falla})$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Criterio de áreas iguales



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Criterio de áreas iguales

Observemos además que:

$$P_m = P_{\max} \sin(\delta_0) \Rightarrow \delta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_{\max}}\right) < \frac{\pi}{2}$$

$$P_m = r_2 P_{\max} \sin(\delta_m) \Rightarrow \delta_m = \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{r_2 P_{\max}}\right) > \frac{\pi}{2}$$

Ahora bien:

$$A_1 = P_m (\delta_C - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_C} r_1 P_{\max} \sin(\delta) d\delta = P_m (\delta_C - \delta_0) + r_1 P_{\max} [\cos(\delta_C) - \cos(\delta_0)]$$

$$A_2 = \int_{\delta_C}^{\delta_m} r_2 P_{\max} \sin(\delta) d\delta - P_m (\delta_m - \delta_C) = -r_2 P_{\max} [\cos(\delta_m) - \cos(\delta_C)] - P_m (\delta_m - \delta_C)$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Criterio de áreas iguales

Entonces:

$$A_1 = A_2 \quad \Leftrightarrow \quad (r_1 - r_2)P_{\max} \cos(\delta_C) = P_m(\delta_0 - \delta_m) + P_{\max} [r_1 \cos(\delta_0) - r_2 \cos(\delta_m)]$$

$$\delta_C = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{r_2 - r_1} \left[\frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_m - \delta_0) + (r_2 \cos(\delta_m) - r_1 \cos(\delta_0)) \right] \right\}$$

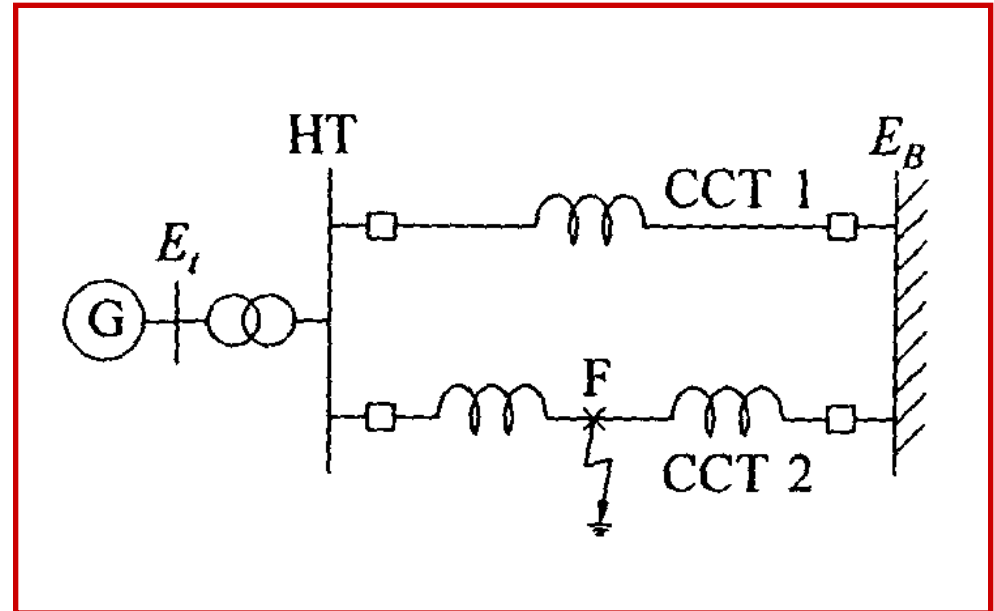
$$\text{Si } P_e = 0 \quad (\text{Falla}) \Rightarrow r_1 = 0$$

$$\delta_C = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{r_2} \left[\frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_m - \delta_0) + r_2 \cos(\delta_m) \right] \right\}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

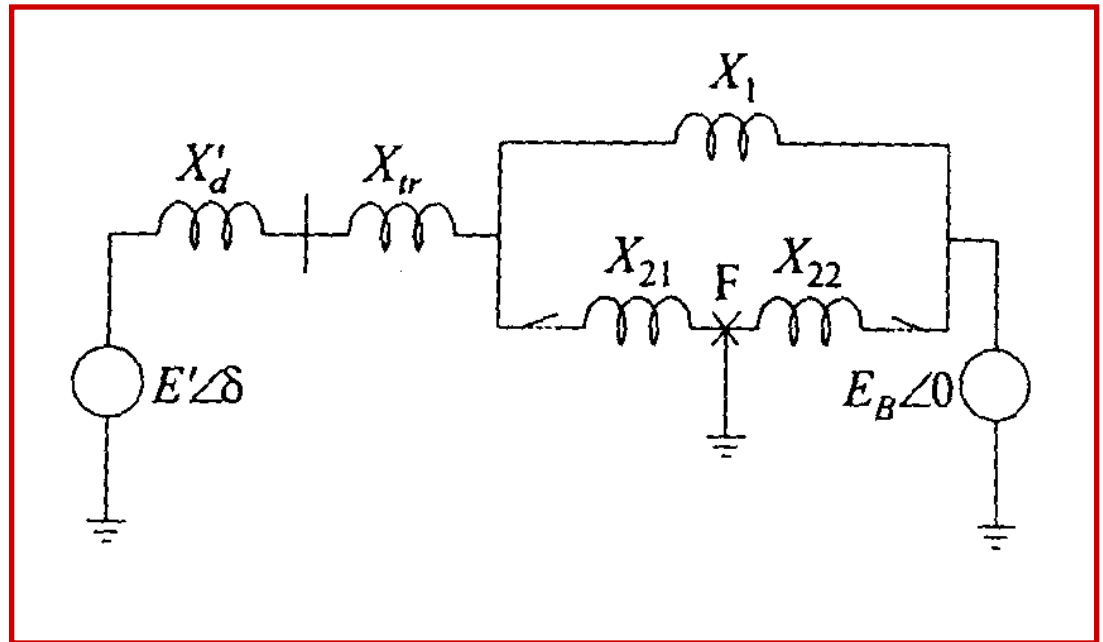
Al estudiar el comportamiento dinámico de una maquina síncrona conectada a un SEP, puede considerarse que este presenta tensión y frecuencia constante. Un sistema tal se denomina barra infinita. Consideremos un generador conectado a una barra infinita por medio de dos líneas de transmisión. Analizamos a continuación el comportamiento transitorio del sistema, frente a un cortocircuito trifásico en el punto F de la línea de transmisión 2, como se muestra en la figura siguiente.



La falla es aislada por mediante la apertura de los interruptores a ambos extremos de la línea fallada.

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

El generador se representa por el modelo clásico, el cual no considera el efecto del control de velocidad. La tensión detrás de la reactancia transitoria (X_d') se denota por E' .



El ángulo δ representa el ángulo por el cual E' adelanta a la tensión del sistema E_B . Cuando el sistema experimenta una perturbación, el modulo de E' permanece constante en el valor pre-falla y el ángulo δ se modifica a medida de que la velocidad del rotor se aparta de la velocidad de sincronismo ω_0 .

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

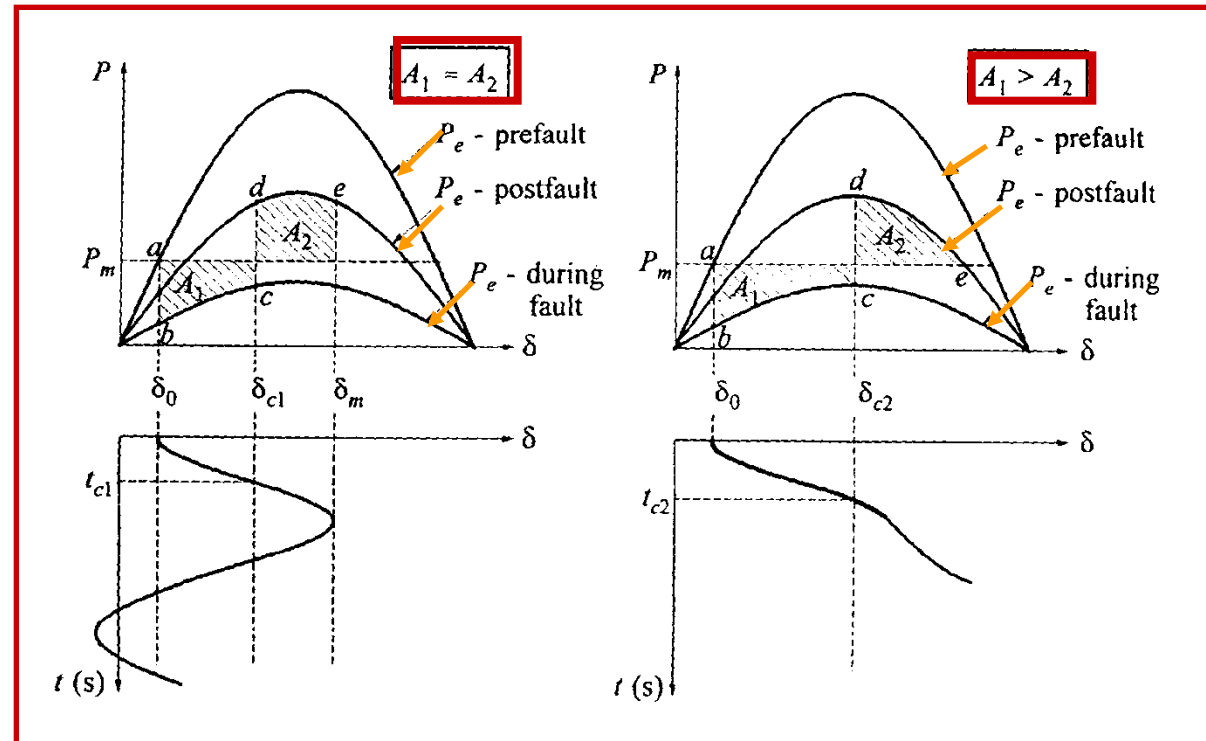
Las figuras siguientes muestran las curvas P_e vs. δ para tres condiciones del sistema:

Pre-Falla (ambas líneas en servicio)

Falla (con un cortocircuito trifásico sobre la línea 2)

Post-Falla (la línea 2 fuera de servicio)

La primera figura corresponde al caso estable y la segunda al caso inestable. En ambos casos P_m se considera constante. El tiempo de aislamiento de la falla se denota por t_c .

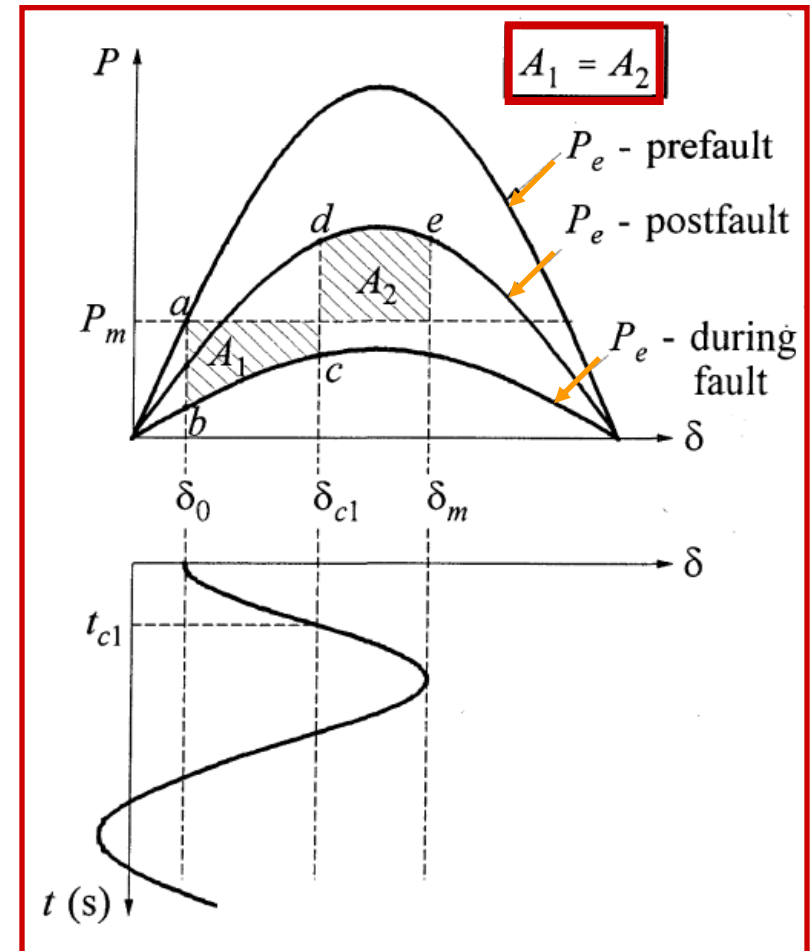


Caso estable

Caso inestable

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

Comenzamos examinando el caso estable. Inicialmente, el sistema está en operación con las dos líneas en servicio de manera tal que $P_m = P_e$ y $\delta = \delta_0$. Cuando ocurre la falla el punto de operación cambia súbitamente de $a \rightarrow b$. Debido a la inercia, el ángulo del rotor no puede cambiar instantáneamente. Puesto que $P_m > P_e$ el rotor se acelera hasta alcanzar el punto de operación c , donde la falla es eliminada aislando la línea 2. El punto de operación ahora se desplaza súbitamente a d . Ahora, $P_e > P_m$ y en consecuencia el rotor se desacelera. Como la velocidad del rotor es mayor que la velocidad de sincronismo ω_0 , el ángulo del rotor δ continua incrementándose hasta que la energía cinética ganada durante el periodo de aceleración (representada por el área A_1) es gastada transfiriéndosela al sistema.

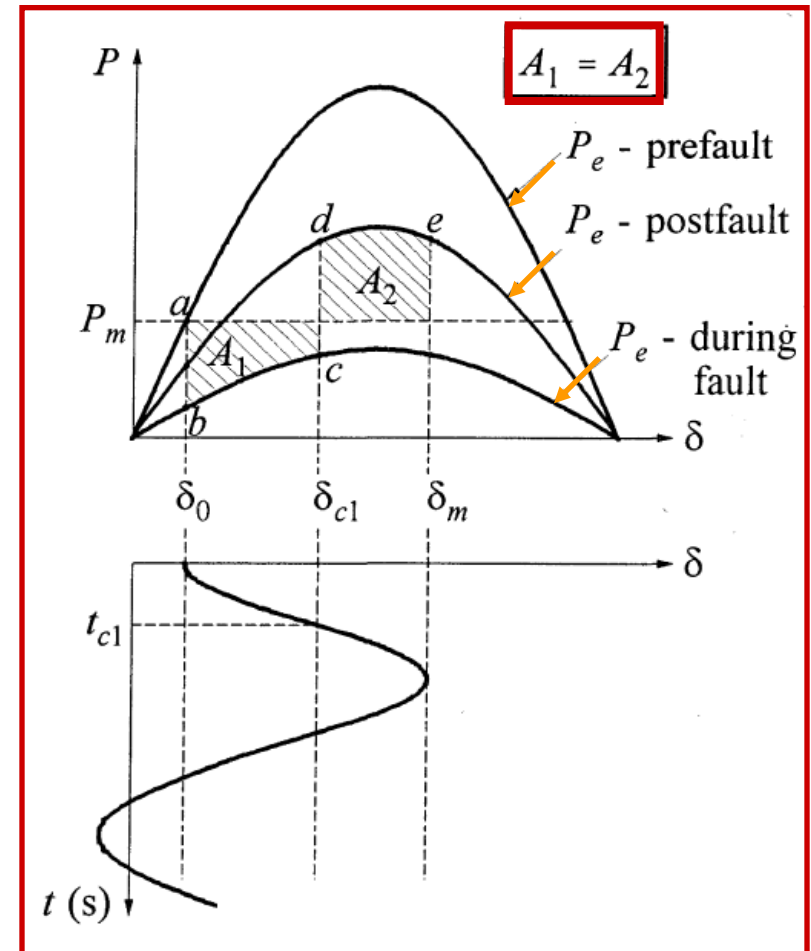


Caso estable

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

El punto de operación se desplaza de $d \rightarrow e$, de manera tal que el área A_1 iguale al área A_2 .

En el punto de operación e , la velocidad del rotor iguala a la velocidad de sincronismo ω_0 , y el ángulo del rotor δ ha alcanzado su valor máximo δ_m . Puesto que aun $P_e > P_m$ el rotor continua desacelerando y su velocidad cae por debajo de la velocidad de sincronismo ω_0 . El ángulo del rotor δ decrece y el punto de operación retrocede de $e \rightarrow d$ y recorre la curva P_e vs. δ para la condición de post-falla. El valor mínimo del ángulo del rotor δ es tal que satisface el criterio de igualdad de áreas para la condición post-falla.

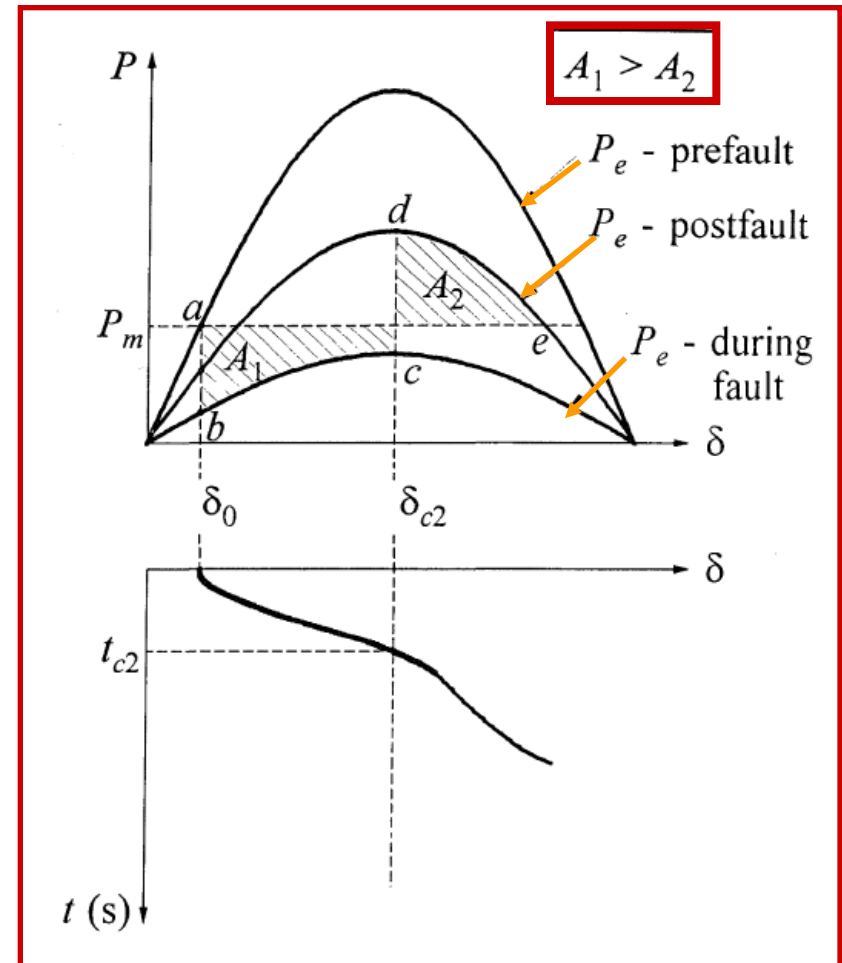


Caso estable

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

Examinamos ahora el caso inestable. Con el tiempo de aislamiento t_c de la falla mostrado en la figura, el área A_2 por encima de P_m es menor que A_1 . Cuando el punto de operación alcanza el punto e, la energía cinética ganada durante el periodo de aceleración no ha sido completamente gastada, consecuentemente la velocidad del rotor es aun mayor que la velocidad de sincronismo ω_0 y el ángulo δ continua incrementándose. Mas allá del punto e, $P_e < P_m$ y el rotor continua acelerándose. La velocidad y el ángulo del rotor continúan incrementándose, produciéndose una **pérdida de sincronismo**.

En la actualidad, el método mas práctico disponible para análisis de estabilidad transitoria es la simulación numérica en el dominio del tiempo.



Caso inestable

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ecuación de oscilación del generador síncrono trifásico en estudios de sistema

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e - \frac{K_D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt}$$

Ecuación de oscilación
forma escalar

donde

- T_m = Par mecánico de entrada, en p.u.
- T_e = Par electromagnético de salida, en p. u
- K_D = coeficiente de amortiguamiento, en p. u. par/p.u. velocidad
- H = Constante de inercia, en MW. s / MVA
- δ = ángulo del rotor, en grados eléctricos
- t = tiempo, en segundos

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ecuación de oscilación del generador síncrono trifásico en estudios de sistema

Utilizando la transformación:

$$\begin{cases} \delta(t) = \delta(t) \\ \omega(t) = \delta'(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \delta'(t) = \omega(t) \\ \omega'(t) = \frac{\omega_0}{2H} \left[T_m - T_e - \frac{K_D}{\omega_0} \omega(t) \right] \end{cases}$$

Si definimos:

$$\Delta\omega_r(t) = \frac{\omega(t) - \omega_0}{\omega_0} \Rightarrow \Delta\omega_r'(t) = \frac{\omega'(t)}{\omega_0}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ecuación de oscilación del generador síncrono trifásico en estudios de sistema

Obtenemos:

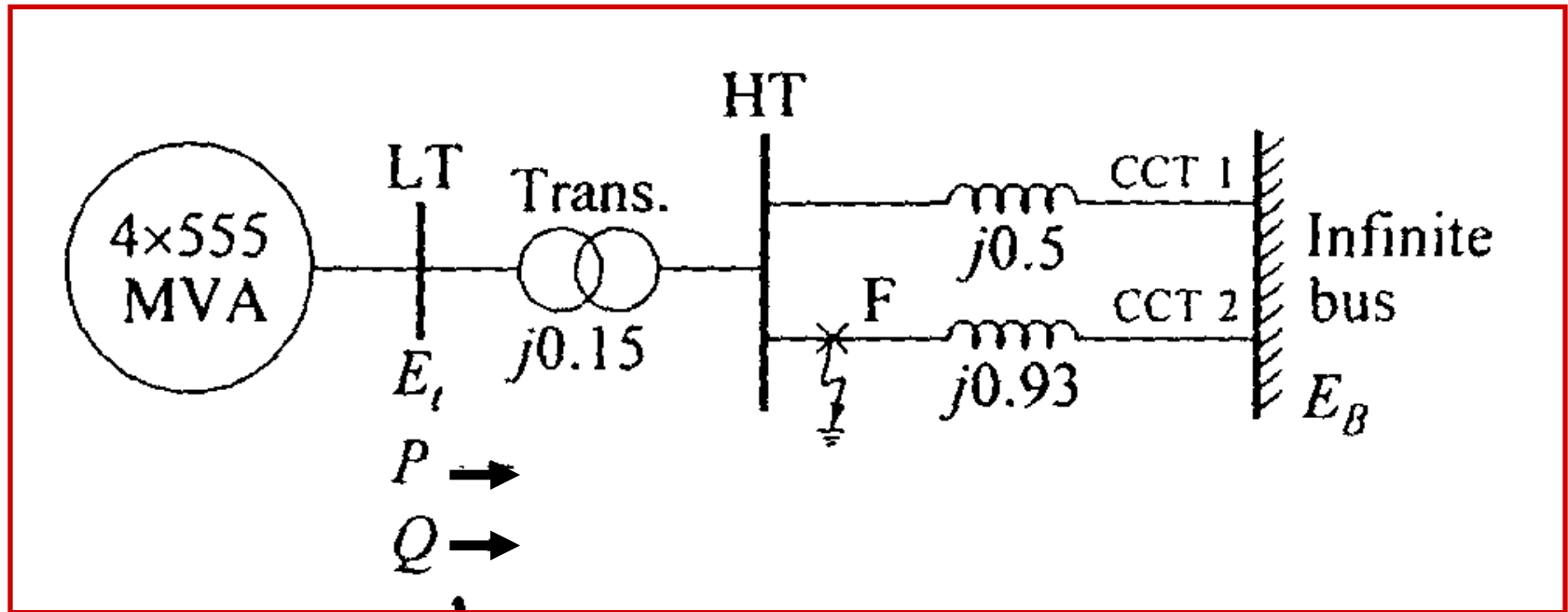
$$\begin{cases} \delta'(t) = \omega_0 \Delta\omega_r(t) \\ \Delta\omega_r'(t) = \frac{1}{2H} [T_m - T_e - K_D \Delta\omega_r(t)] \end{cases}$$
$$\delta(0) = \delta_0$$
$$\Delta\omega_r(0) = 0$$

Ecuación de oscilación
forma espacio de estado

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo

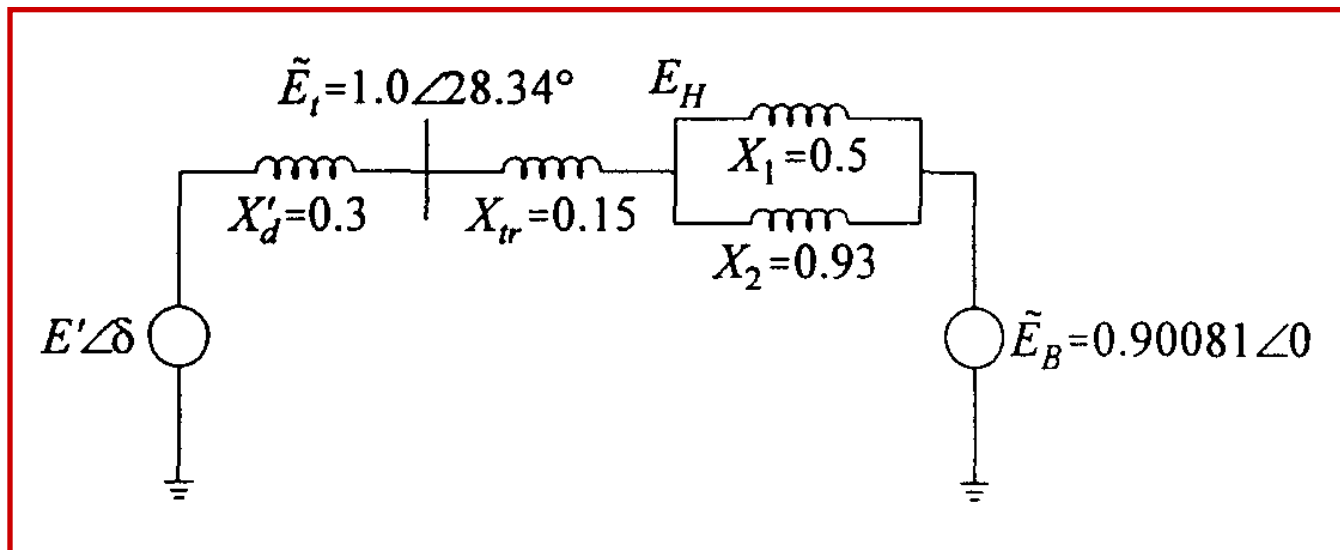
Consideremos una central térmica compuesta por cuatro generadores de 555 MVA, 24 kV, 60 Hz. $H = 3,5 \text{ MW.s/MVA}$. La línea 2 sufre un cortocircuito trifásico a tierra en el punto F, el que es eliminado aislando el circuito fallado. Las condiciones iniciales de operación son $P = 0,9$; $Q = 0,436$ (sobreexcitado).



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Con el generador representado por el modelo clásico, el circuito equivalente se muestra en la figura siguiente.



Por la condición inicial
de operación:

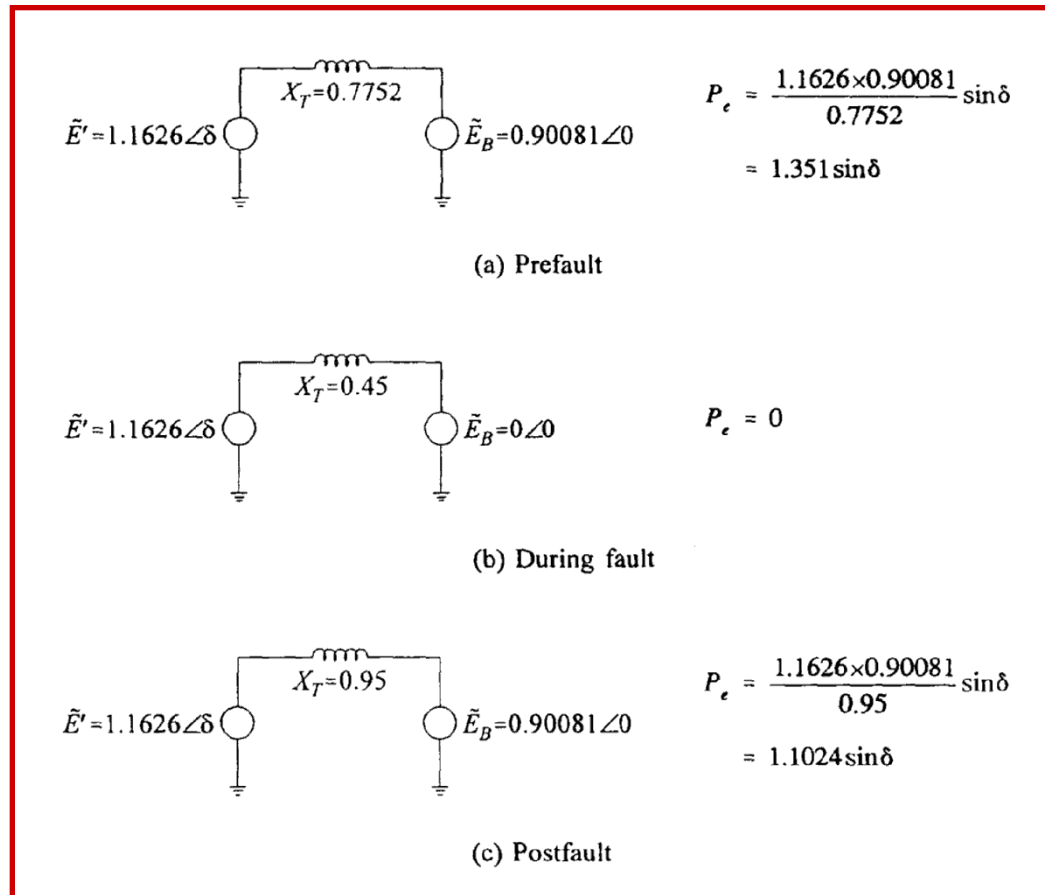
$$E' = E_t + jX'_d I_t$$

$$E' = 1.0 \angle 28.34^\circ + \frac{j0.3(0.9 - j0.436)}{1.0 \angle -28.34^\circ} = 1.1626 \angle 41.77^\circ$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Los circuitos equivalentes siguientes representan las tres condiciones del sistema:



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

entonces, el problema a resolver es:

$$\begin{cases} \delta'(t) = 377 \Delta\omega_r(t) \\ \Delta\omega_r'(t) = \frac{1}{7} [0,9 - P_{\max} \sin(\delta)] \end{cases}$$

$$\delta(0) = \delta_0$$

$$\Delta\omega_r(0) = \Delta\omega_r$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Falla:

$$\begin{cases} \delta'(t) = 377 \Delta\omega_r(t) \\ \Delta\omega_r'(t) = \frac{1}{7} 0,9 \end{cases}$$

$$\delta(0) = 41,77^\circ \cong 0,7290234128 \text{ radianes}$$

$$\Delta\omega_r(0) = 0$$

falla.m

```
function dy= falla(t,y)
omegasincrona=377;
H=3.5;
Pm=0.9;
Pmax=0;
dy=zeros(2,1);
dy(1)= omegasincrona*y(2);
dy(2)= (Pm-
Pmax*sin(y(1)))*(1/(2*H));
```

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Si la falla se aísla después de 0,07 segundos:

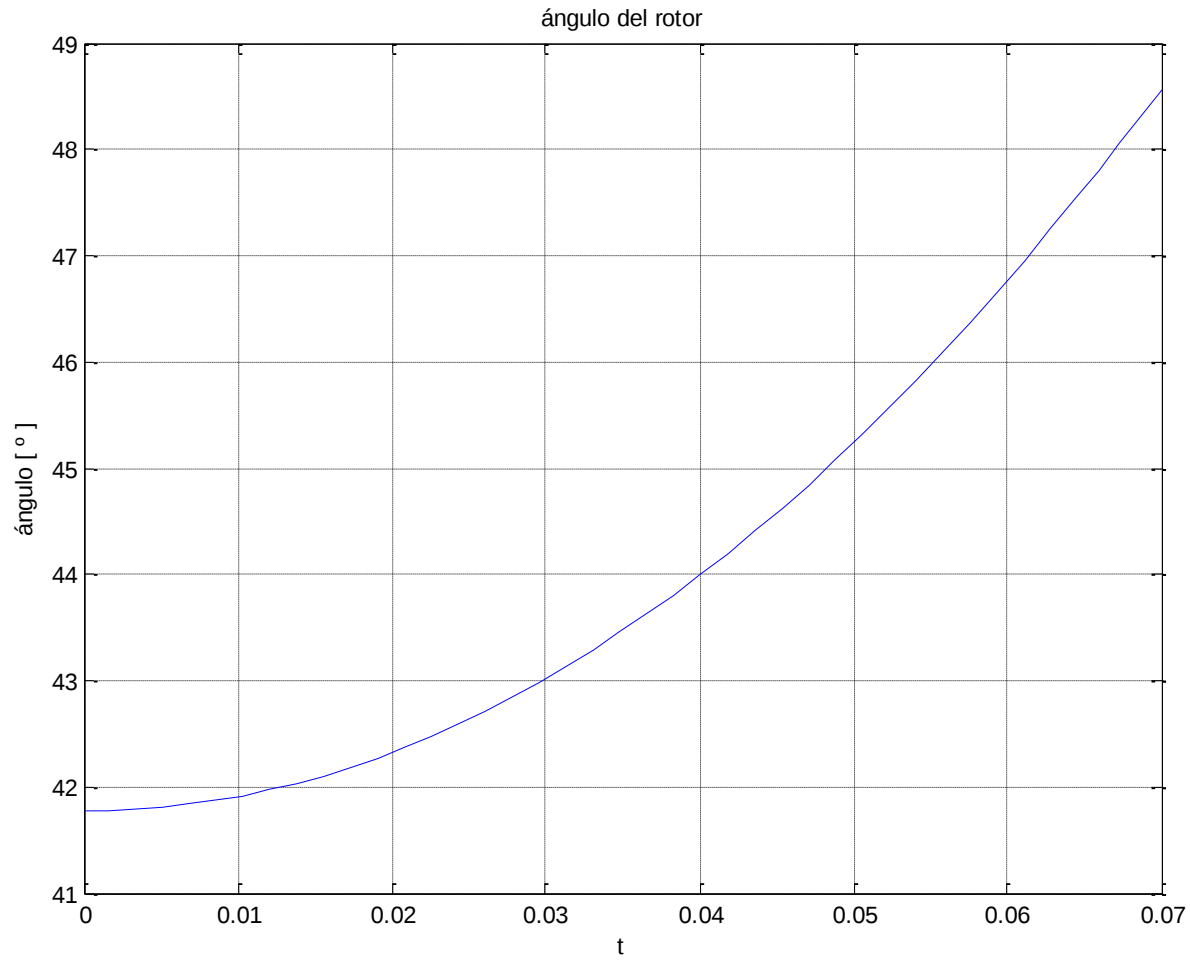
```
[t,Y] = ode45(@falla,[0 0.07],[0.7290234128 0]);
```

```
plot(t,(Y(:,1)*360)/(2*pi));  
title('ángulo del rotor'); ylabel('ángulo [ ° ] '); xlabel('t'); grid
```

```
plot(t,Y(:,2));  
title('cambio en la velocidad del rotor'); ylabel('variación velocidad ');  
xlabel('t'); grid
```

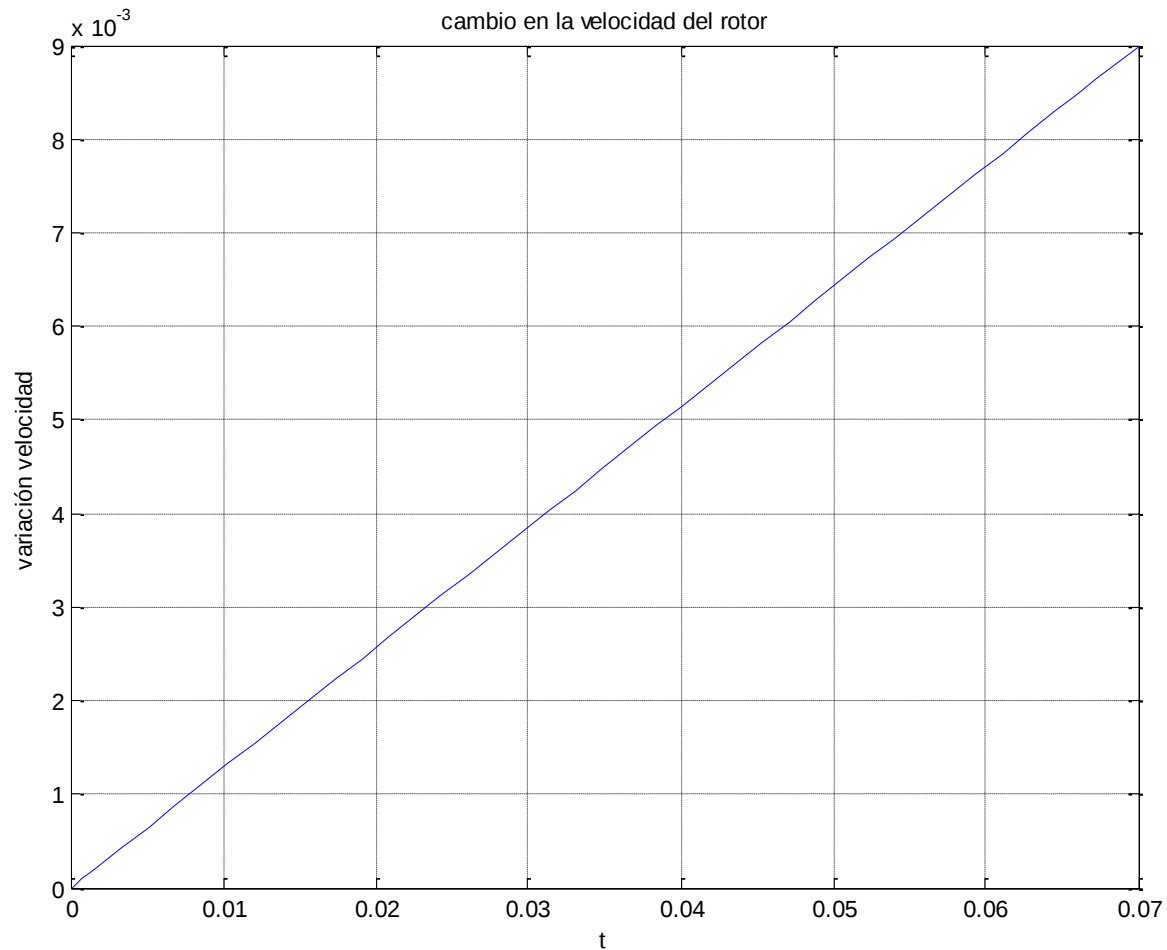
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

■ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

■ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Post-falla

$$\begin{cases} \delta'(t) = 377 \Delta\omega_r(t) \\ \Delta\omega_r'(t) = \frac{1}{7} [0,9 - 1,1024 \sin(\delta)] \end{cases}$$

$$\delta(0) = 48,58^\circ \cong 0,8478802344 \text{ radianes}$$

$$\Delta\omega_r(0) = 0,009$$

postfalla.m

```
function dy= postfalla(t,y)
omegasincrona=377;
H=3.5;
Pm=0.9;
Pmax=1.1024;
dy=zeros(2,1);
dy(1)= omegasincrona*y(2);
dy(2)= (Pm-
Pmax*sin(y(1)))*(1/(2*H));
```

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

La post-falla después de 4 segundos:

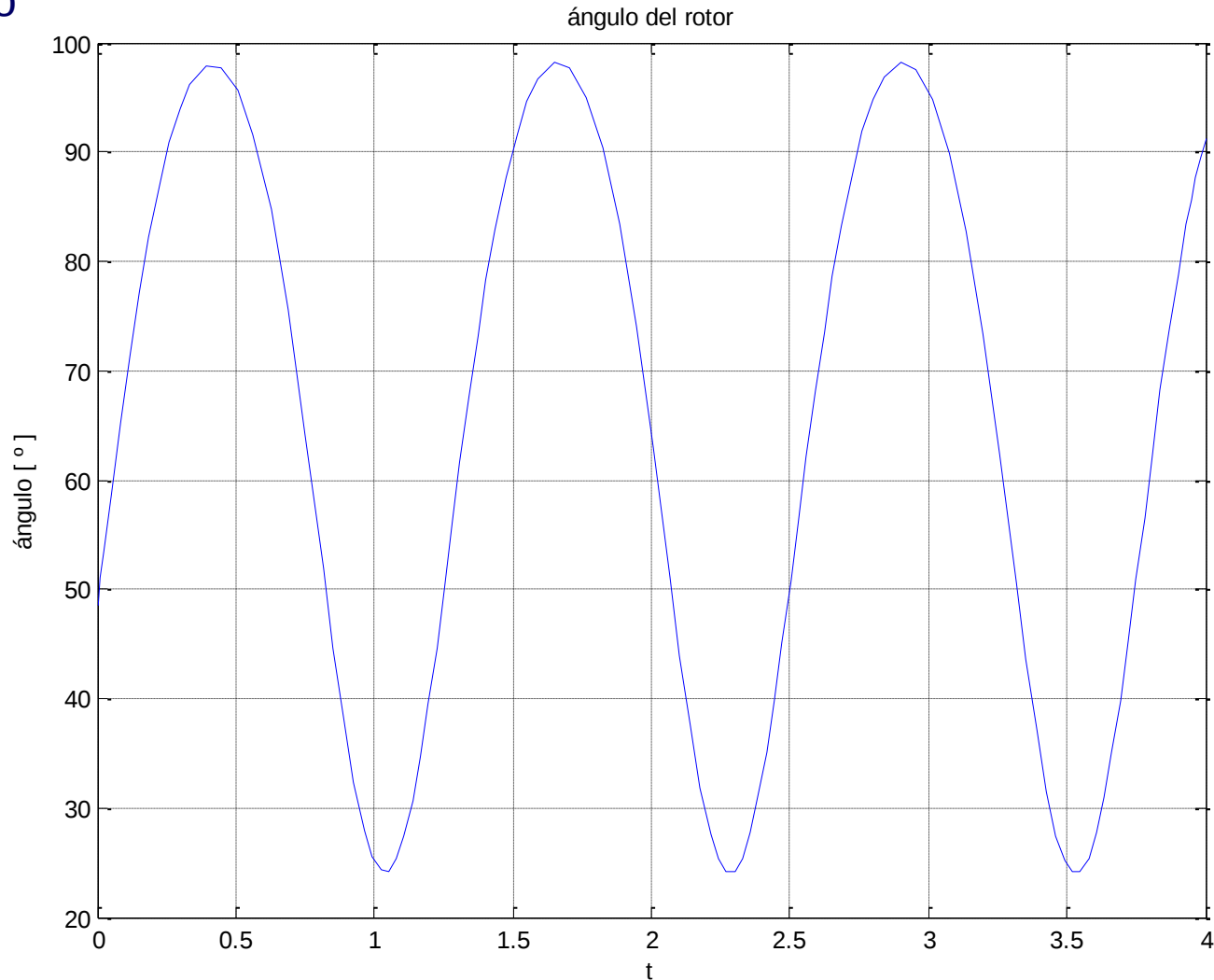
```
[t,Y] = ode45(@postfalla,[0 4],[0.8478802344 0.009]);
```

```
plot(t,(Y(:,1)*360)/(2*pi));  
title('ángulo del rotor'); ylabel('ángulo [ ° ] '); xlabel('t'); grid
```

```
plot(t,Y(:,2));  
title('cambio en la velocidad del rotor'); ylabel('variación velocidad ');  
xlabel('t'); grid
```

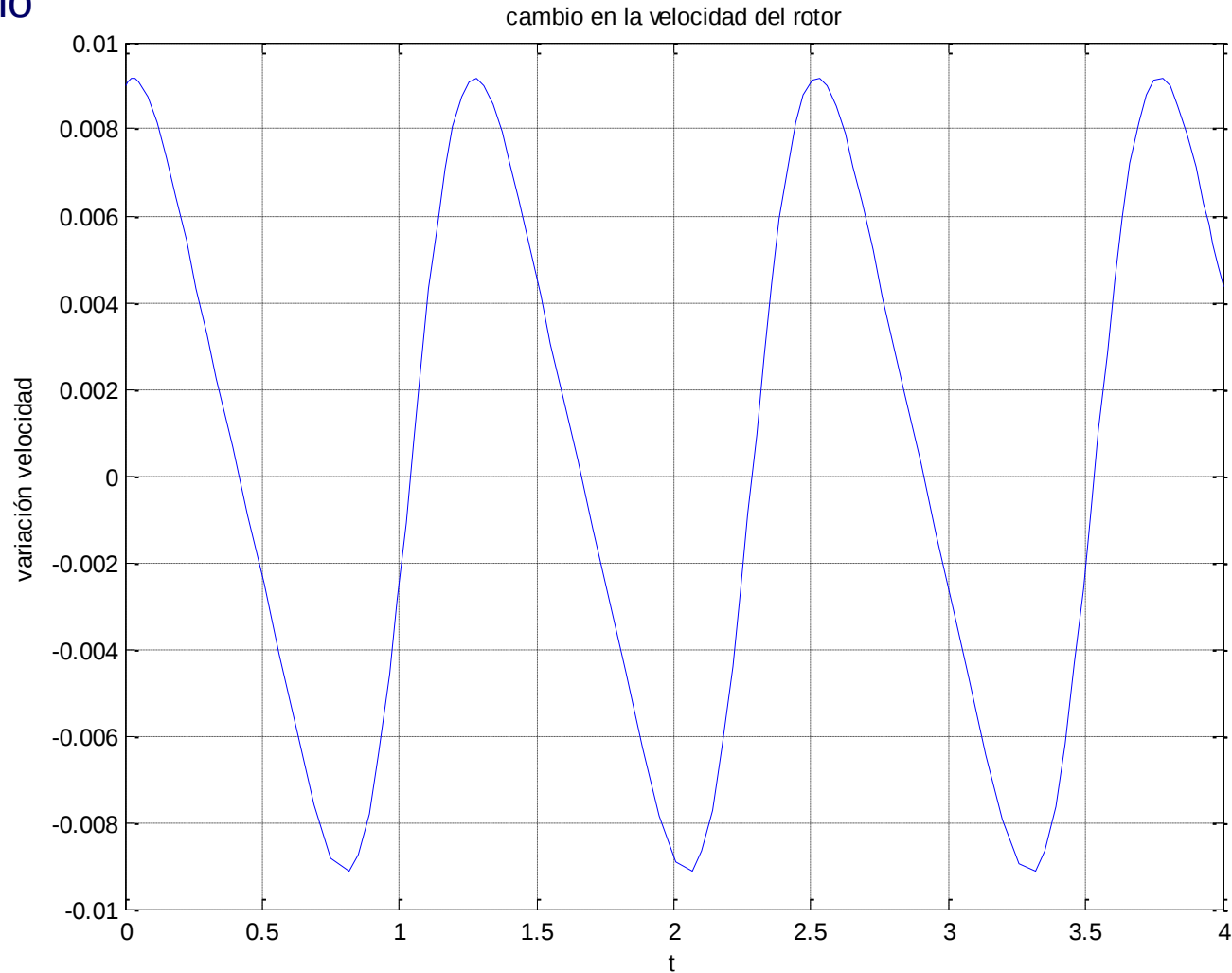
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

■ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Si la falla se aísla después de 0,086 segundos:

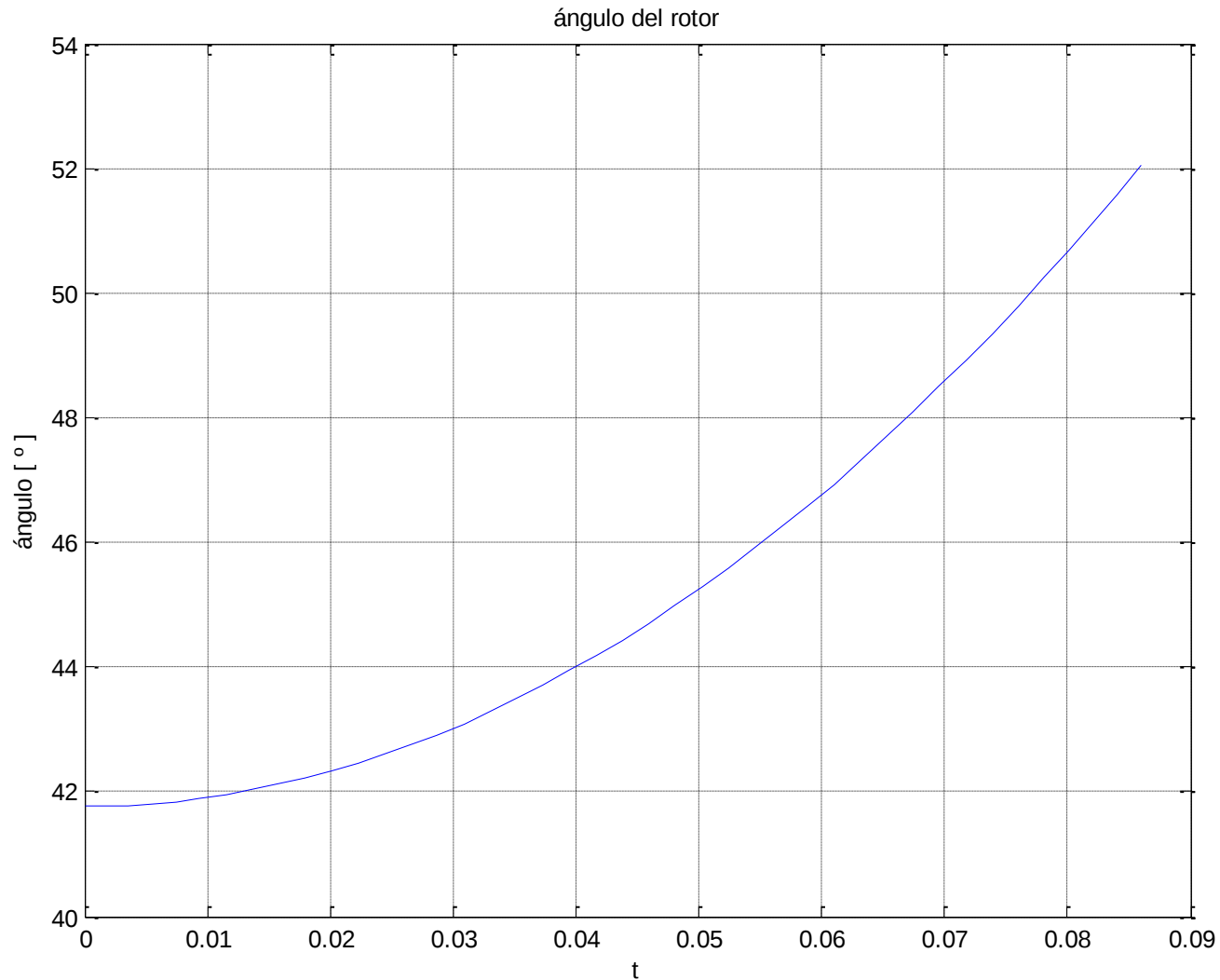
```
[t,Y] = ode45(@falla,[0 0.086],[0.7290234128 0]);
```

```
plot(t,(Y(:,1)*360)/(2*pi));  
title('ángulo del rotor'); ylabel('ángulo [ ° ] '); xlabel('t'); grid
```

```
plot(t,Y(:,2));  
title('cambio en la velocidad del rotor'); ylabel('variación velocidad ');  
xlabel('t'); grid
```

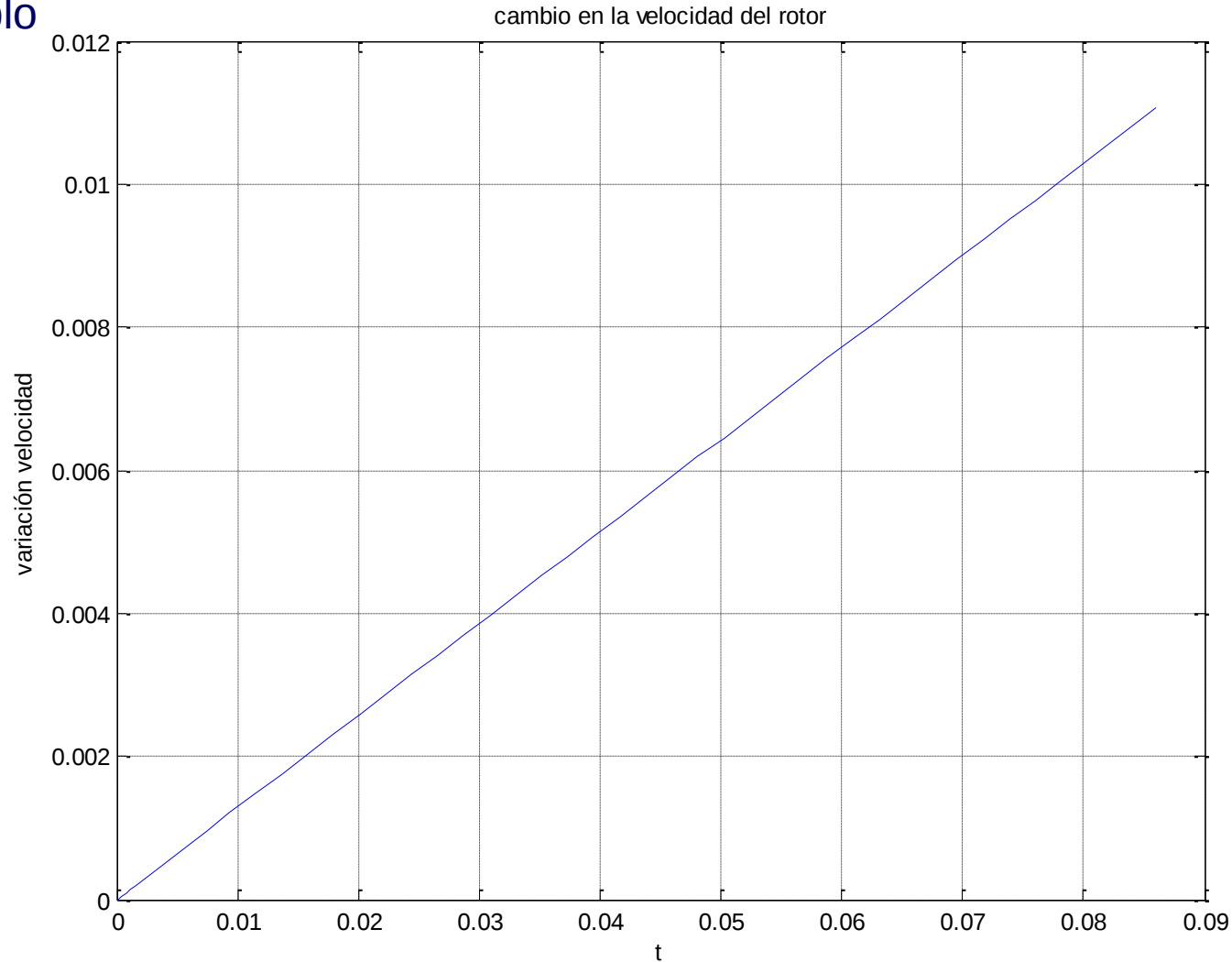
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

La post-falla después de 4 segundos:

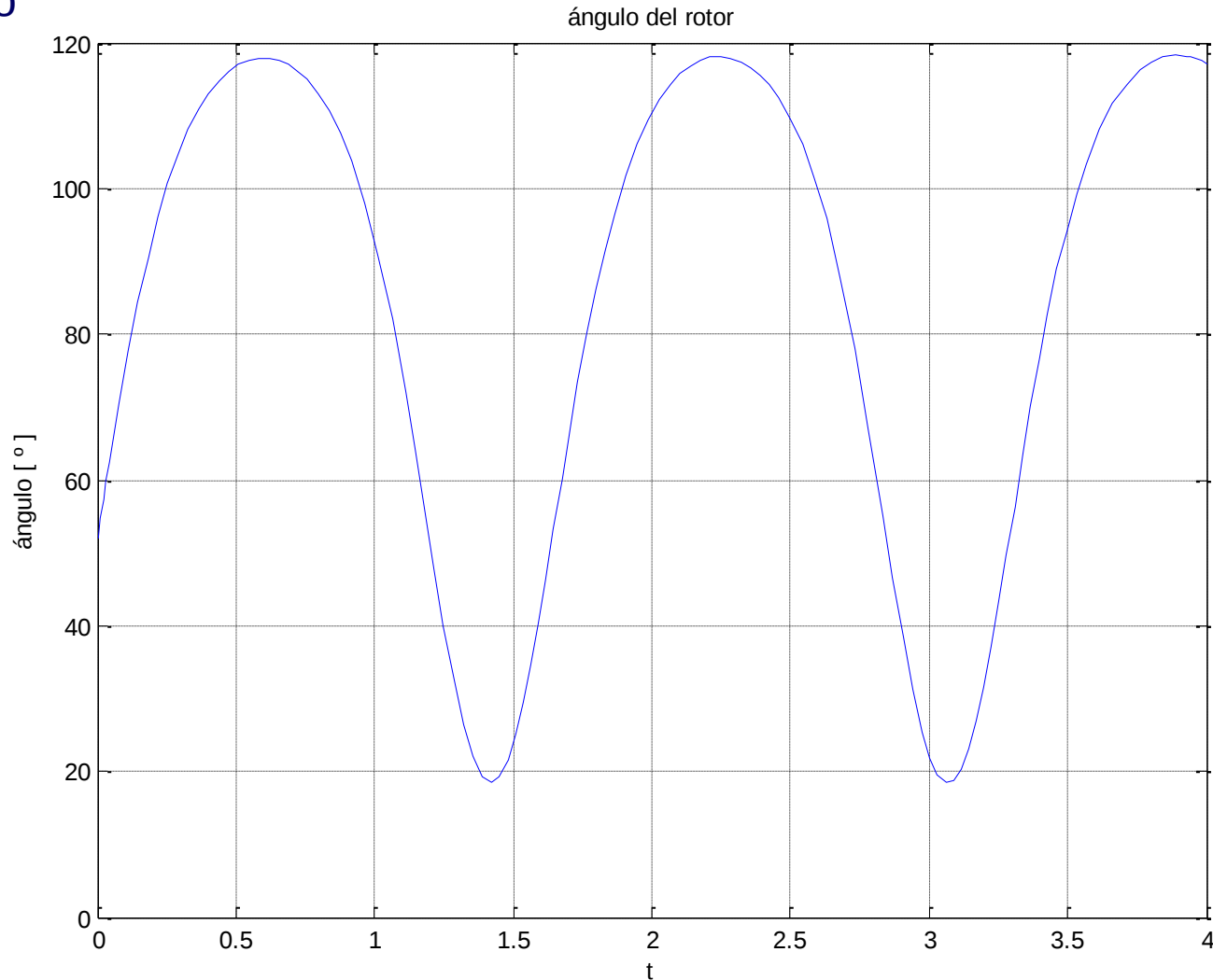
```
[t,Y] = ode45(@postfalla,[0 4],[0.9082685755 0.011]);
```

```
plot(t,(Y(:,1)*360)/(2*pi));  
title('ángulo del rotor'); ylabel('ángulo [ ° ] '); xlabel('t'); grid
```

```
plot(t,Y(:,2));  
title('cambio en la velocidad del rotor'); ylabel('variación velocidad ');  
xlabel('t'); grid
```

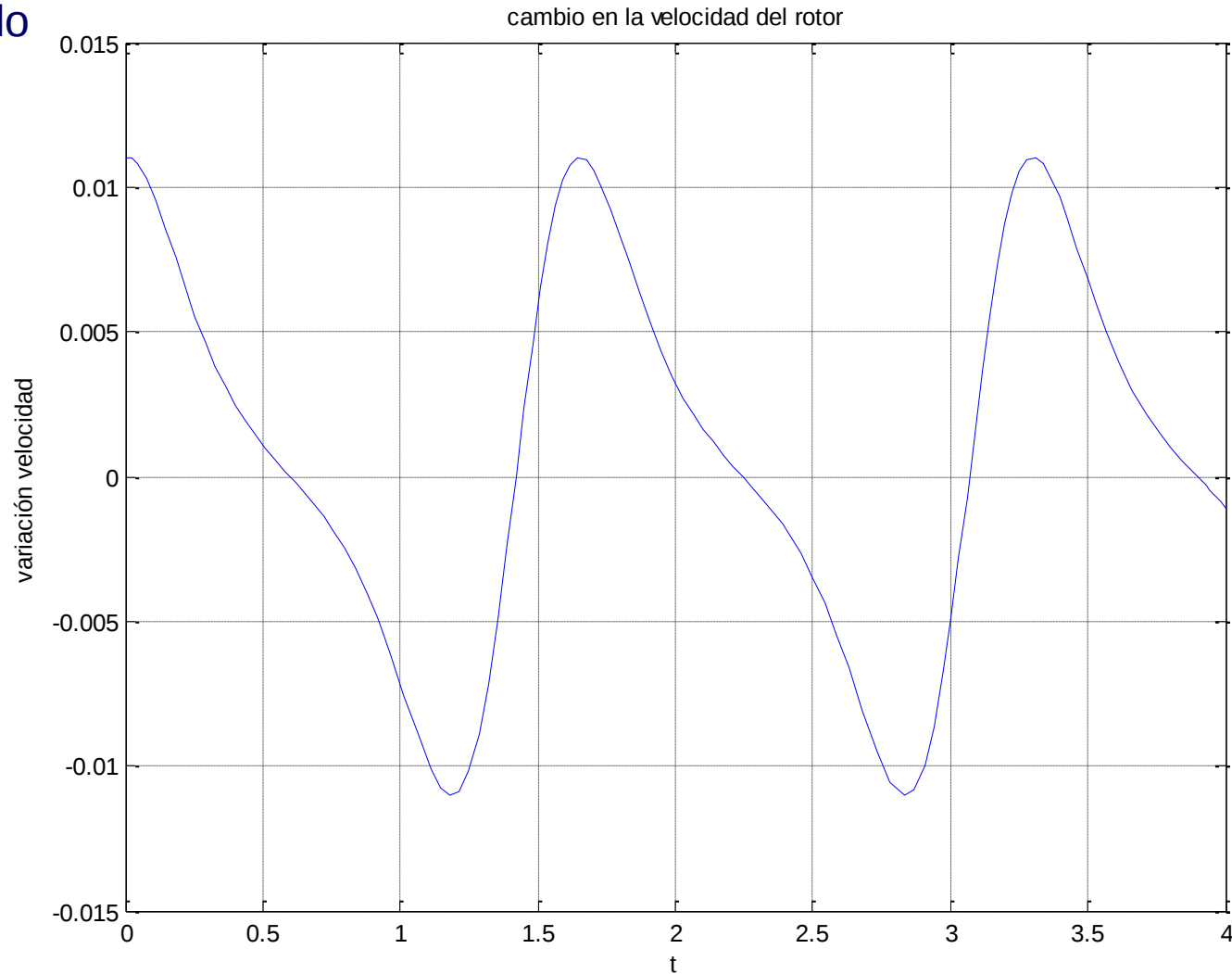
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

■ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Si la falla se aísla después de 0,087 segundos:

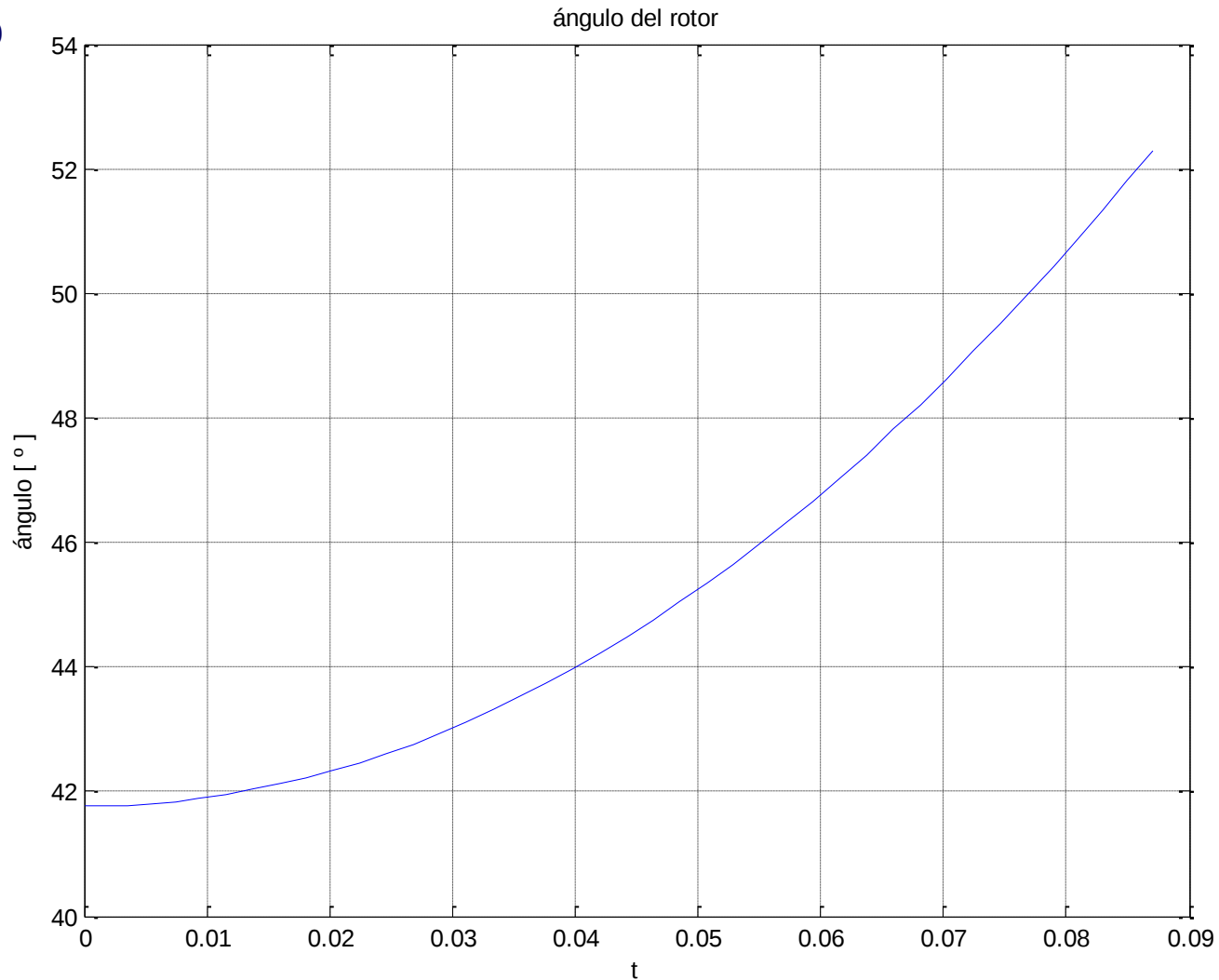
```
[t,Y] = ode45(@falla,[0 0.087],[0.7290234128 0]);
```

```
plot(t,(Y(:,1)*360)/(2*pi));  
title('ángulo del rotor'); ylabel('ángulo [ ° ] '); xlabel('t'); grid
```

```
plot(t,Y(:,2));  
title('cambio en la velocidad del rotor'); ylabel('variación velocidad ');  
xlabel('t'); grid
```

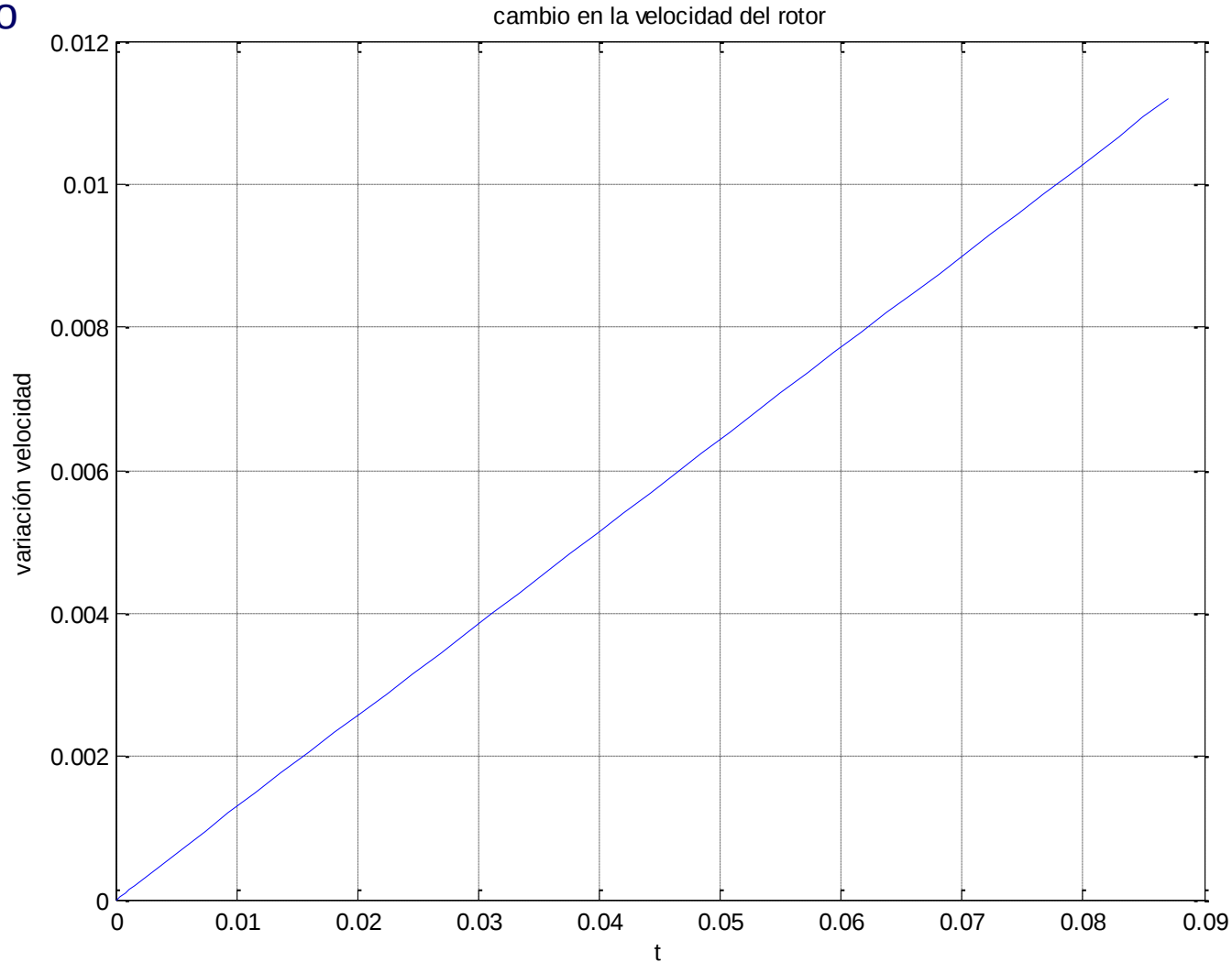
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

La post-falla después de 4 segundos:

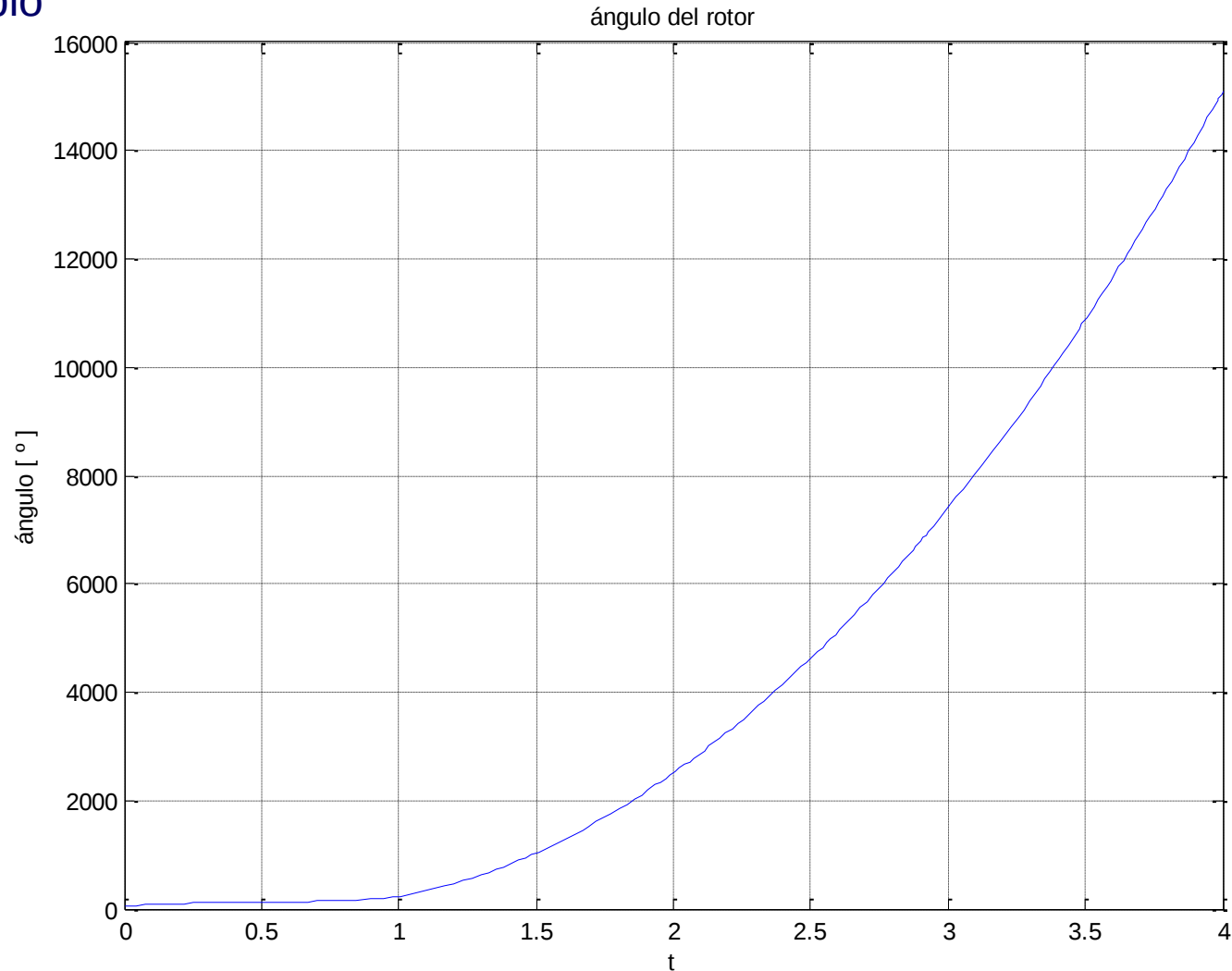
```
[t,Y] = ode45(@postfalla,[0 4],[0.9128064277 0.0115]);
```

```
plot(t,(Y(:,1)*360)/(2*pi));  
title('ángulo del rotor'); ylabel('ángulo [ ° ] '); xlabel('t'); grid
```

```
plot(t,Y(:,2));  
title('cambio en la velocidad del rotor'); ylabel('variación velocidad ');  
xlabel('t'); grid
```

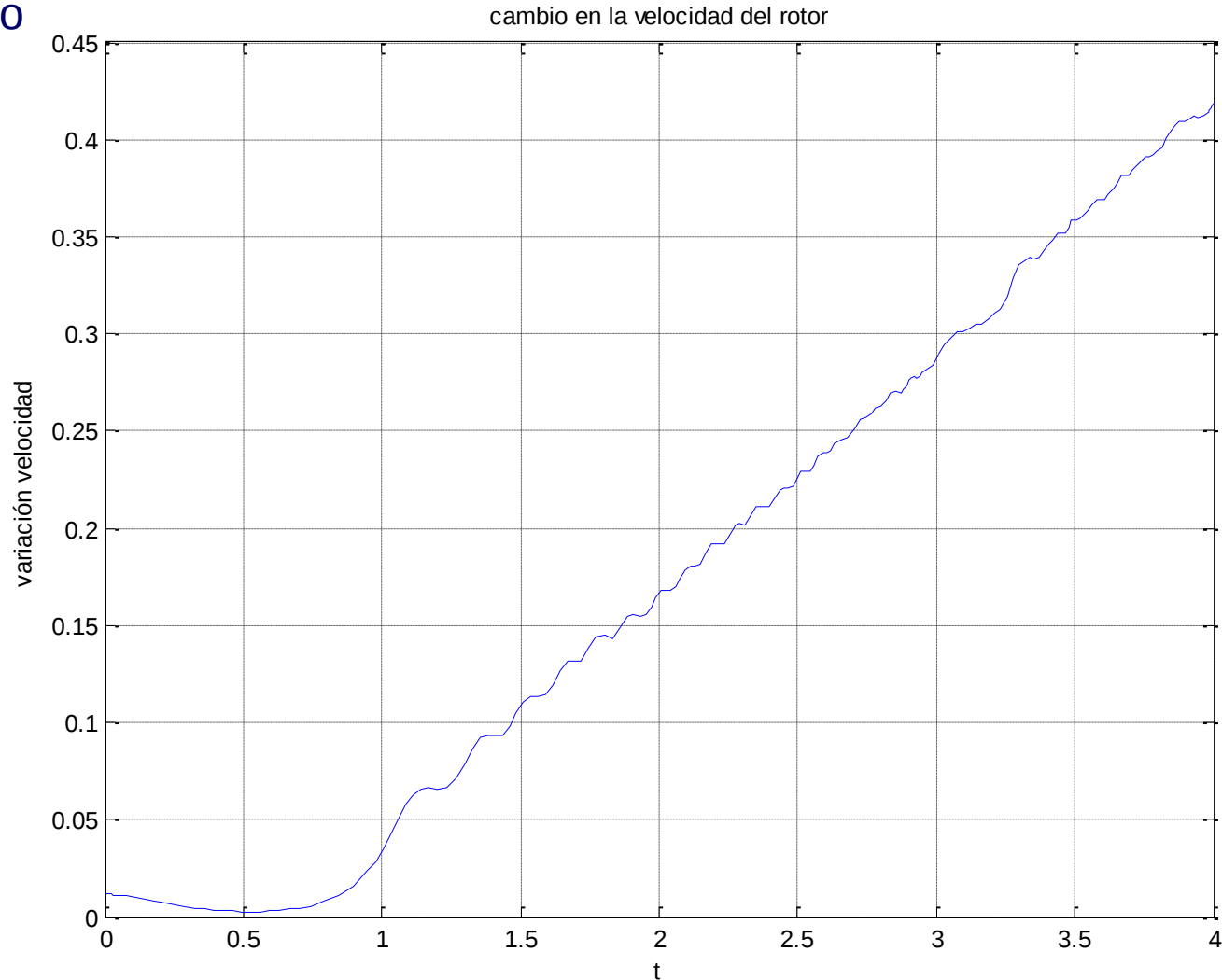
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

■ Ejemplo



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

■ Ejemplo

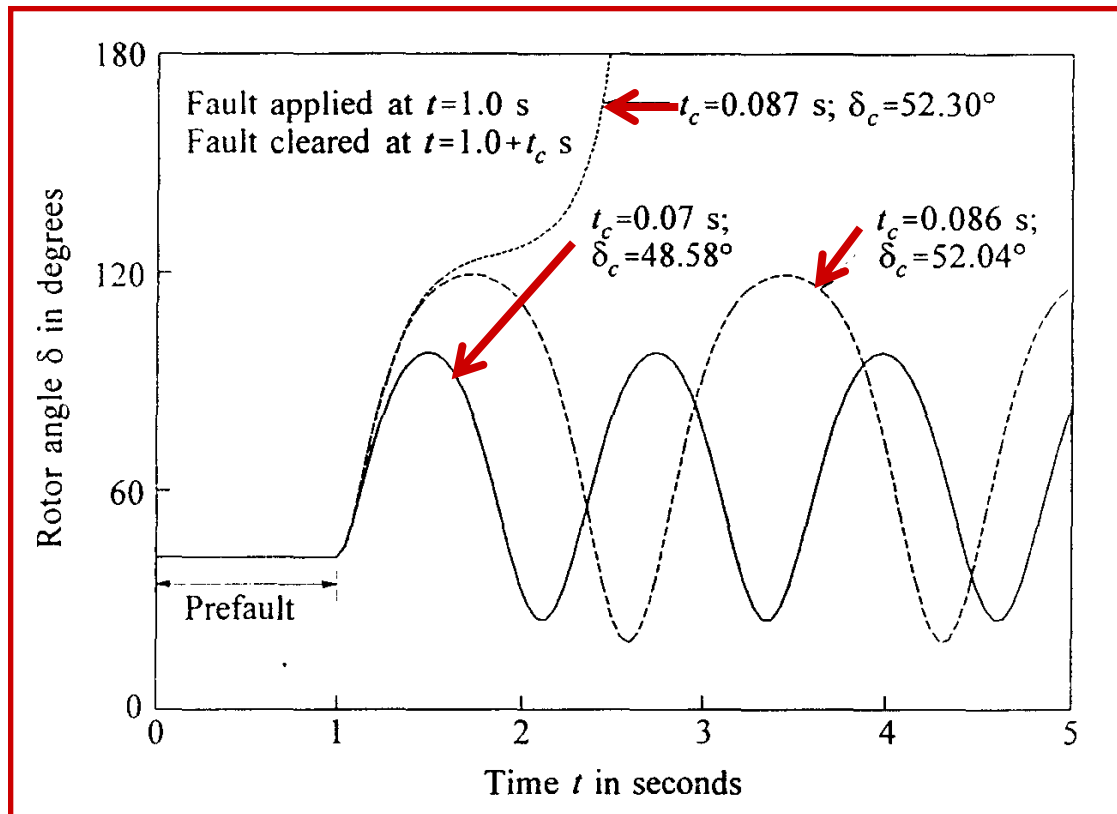


Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo

Si la falla se aísla en 0,086 segundos el sistema es estable y si la falla se aísla en 0,087 segundos el sistema es inestable; por lo tanto:

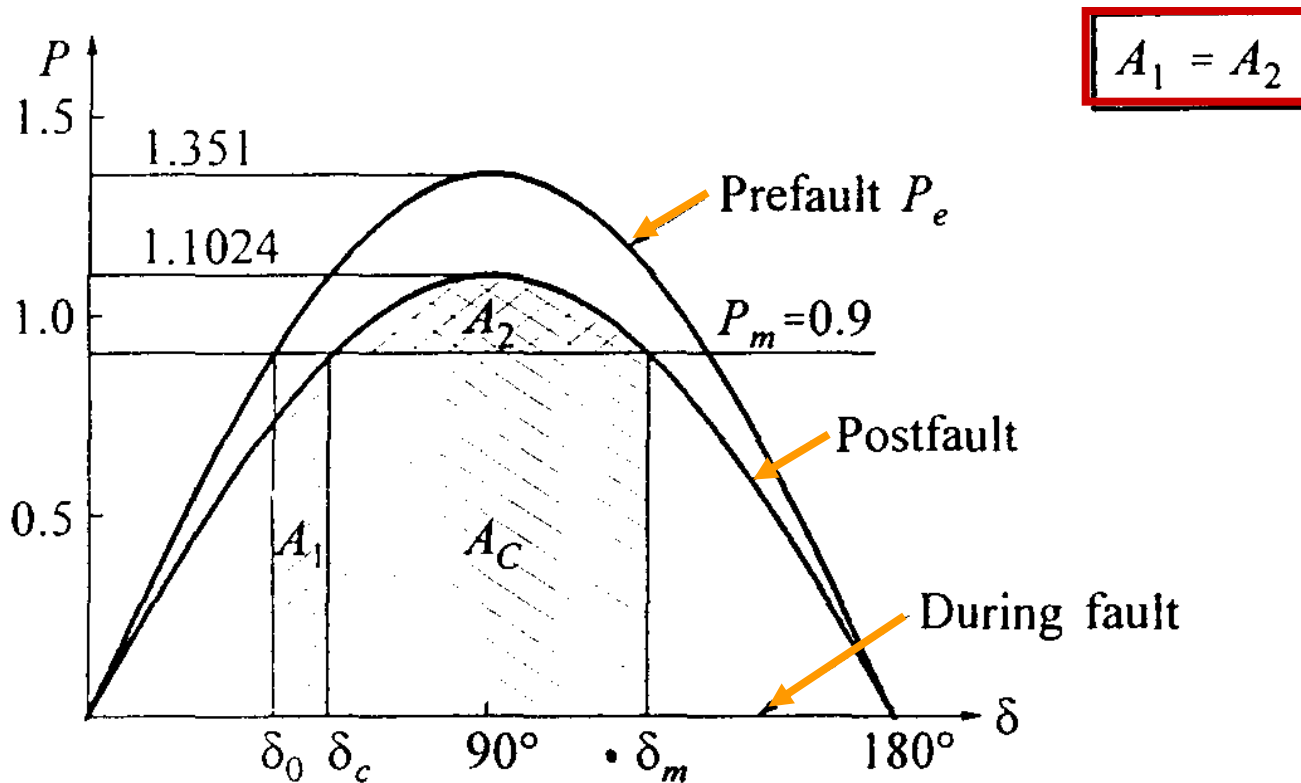
$$0,086 \text{ s} < t_c < 0,087 \text{ s} \quad 52,04^\circ < \delta_c < 52,30^\circ$$



Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

□ Ejemplo

Las curvas P_e vs. δ para las tres condiciones del sistema son:



$$\begin{aligned}\delta_0 &= 41.77^\circ \\ \delta_m &= 125.27^\circ \\ \delta_c &= 52.29^\circ\end{aligned}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

Para la condición de Post-Falla, el máximo ángulo del rotor esta dado por:

$$1,1024 \operatorname{sen}(\delta_m) = 0,9 \Rightarrow \delta_m = \arcsen\left(\frac{0,9}{1,1024}\right) \Rightarrow \delta_m = 125,27^\circ$$

$$\text{Como } P_e = 0 \quad (\text{Falla}) \Rightarrow r_1 = 0$$

$$\delta_C = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{r_2} \left[\frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_m - \delta_0) + r_2 \cos(\delta_m) \right] \right\}$$

Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

❑ Ejemplo

resulta:

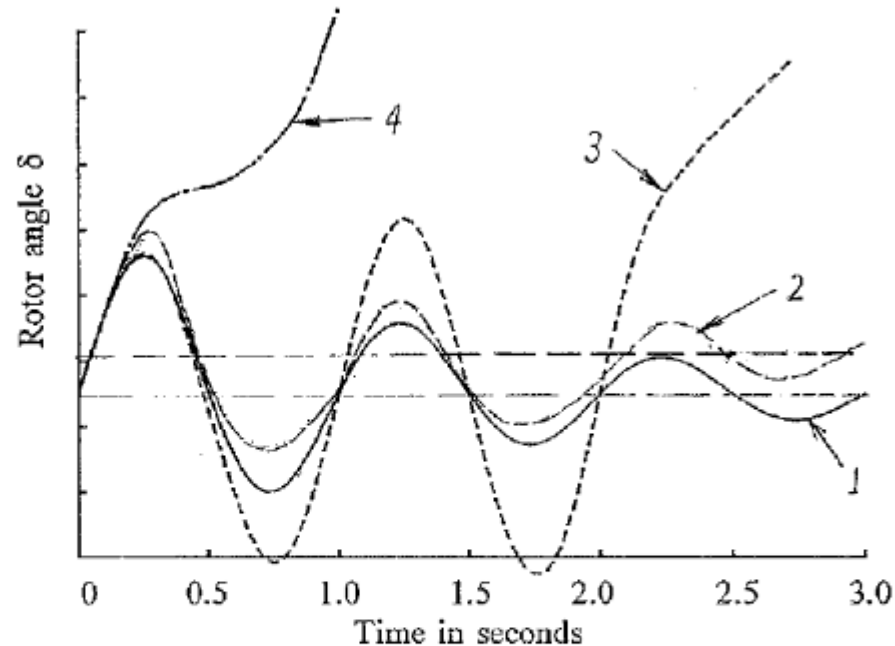
$$\delta_c = \cos^{-1} \left\{ \frac{1,351}{1,1024} \left[\frac{0,9}{1,351} (125,27^\circ - 41,77^\circ) \frac{2\pi}{360^\circ} + \frac{1,1024}{1,351} \cos(125,27^\circ) \right] \right\} \Rightarrow$$

$$\delta_c = 52,29^\circ$$

Este valor es consistente con el calculado en la simulación numérica 😊

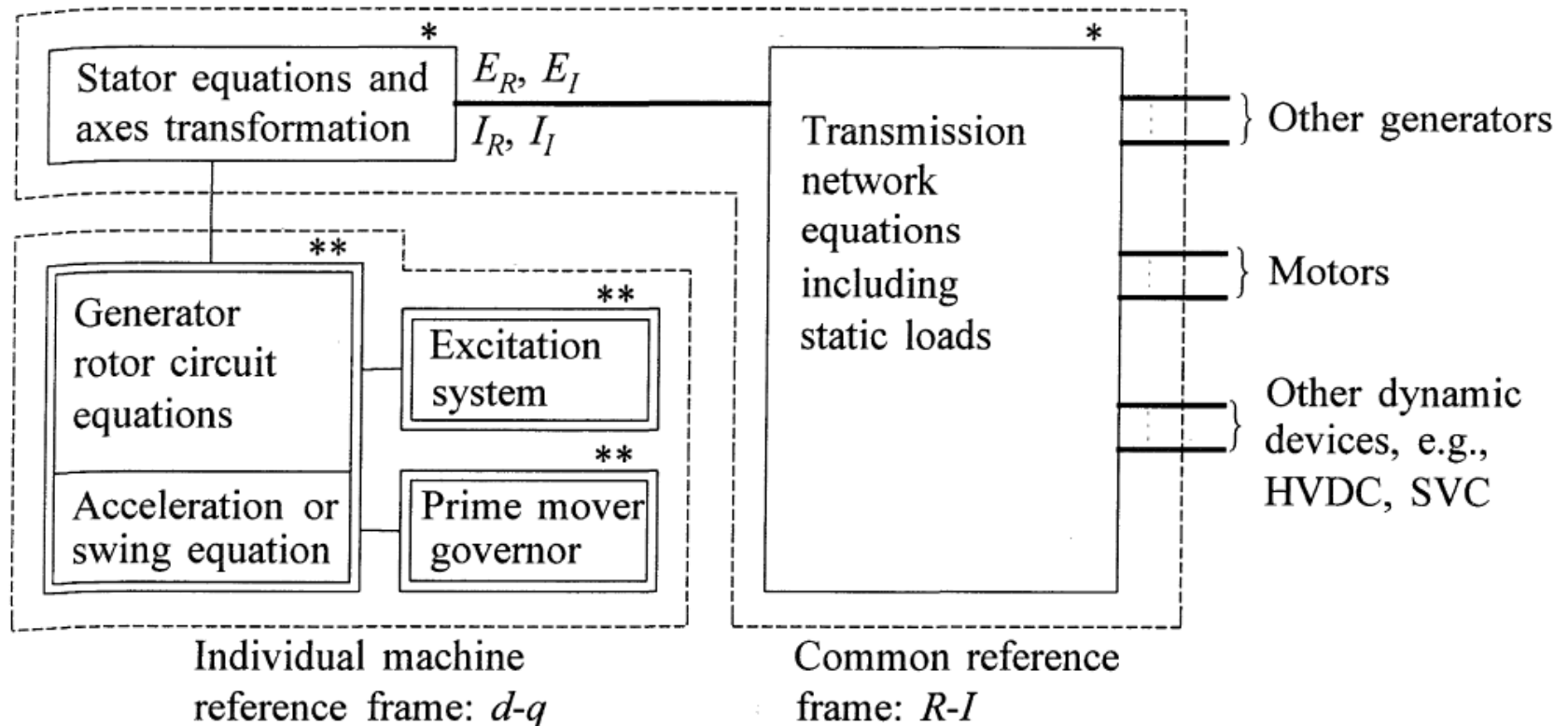
Una visión elemental de Estabilidad Transitoria

Comportamientos del ángulo del rotor



- Case 1: Steady-state stable
- Case 2: Transient stable
- Case 3: Small-signal unstable
- Case 4: First swing unstable

Estructura del modelo dinámico completo para estudios de Estabilidad Transitoria en SEP



- * Algebraic equations
- ** Differential equations

Estructura del modelo dinámico completo para estudios de Estabilidad Transitoria en SEP

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V})$$

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}$$

$$(\mathbf{x}_0, \mathbf{V}_0)$$

Problema de valor inicial
algebraico-diferencial

donde $\mathbf{x}$ = state vector of the system
 $\mathbf{V}$ = bus voltage vector
 $\mathbf{I}$ = current injection vector

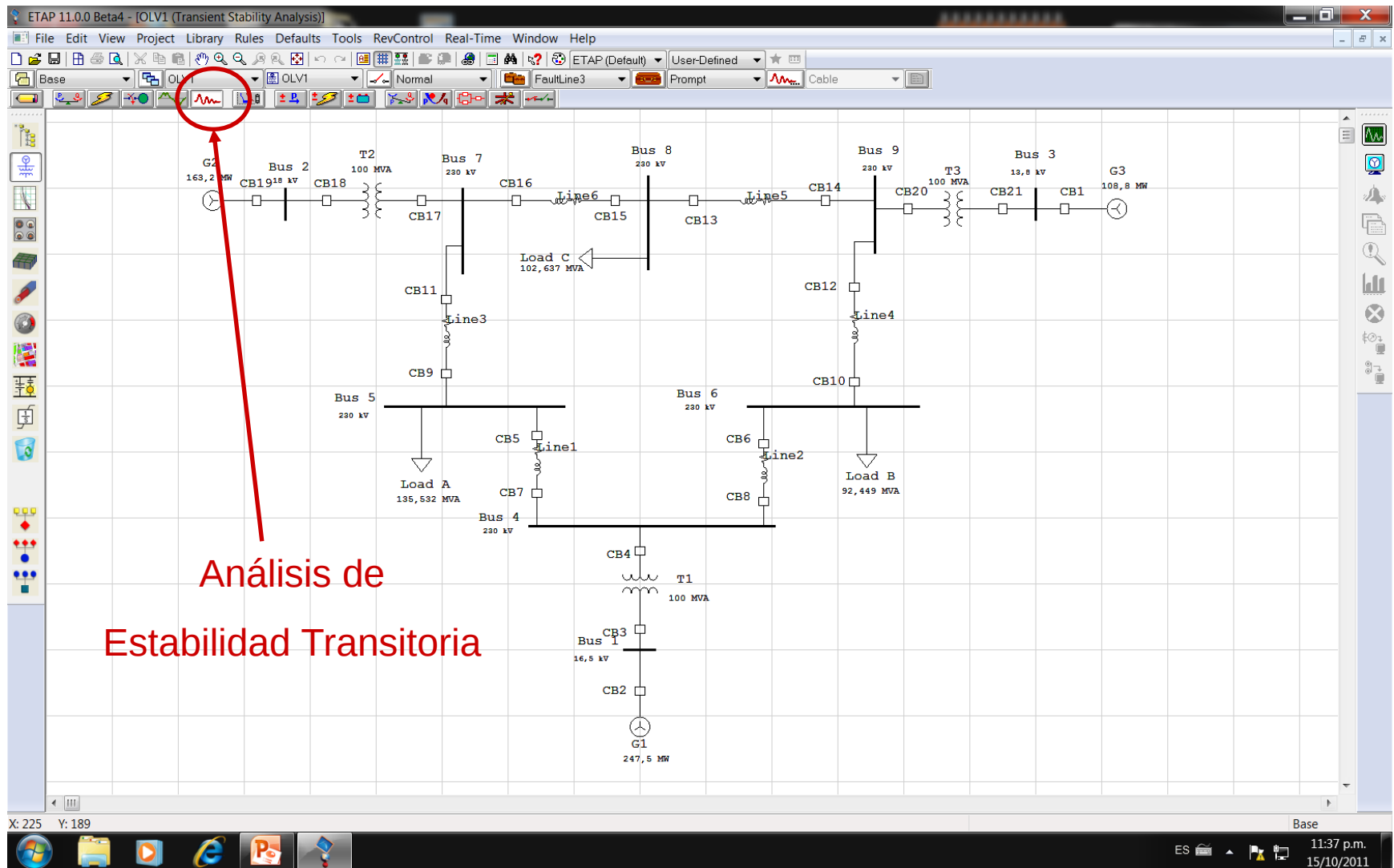
B. Stott, "Power System Dynamic Response Calculations," *Proc. IEEE*, Vol. 67, pp. 219-241, February 1979.

Estructura del modelo dinámico completo para estudios de Estabilidad Transitoria en SEP

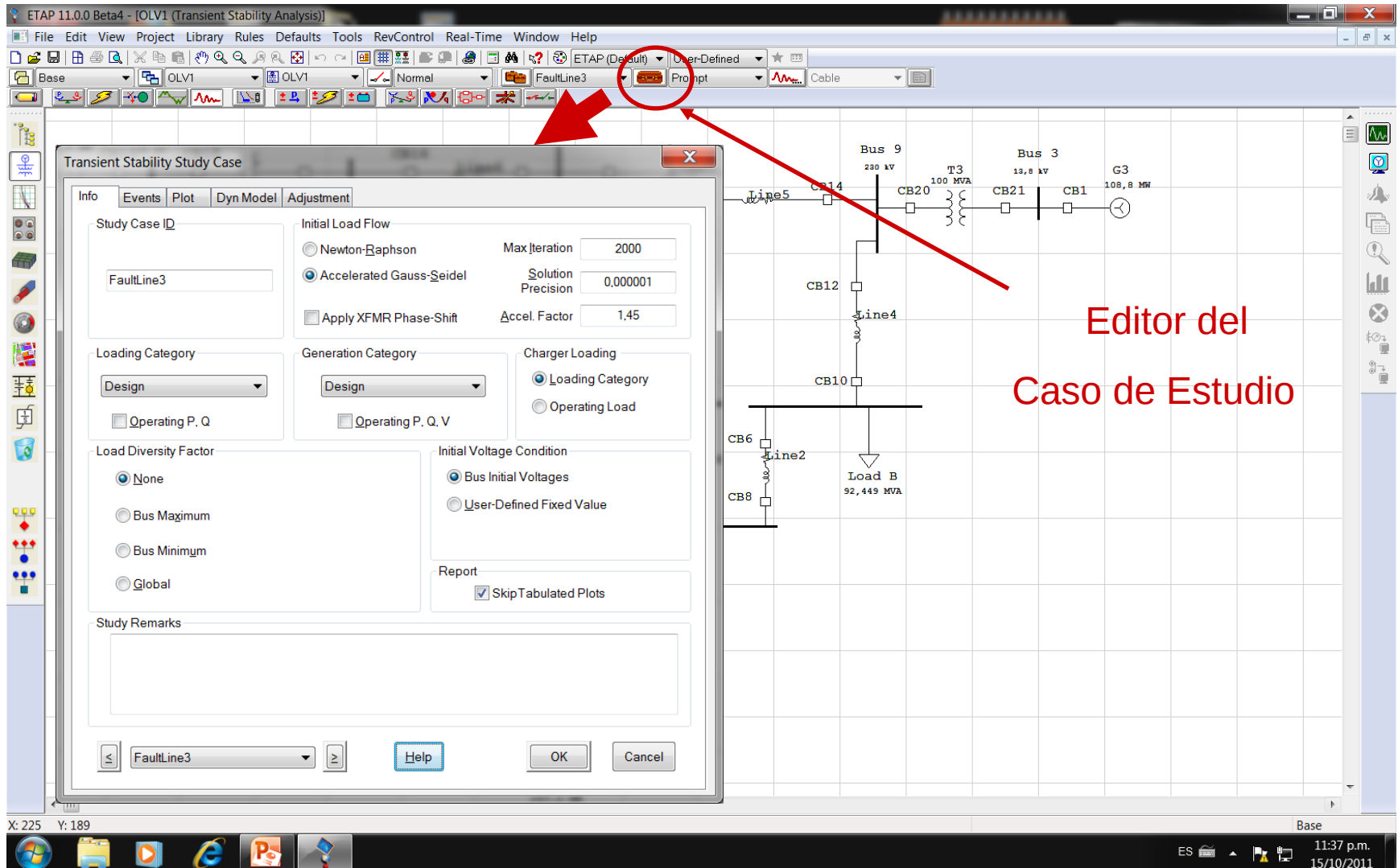
Los distintos esquemas posibles para resolver el problema de valor inicial algebraico-diferencial de Estabilidad Transitoria estan caracterizados por los factores siguientes:

- ✓ **Interfase entre sistemas de ecuaciones:** enfoque particionado o enfoque simultaneo
- ✓ **Método de integración del SEDO:** métodos explícitos o métodos implícitos
- ✓ **Método de resolución del SEA:** métodos directos factorizacion triangular o métodos iterativos

Editor de estudios de ET de ETAP®11



Editor de estudios de ET de ETAP®11



Editor del
Caso de Estudio

Editor de estudios de ET de ETAP®11

Doce (12)
caracteres
alfanuméricos

Transient Stability Study Case

Info Events Plot Dyn Model Adjustment

Study Case ID

FaultLine3

Initial Load Flow

☐ Newton-Raphson ☒ Accelerated Gauss-Seidel ☐ Apply XFMR Phase-Shift

Max Iteration 2000

Solution Precision 0.000001

Accel. Factor 1.45

Loading Category

Design

☐ Operating P, Q

Generation Category

Design

☐ Operating P, Q, V

Charger Loading

☒ Loading Category ☐ Operating Load

Load Diversity Factor

☒ None ☐ Bus Maximum ☐ Bus Minimum ☐ Global

Initial Voltage Condition

☒ Bus Initial Voltages ☐ User-Defined Fixed Value

Report

☒ Skip Tabulated Plots

Study Remarks

≤ FaultLine3 ≥

Help OK Cancel

FPE prefalla

Editor de estudios de ET de ETAP®11

Transient Stability Study Case

Info Events Plot Dyn Model Adjustment

Study Case ID
FaultLine3

Initial Load Flow
☐ Newton-Raphson
☒ Accelerated Gauss-Seidel
☐ Apply XFMR Phase-Shift
 Max Iteration: 2000
 Solution Precision: 0.000001
 Accel. Factor: 1.45

Loading Category
 Design
 Design
 Normal
 Winter Load
 Summer Load
 Backup
 FI Ld Rejec
 Emergency
 Shutdown
 Accident
 Load Cat 10
☐ Bus Minimum

Generation Category
 Design
☐ Operating P, Q, V

Charger Loading
☒ Loading Category
☐ Operating Load

Initial Voltage Condition
☒ Bus Initial Voltages
☐ User-Defined Fixed Value

Report
☒ Skip Tabulated Plots

Study Remarks

≤ FaultLine3 ≥

Help OK Cancel

Diez (10)
categorías de
demanda

Editor de estudios de ET de ETAP®11

Transient Stability Study Case

Info Events Plot Dyn Model Adjustment

Study Case ID
FaultLine3

Initial Load Flow
☐ Newton-Raphson
☒ Accelerated Gauss-Seidel
☐ Apply XFMR Phase-Shift
 Max Iteration: 2000
 Solution Precision: 0.000001
 Accel. Factor: 1.45

Loading Category
Design

Operating P, Q
☐

Load Diversity Factor
☒ None
☐ Bus Maximum
☐ Bus Minimum
☐ Global

Generation Category
 Design
 Design
 Normal
 Shutdown
 Emergency
 Standby
 Startup
 Accident
 Summer Load
 Winter Load
 Gen Cat 10

Charger Loading
☒ Loading Category
☐ Operating Load

Stage Condition
Initial Voltages
Pre-Defined Fixed Value

Report
☒ Skip Tabulated Plots

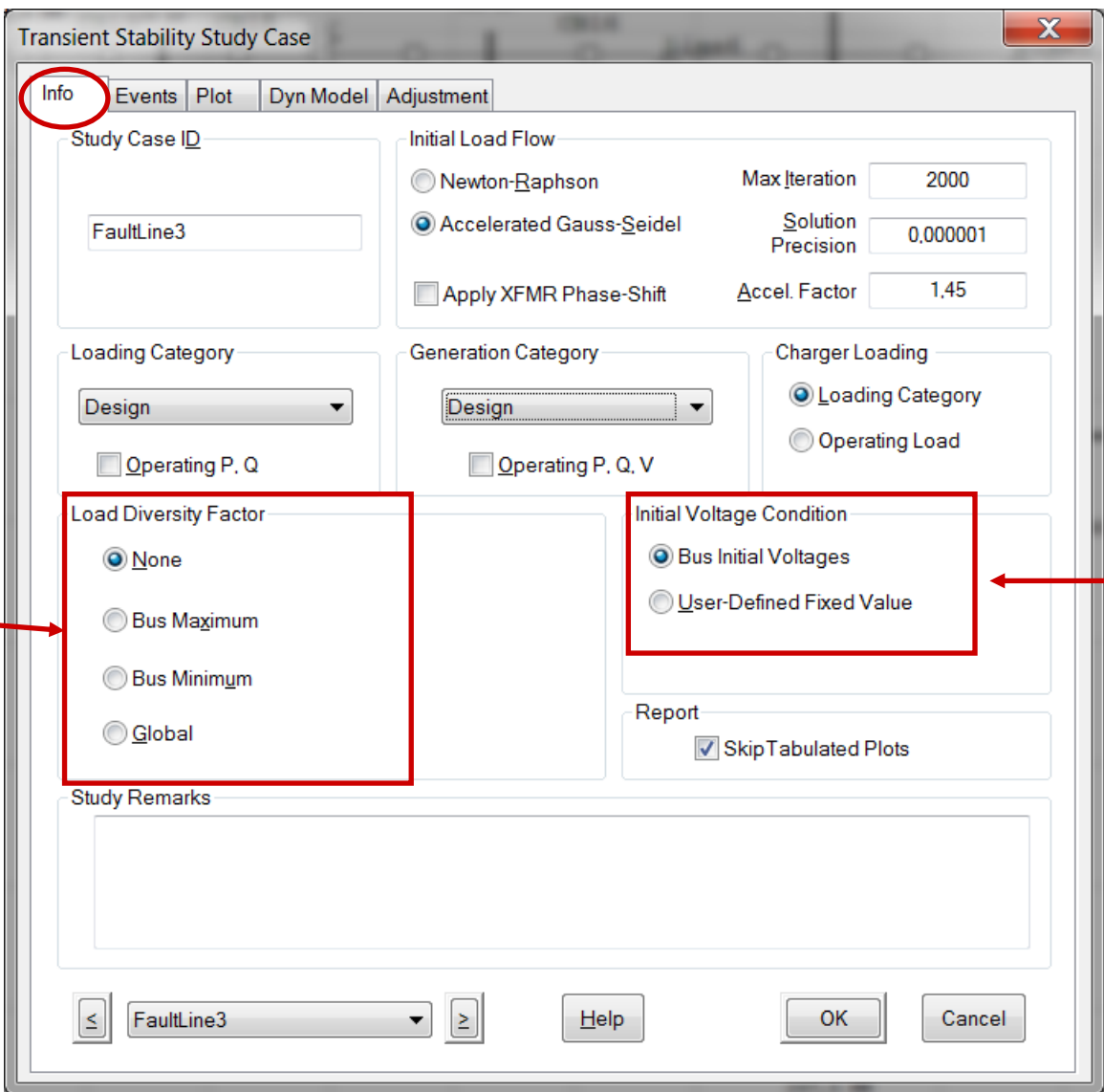
Study Remarks

≤ FaultLine3 ≥

Help OK Cancel

Diez (10)
categorías de
generación

Editor de estudios de ET de ETAP®11



Transient Stability Study Case

Info Events Plot Dyn Model Adjustment

Study Case ID: FaultLine3

Initial Load Flow:

- ☐ Newton-Raphson
- ☒ Accelerated Gauss-Seidel
- ☐ Apply XFMR Phase-Shift

Max Iteration: 2000

Solution Precision: 0.000001

Accel. Factor: 1.45

Loading Category: Design

Operating P. Q: ☐

Generation Category: Design

Operating P. Q. V: ☐

Charger Loading:

- ☒ Loading Category
- ☐ Operating Load

Load Diversity Factor:

- ☒ None
- ☐ Bus Maximum
- ☐ Bus Minimum
- ☐ Global

Initial Voltage Condition:

- ☒ Bus Initial Voltages
- ☐ User-Defined Fixed Value

Report:

☒ Skip Tabulated Plots

Study Remarks:

≤ FaultLine3 ≥

Help OK Cancel

Factores de demanda →

← **Perfil inicial de tensiones de barras**

Editor de estudios de ET de ETAP®11

Transient Stability Study Case

Info Events Plot Dyn Model Adjustment

Study Case ID: FaultLine3

Initial Load Flow: ☐ Newton-Raphson ☒ Accelerated Gauss-Seidel ☐ Apply XFMR Phase-Shift

Max Iteration: 2000 Solution Precision: 0.000001 Accel. Factor: 1.45

Loading Category: Design ☐ Operating P, Q

Generation Category: Design ☐ Operating P, Q, V

Charger Loading: ☒ Loading Category ☐ Operating Load

Load Diversity Factor: ☒ None ☐ Bus Maximum ☐ Bus Minimum ☐ Global

Initial Voltage Condition: ☒ Bus Initial Voltages ☐ User-Defined Fixed Value

Report: ☒ Skip Tabulated Plots

Study Remarks

≤ FaultLine3 ≥ Help OK Cancel

Ciento veinte
(120) caracteres
alfanuméricos

Informe sin
valores tabulados

Editor de estudios de ET de ETAP®11

Transient Stability Study Case

Info **Events** Plot Dyn Model Adjustment

Event ID	Time
* FItLine3End	0,000
* OpenLine3	0,116

For Event Active

Device Type	Device ID	Action	Settin...	Settin...
Line	Line3	Fault	0 %	

Add... Edit... Delete

Add... Edit... Delete

Solution Parameters

Total Simulation Time Second

Simulation Time Step

Plot Time Step x dt

< FaultLine3 > Help OK Cancel

Intervalo de
graficación

$5/(10 \times 0,001) =$
500 puntos en el
disco

Editor de estudios de ET de ETAP®11

Transient Stability Study Case

Info **Events** Plot Dyn Model Adjustment

Events

Event ID	Time
* FItLine3End	0,000
* OpenLine3	0,116

Actions

For Event: FItLine3End Active

Device Type	Device ID	Action	Settin...	Settin...
Line	Line3	Fault	0 %	

Event Editor

Active ☒ Event ID: FItLine3End Time: 0

Help OK Cancel

Add... **Edit...** Delete

Solution Parameters

Total Simulation Time: 5 Second

Simulation Time Step: 0,001 Plot Time Step: 10 x dt

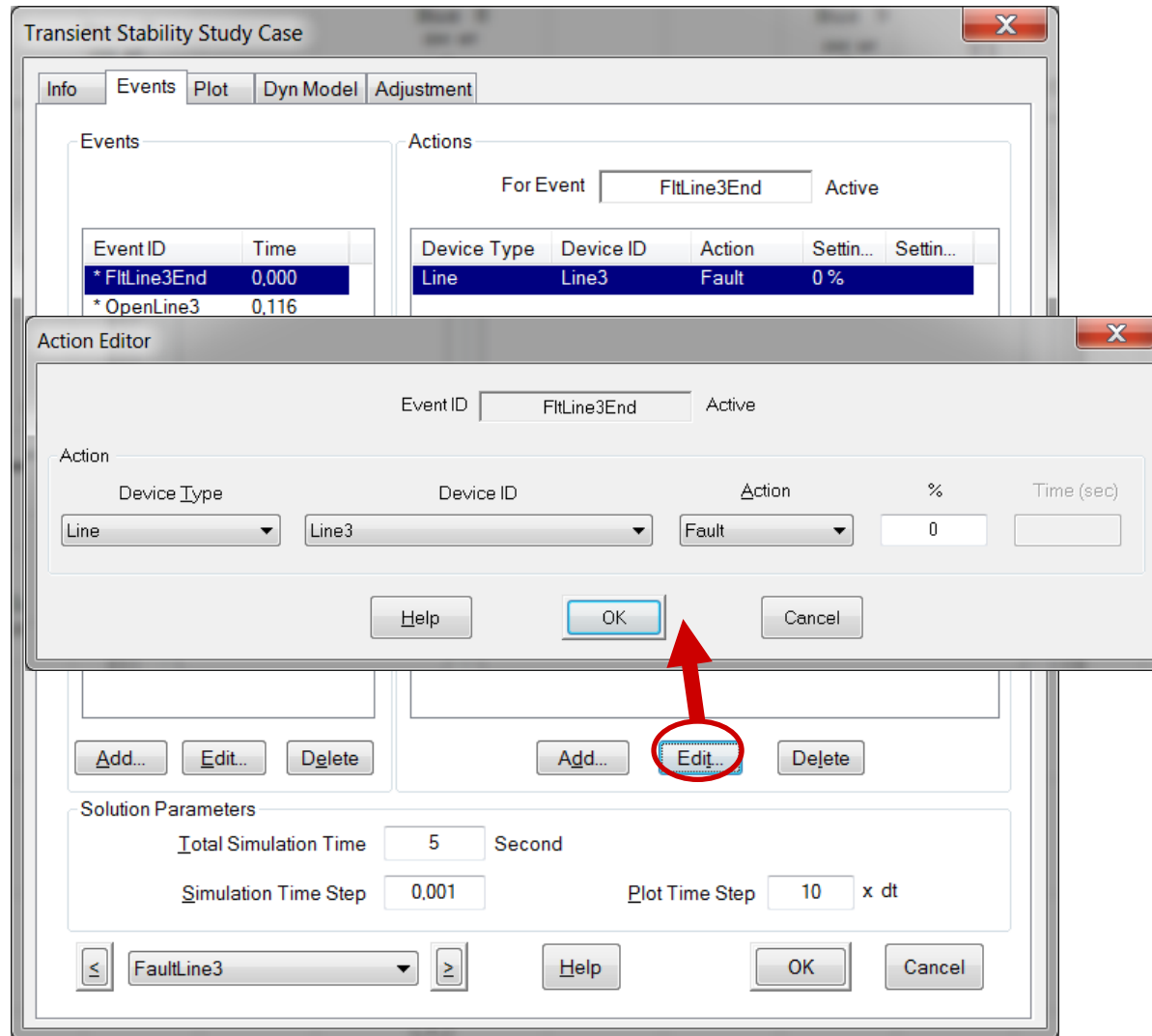
< FaultLine3 > Help OK Cancel

Evento activo/desactivo

Doce (12) caracteres alfanuméricos

Tiempo de ocurrencia del evento

Editor de estudios de ET de ETAP®11



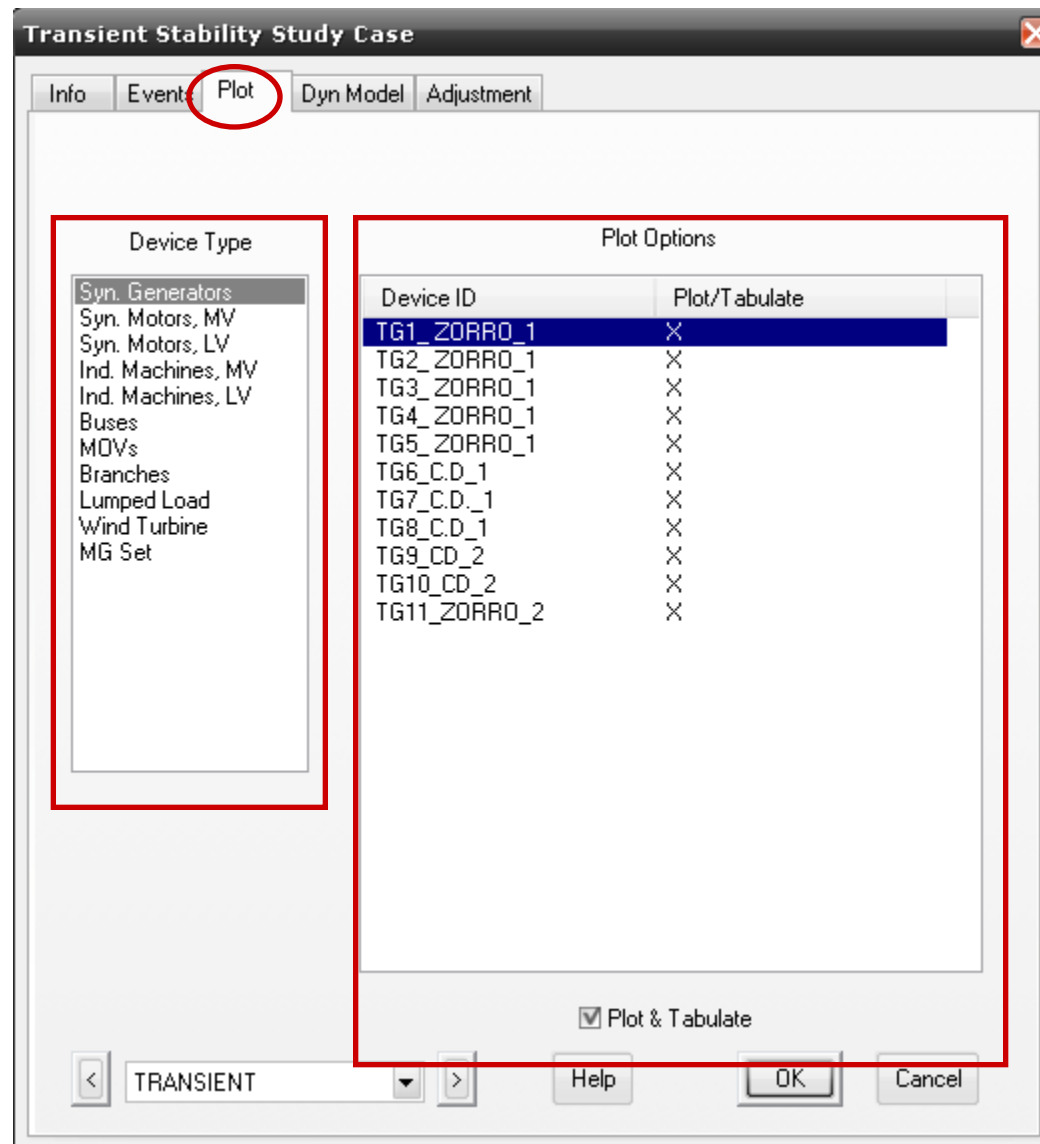
Editor de estudios de ET de ETAP®11

<u>Device Type</u>	<u>Actions</u>	<u>Setting 1</u>	<u>Setting 2</u>
Bus	3 Phase Fault / Clear Fault/ LG Fault	-	-
Cable	Fault / Clear Fault	% of total length	-
Line	Fault / Clear Fault	% of total length	-
Impedance	Fault / Clear Fault	% of total length	-
Circuit Breaker	Open / Close	-	-
SPST Switch	Open / Close	-	-
Fuse	Trip	-	-
Contactors	Open / Close	-	-
Generator	Ref. Machine	-	-
	Droop	-	-
	Isoch	-	-
	Start	-	-
	Loss Excitation	-	-
	Generation Impact	% change in electrical power	-
	Generation Ramp	% change in electrical power	Time (sec) for % change
	Voltage Impact	% change in reference voltage	-
	Voltage Ramp	% change in reference voltage	Time (sec) for % change
	Delete	-	-

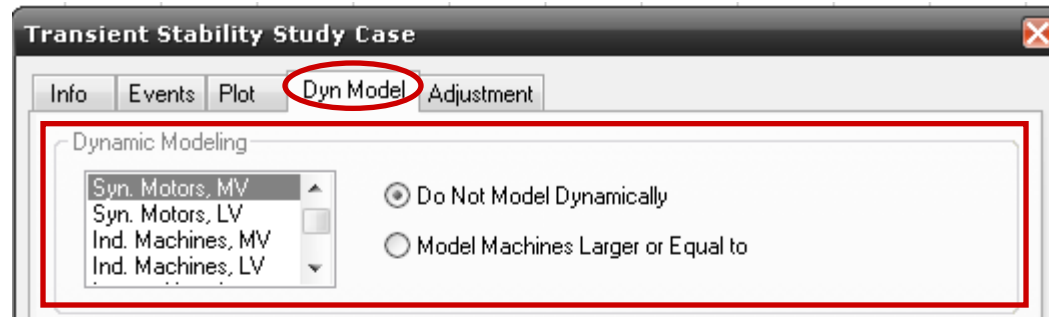
Editor de estudios de ET de ETAP®11

Utility	Ref. Machine	-	-
	Voltage Impact	% change in reference voltage	-
	Voltage Ramp	% change in reference voltage	Time (sec) for % change
	Delete	-	-
Syn. Motor	Accel	-	-
	Load Impact	% change in loading	-
	Load Ramp	% change in loading	Time (sec) for % change
	Delete	-	-
Ind. Motor	Accel	-	-
	Load Impact	% change in loading	-
	Load Ramp	% change in loading	Time (sec) for % change
	Delete	-	-
Lumped Load	Load Impact	% change in loading	-
	Load Ramp	% change in loading	Time (sec) for % change
	Delete	-	-
MOV	Start	-	-
Wind Turbine	U-D Wind Disturbance		
	Wind Gust		
	Wind Ramp		
Wind Turbine (Zone)	U-D Wind Disturbance		
	Wind Gust		
	Wind Ramp		
None	Load Flow (no action, print load flow at the event time)	-	-

Editor de estudios de ET de ETAP®11



Editor de estudios de ET de ETAP®11



A machine or a lumped load will be dynamically modeled if you have specified a dynamic model in its editor and you select to globally model that motor group from this page.

Note: All synchronous generators and wind turbines are dynamically modeled.

Syn. Motors, MV

The machine group consisting of all synchronous motors, which are medium voltage (rated above 1.0 kV).

Syn. Motors, LV

The machine group consisting of all synchronous motors that are low voltage (rated less than or equal to 1.0 kV).

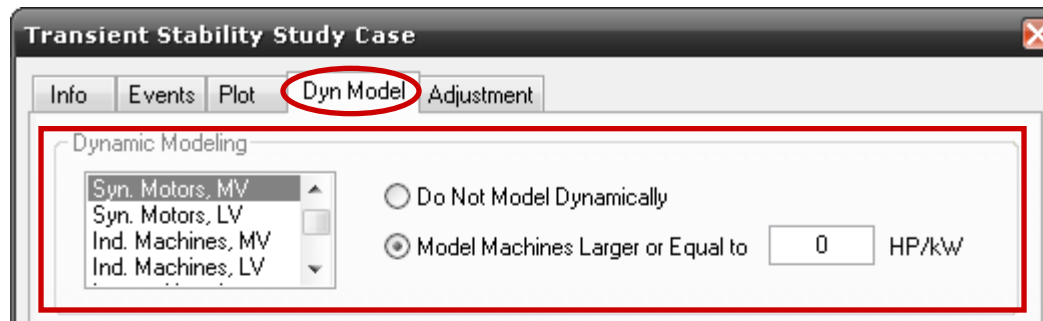
Ind. Machines, MV

The machine group consisting of all induction machines that are medium voltage (above 1.0 kV).

Ind. Machines, LV

The machine group consisting of all induction machines that are low voltage (rated less than or equal to 1.0 kV).

Editor de estudios de ET de ETAP®11



Lumped Loads

This group consists of all lumped loads that are connected in the system.

Do Not Model Dynamically

If selected, the corresponding machine group will not be dynamically modeled in the transient stability study for this Study Case, regardless of dynamic models specified for individual machines.

Model Machines Larger or Equal To

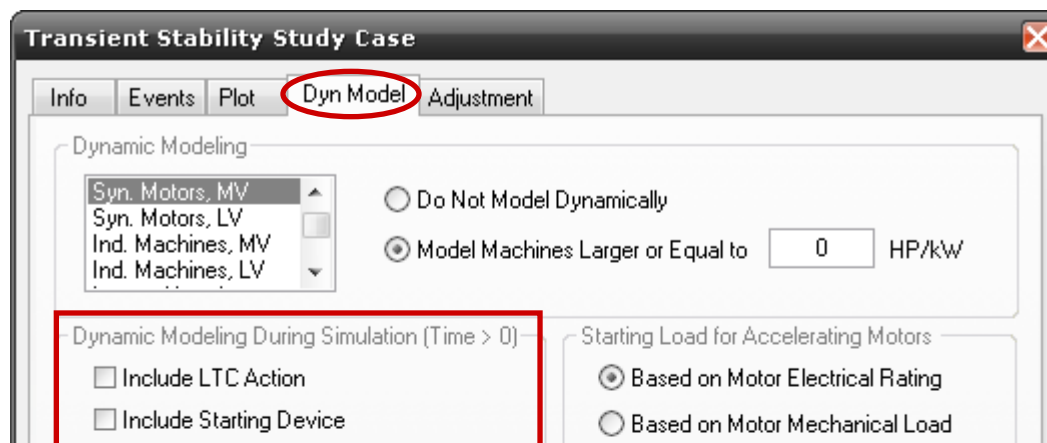
If selected, machines that are in the corresponding machine group and rated larger than the size specified in the HP/kW field will be dynamically modeled, and machines in the same group that are rated less than the size specified will not be dynamically modeled.

Note: For the machine to be dynamically modeled, it should also have a dynamic model specified for it from its editor.

HP/kW (for Machines) or MVA (for Lumped Loads)

Specify the size of machines (HP or kW) or lumped loads (rated MVA) for the selected group to be dynamically modeled.

Editor de estudios de ET de ETAP®11

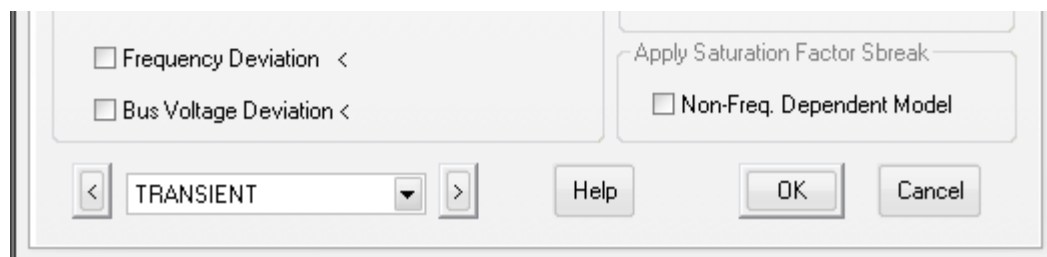


Include LTC Action

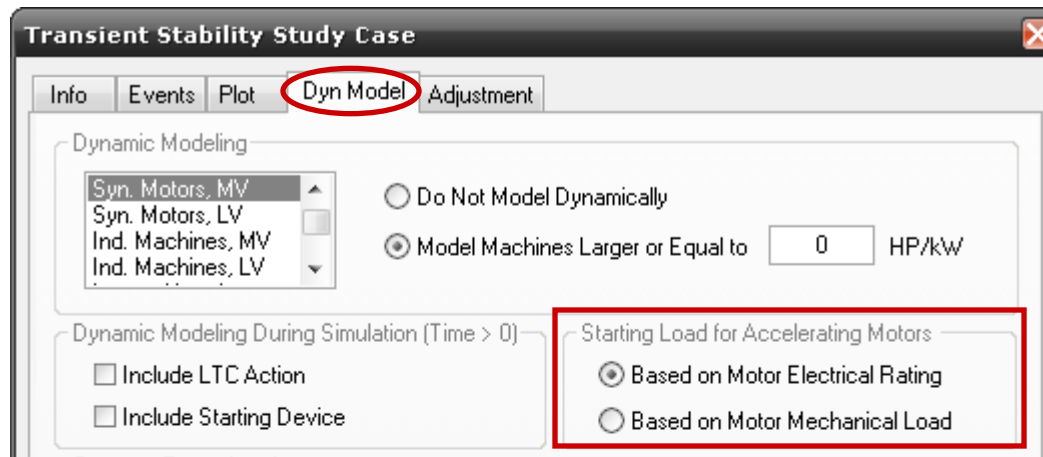
Check this option if you want to globally include or exclude LTC operation for time > 0 seconds. When checked, ETAP will consider the individual LTC initial time delay and operating time specified for transformers with LTC option (Tap page).

Include Starting Device

Check this option if you want to globally include or exclude starting device for accelerating motors. When checked, ETAP will consider starting device control scheme for accelerating motors.



Editor de estudios de ET de ETAP®11



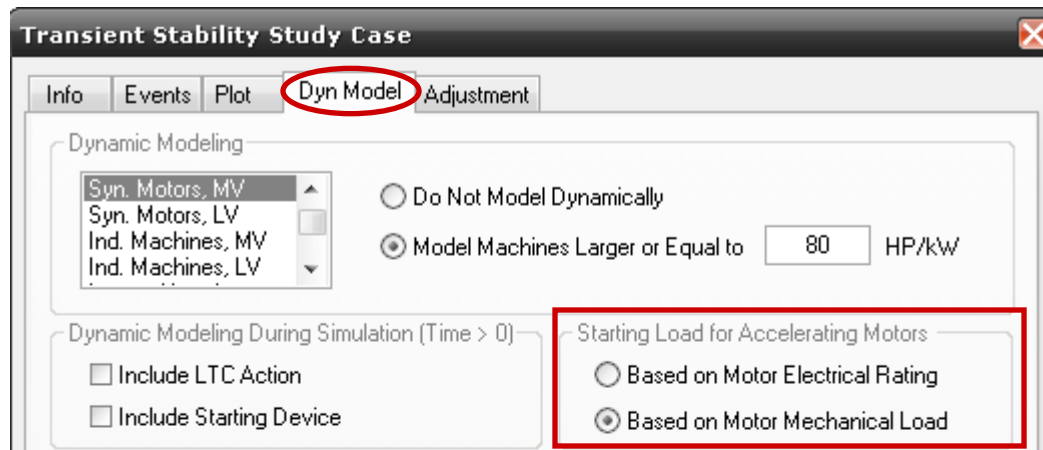
Starting Load of Accelerating Motors

In the motor acceleration calculations, the difference between the motor torque and the load torque is the motor acceleration torque. In ETAP, the load torque model is specified as torque in percent as a function of normalized motor speed. This load torque may be based on motor electrical rating or on mechanical load. In this group, you indicate to the Motor Acceleration Module which base you want to use.

Based on Motor Electrical Rating

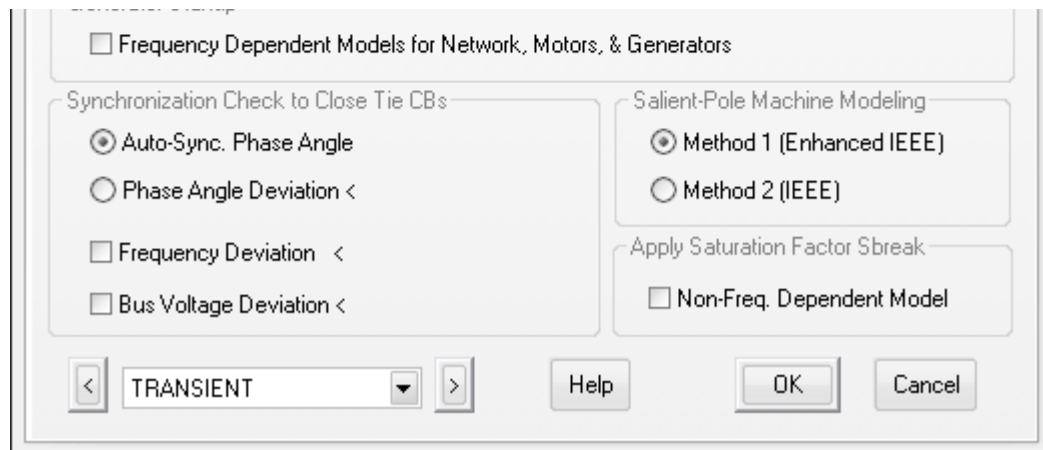
When this option is selected, it is assumed that the load torque model you selected in the Motor Editor only represents the shape of the load as a function of speed. The load torque values will be adjusted so that the synchronous speed of the torque is equal to 100%. This means that, with the modified load curve, the motor will consume the rated electrical power at 100% starting load, under the rated voltage and at the rated speed. When this option is selected, the torque base used to construct the load torque model has no effect on the calculation results.

Editor de estudios de ET de ETAP®11

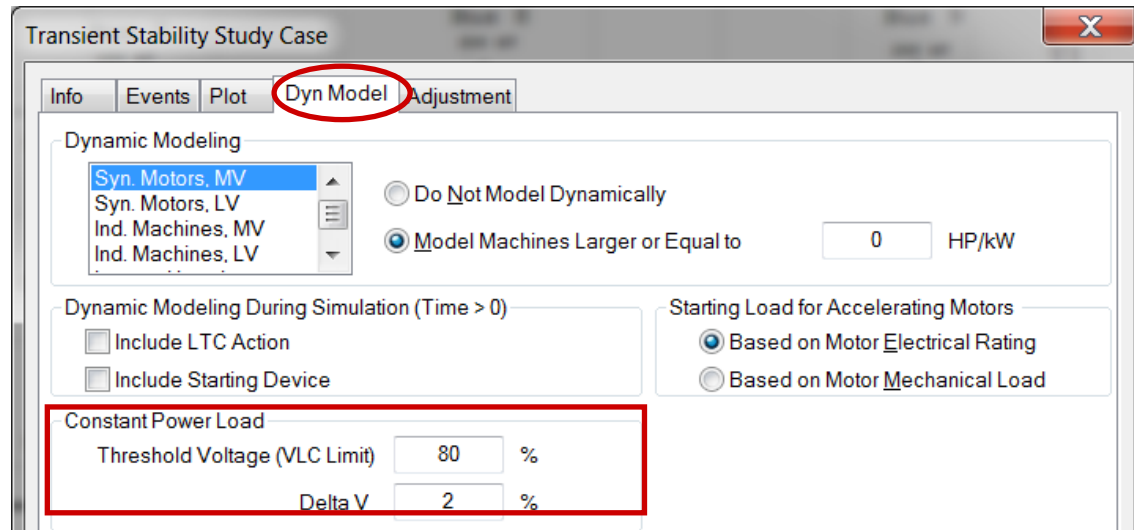


Based on Motor Mechanical Load

When this option is selected, it is assumed that the load torque model you selected in the Motor Editor represents the actual load based on the rated output torque. The load curve will be applied as it is without any adjustments.



Editor de estudios de ET de ETAP®11



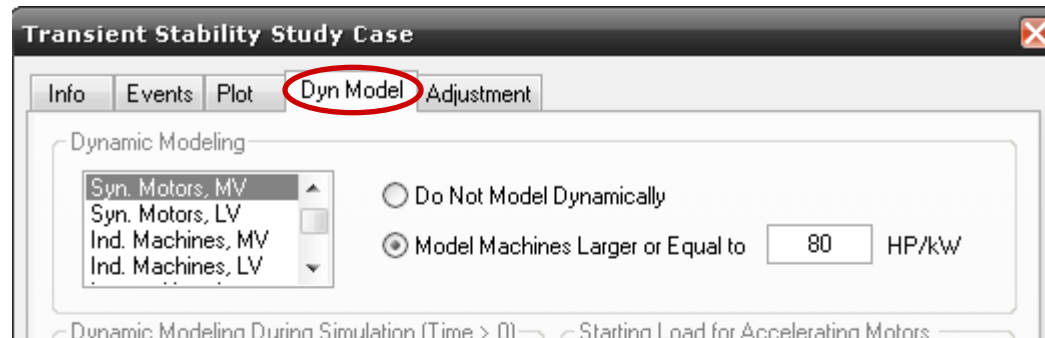
Threshold Voltage (VLC Limit)

This field is used to control the automatic conversion of a constant kVA load to a constant Z load for Transient Stability calculations. If the connected bus voltage is below this value, a load type conversion will occur for all applicable loads (constant kVA and constant Z). VLC Limit is specified in percent. Its typical value is 80%. The allowable range is 0 to 200%.

Delta V

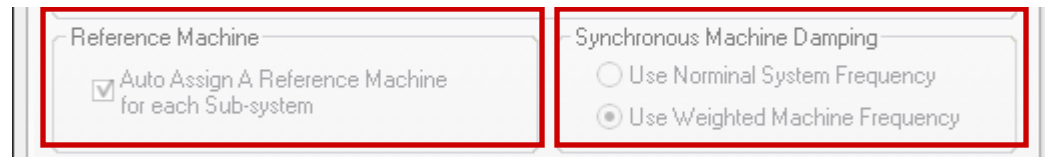
To avoid a sudden jump during the load type conversion, a 5% of voltage margin may be added to make an undetermined region of VLCLimit +/- 5%, which means if the connected bus voltage drops below VLCLimit - 5%, a constant kVA load is to be converted to constant Z load. On the other hand, if the connected bus voltage recovers about VLCLimit + 5%, the load is to be converted back to constant kVA load.

Editor de estudios de ET de ETAP®11



Auto Assign A Reference Machine for each Sub-system

This option Auto Assigns a Reference Machine for each subelectrical system. By default this option is checked and disabled.



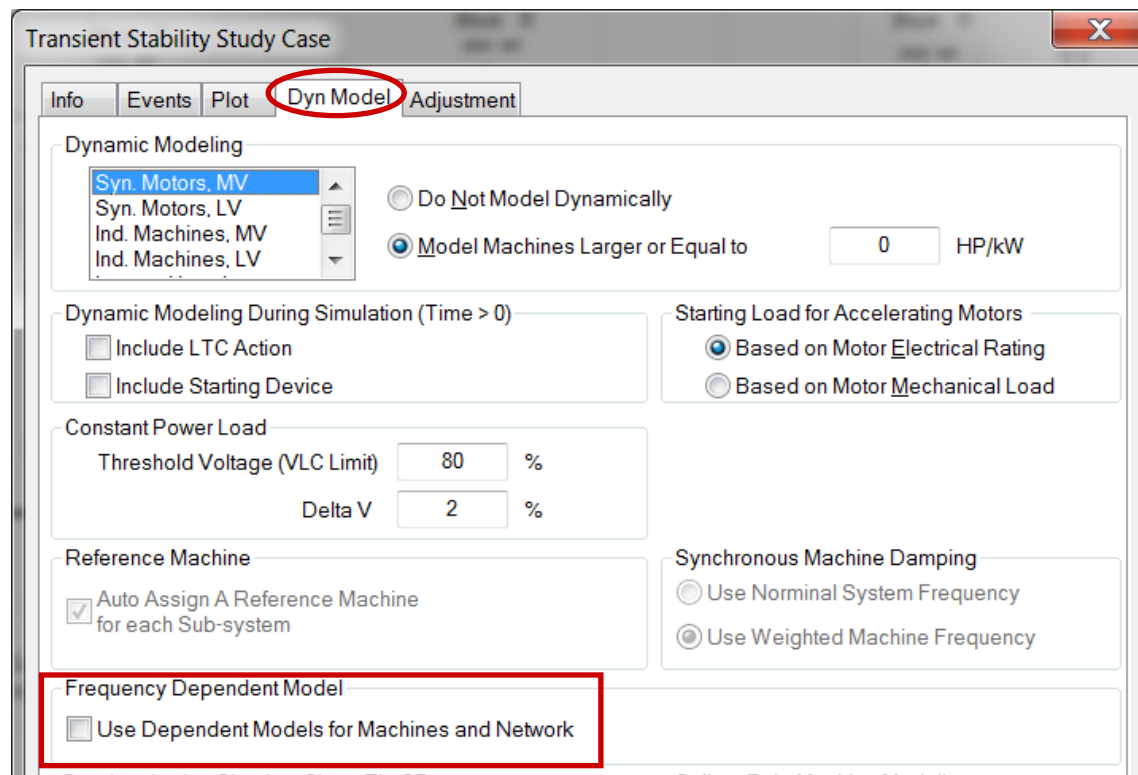
Use Nominal System Frequency

System nominal frequency will be used in the swing equation to calculate the machine damping power. This option assumes the actual network frequency remains constant during the transient, which is usually the case when the system has a power grid.

Use Weighted Machine Frequency

An equivalent network frequency will be calculated by taking the weighted average of the speed of the synchronous generators that are in the same subsystem. This equivalent frequency is then used in the swing equation to calculate machine-damping power. This option is more accurate for the system that does not have a power grid and thus the network frequency is not guaranteed to remain constant during the transient.

Editor de estudios de ET de ETAP®11



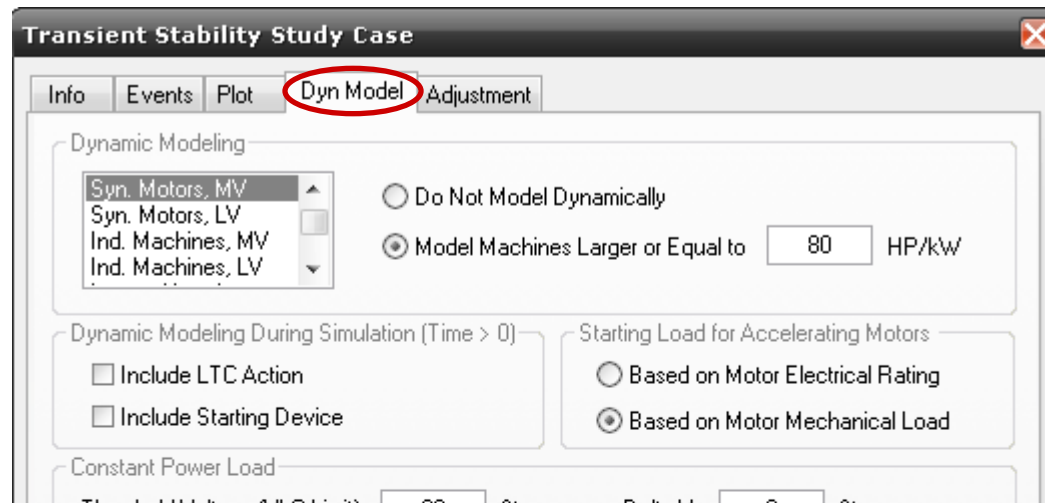
Generator Start-Up

Specify special frequency dependent models for generator start-up studies here.

Frequency Dependent Models for Network, Motors, & Generators

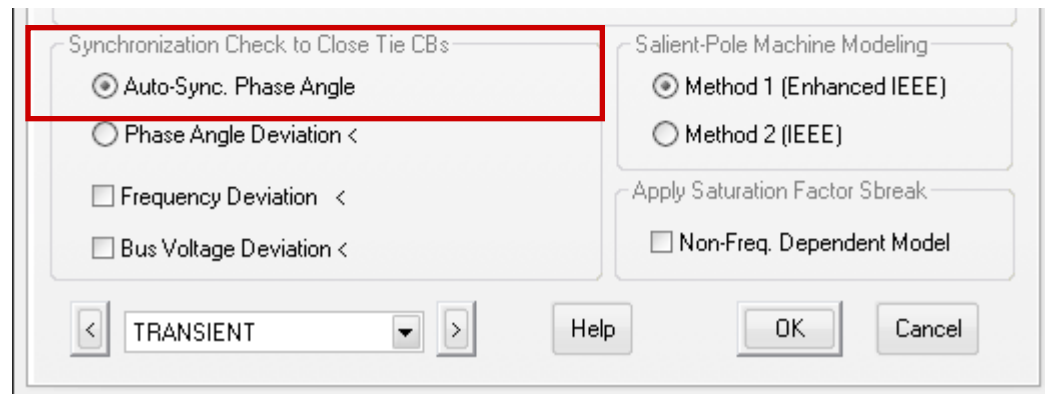
The network, motors, and generators will be modeled as frequency dependent. This option has to be checked in order to perform the generator start-up study.

Editor de estudios de ET de ETAP®11

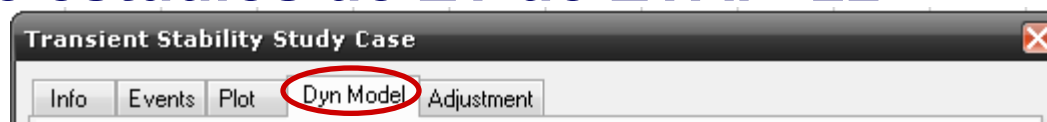


Auto-Sync. Phase Angle

If selected, when merging sub-electrical systems by Transient Stability Study Case actions or relay operations, voltage phase angles as well as machine internal angles in the merged systems will be synchronized. By default this option is selected.



Editor de estudios de ET de ETAP®11



Phase Angle Deviation <

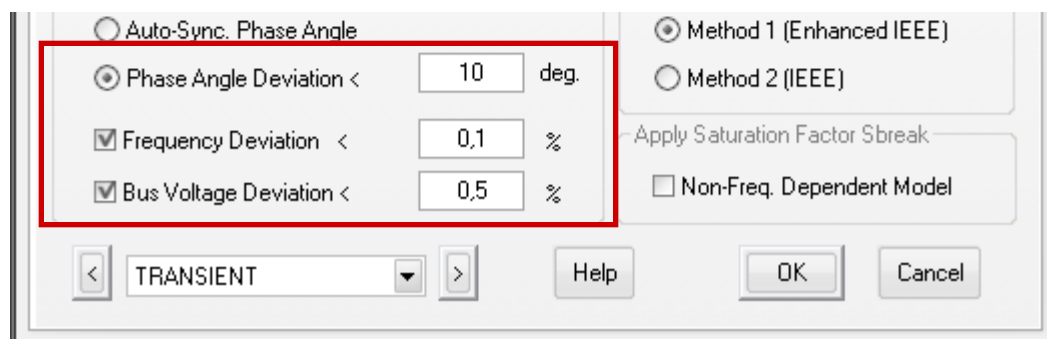
If selected, when merging sub-electrical systems by Transient Stability Study Case actions or relay operations, voltage phase angles as well as machine internal angles in the merged systems will be synchronized if the voltage phase angle difference across the closing CB (or any other valid protective devices) is less than the specified value; otherwise, the action will be invalid.

Frequency Deviation <

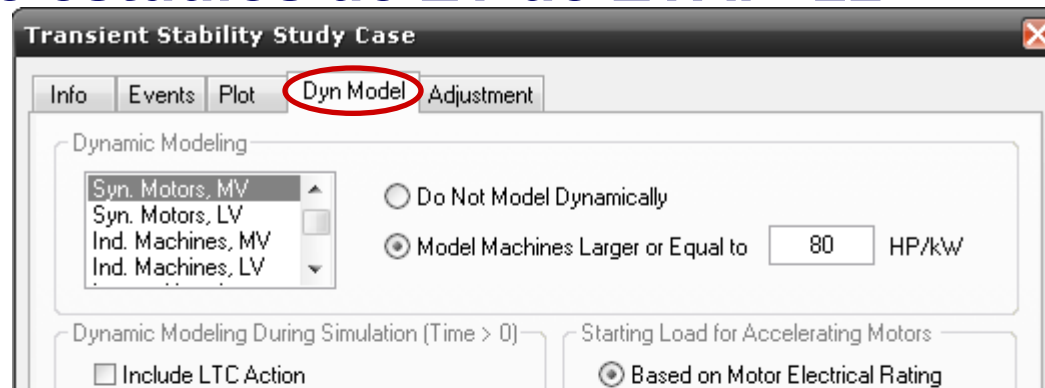
If selected, additional validation for merging action is required by checking the frequency difference in the percentage of the system frequency across the closing CB (or any other valid protective devices).

Bus Voltage Deviation <

If selected, additional validation for merging action is required by checking the voltage magnitude difference in percentage of the bus nominal voltage across the closing CB (or any other valid protective devices).



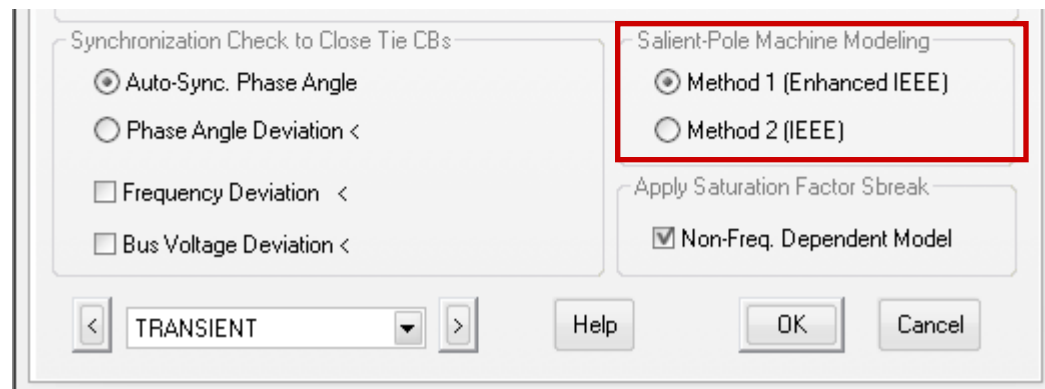
Editor de estudios de ET de ETAP®11



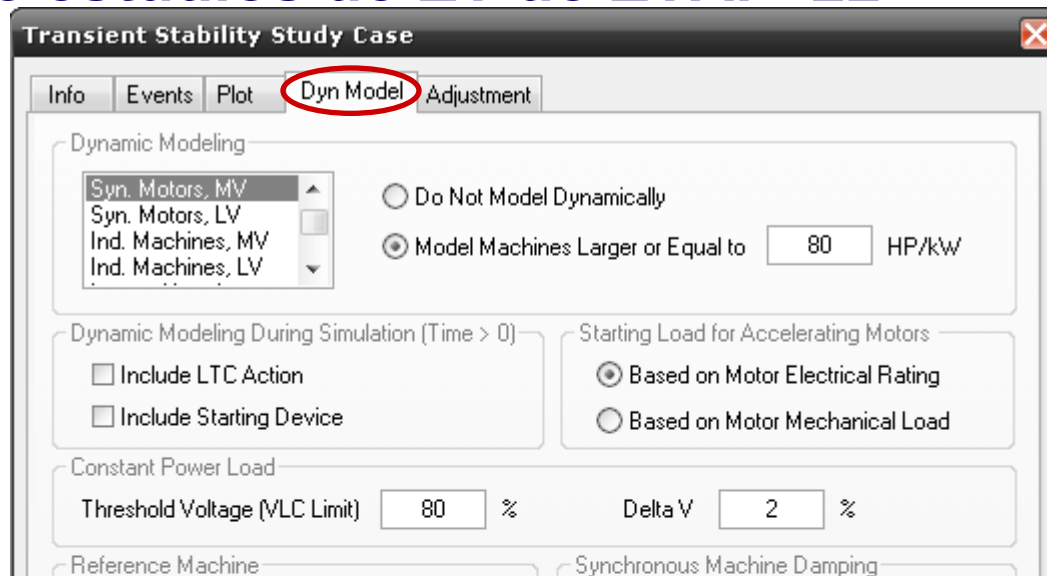
Salient-Pole Machine Modeling

Method 1 is using an enhanced IEEE model for salient-pole synchronous machine. This method in general provides a faster convergence during a Transient Simulation Study.

Method 2 uses a regular IEEE model for salient-pole synchronous machine. Its convergence during a Transient Simulation Study in general is slower.

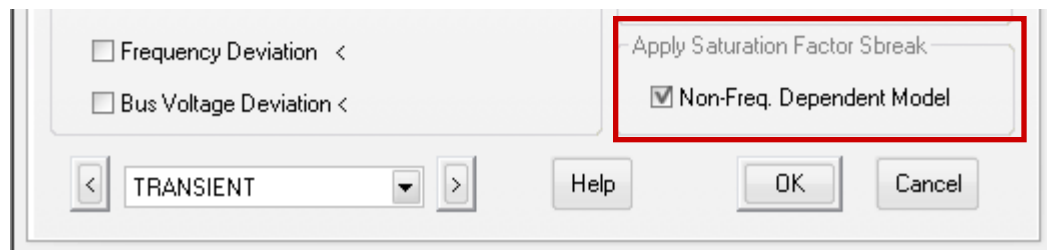


Editor de estudios de ET de ETAP®11



Non-Freq. Dependent Model

When checked, the synchronous machine saturation break point Sbreak will be used to define the machine saturation curve, together with the other two pieces of input data S100 and S120; otherwise, only S100 and S120 are used. Please note that this option is only for non-frequency dependent model studies. For frequency-dependent model studies, Sbreak is always used.



Editor de estudios de ET de ETAP®11

Transient Stability Study Case

Info Events Plot Dyn Model **Adjustment**

Impedance Tolerance

- ☒ Transformer
 - ☒ Individual
 - ☐ Global
- ☒ Reactor
 - ☐ Individual
 - ☒ Global %
- ☒ Overload Heater
 - ☒ Individual
 - ☐ Global

Length Tolerance

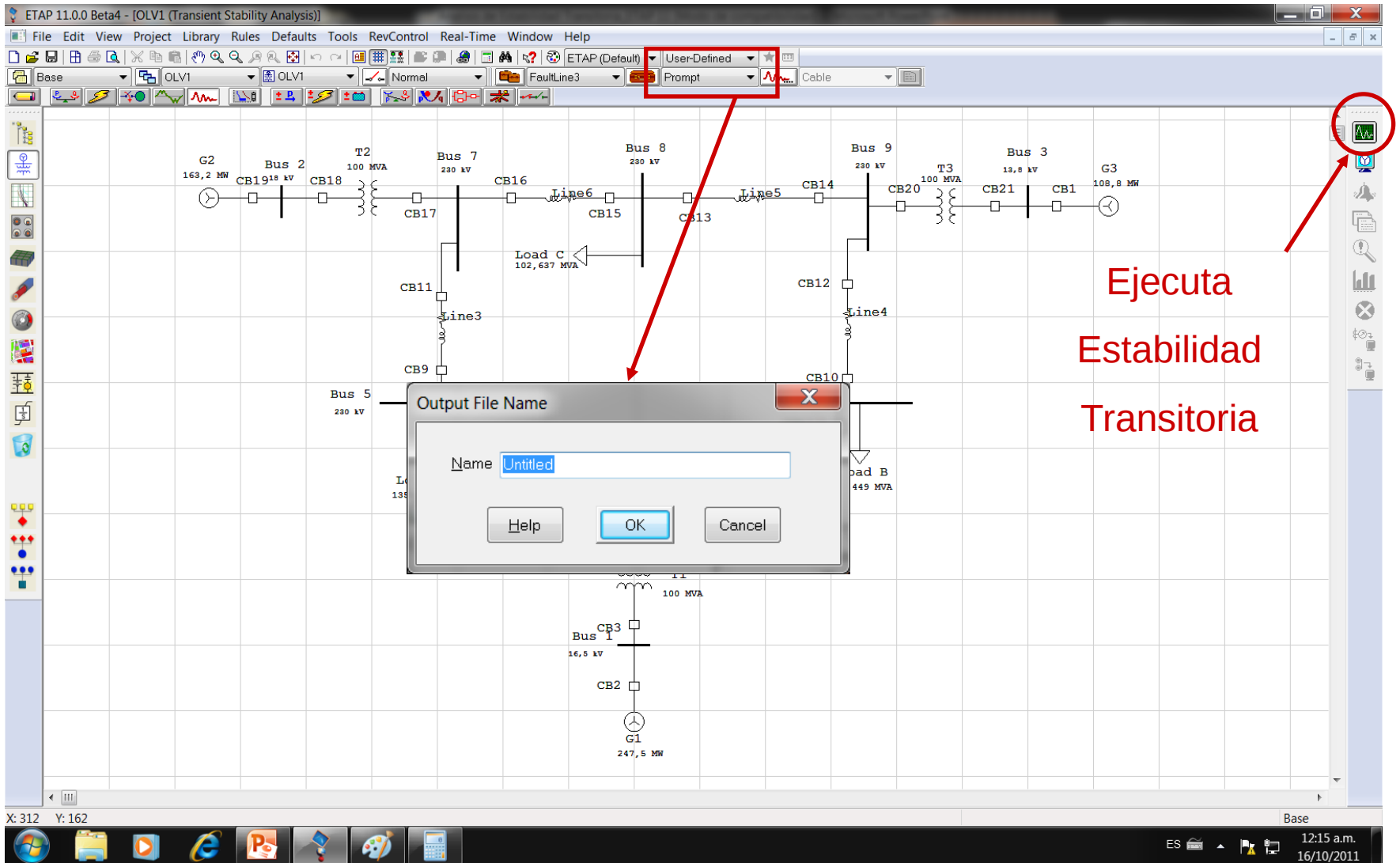
- ☒ Cable
 - ☐ Individual
 - ☒ Global %
- ☒ Transmission Line
 - ☒ Individual
 - ☐ Global

Resistance Temperature Correction

- ☒ Cable
 - ☒ Individual Max. Temperature
 - ☐ Global
- ☒ Transmission Line
 - ☒ Individual Max. Temperature
 - ☐ Global

< TRANSIENT > Help OK Cancel

Editor de estudios de ET de ETAP®11



The screenshot displays the ETAP 11.0.0 Beta4 software interface for Transient Stability Analysis. The main workspace shows a power system diagram with various components: generators (G1, G2, G3), transformers (T2, T3), buses (Bus 1, Bus 2, Bus 3, Bus 5, Bus 7, Bus 8, Bus 9), breakers (CB1 through CB21), and transmission lines (Line 3, Line 4, Line 5, Line 6). A fault is defined on Line 3. A red box highlights the 'User-Defined' dropdown menu in the top toolbar, and another red box highlights the 'Prompt' button. A red arrow points from the 'Prompt' button to the 'Output File Name' dialog box, which is open in the center of the screen. The dialog box has a 'Name' field containing 'Untitled' and buttons for 'Help', 'OK', and 'Cancel'. On the right side of the interface, a red circle highlights the 'Execute' button (a green play icon) in the toolbar. Red text to the right of the diagram reads 'Ejecuta Estabilidad Transitoria'. The bottom status bar shows the coordinates 'X: 312 Y: 162' and the system clock '12:15 a.m. 16/10/2011'.

ETAP 11.0.0 Beta4 - [OLV1 (Transient Stability Analysis)]

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

Base OLV1 OLV1 Normal FaultLine3 User-Defined Prompt Cable

Output File Name

Name Untitled

Help OK Cancel

Ejecuta Estabilidad Transitoria

X: 312 Y: 162

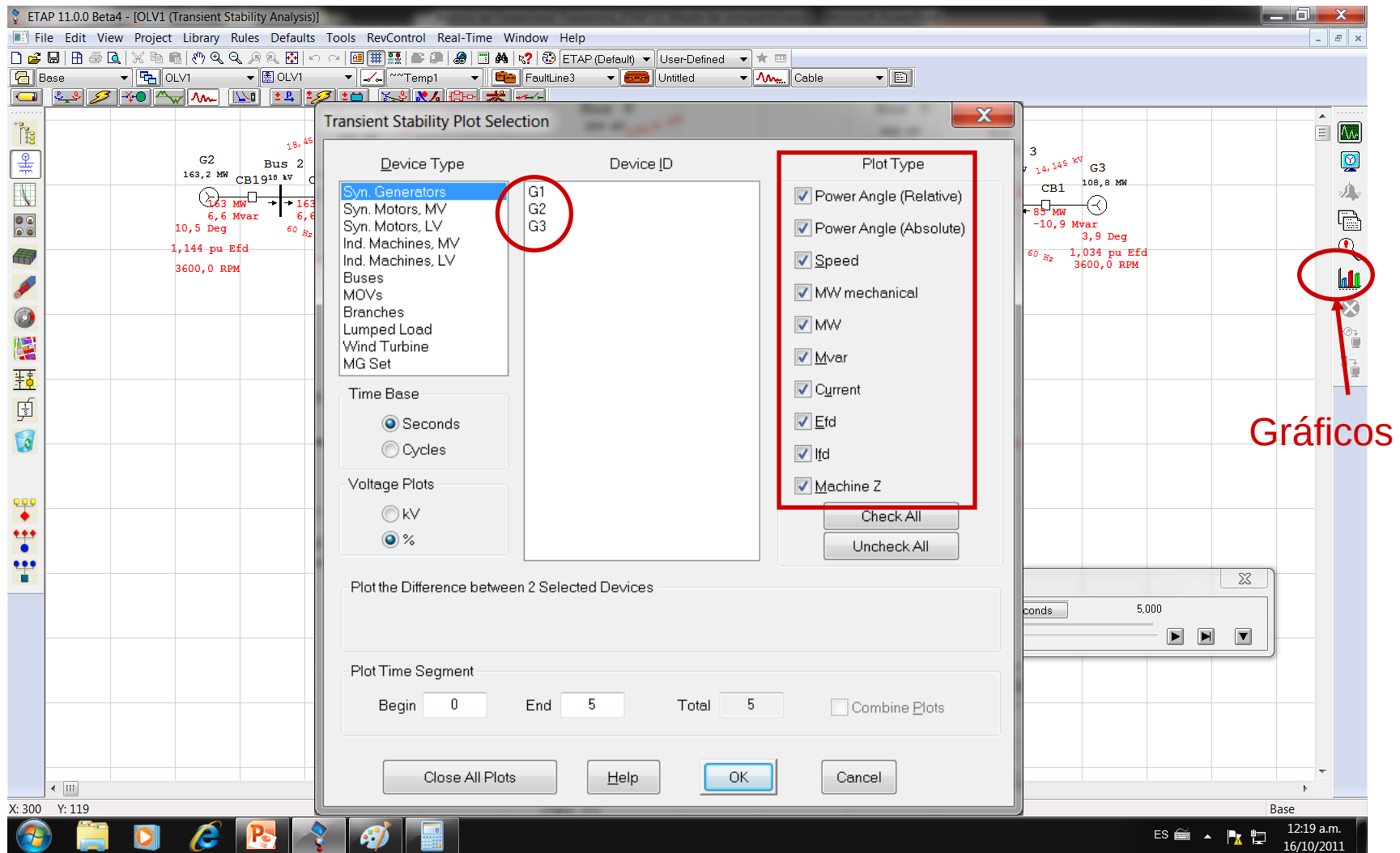
Base

12:15 a.m. 16/10/2011

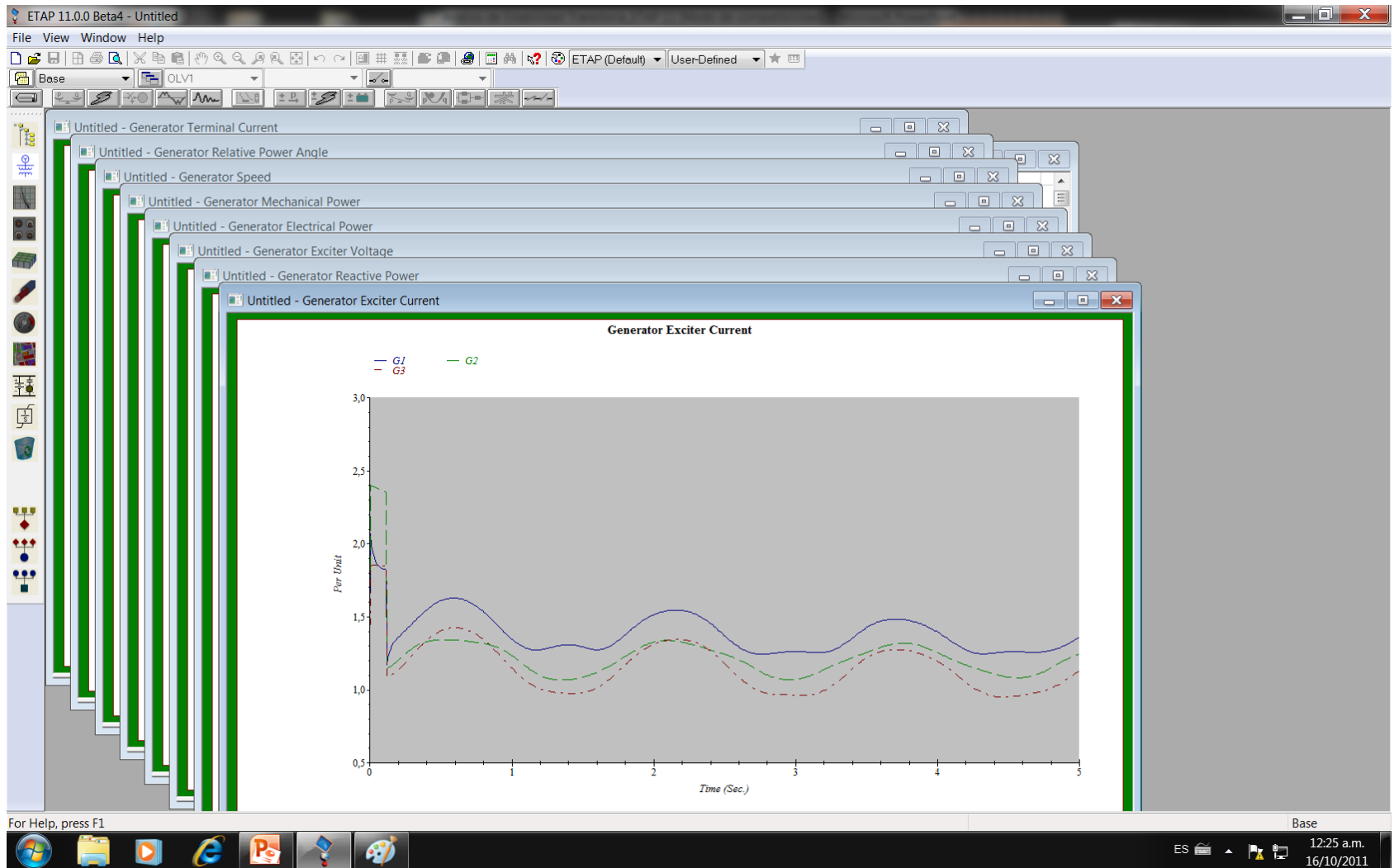
etap
Thinking Power
for Power Engineers



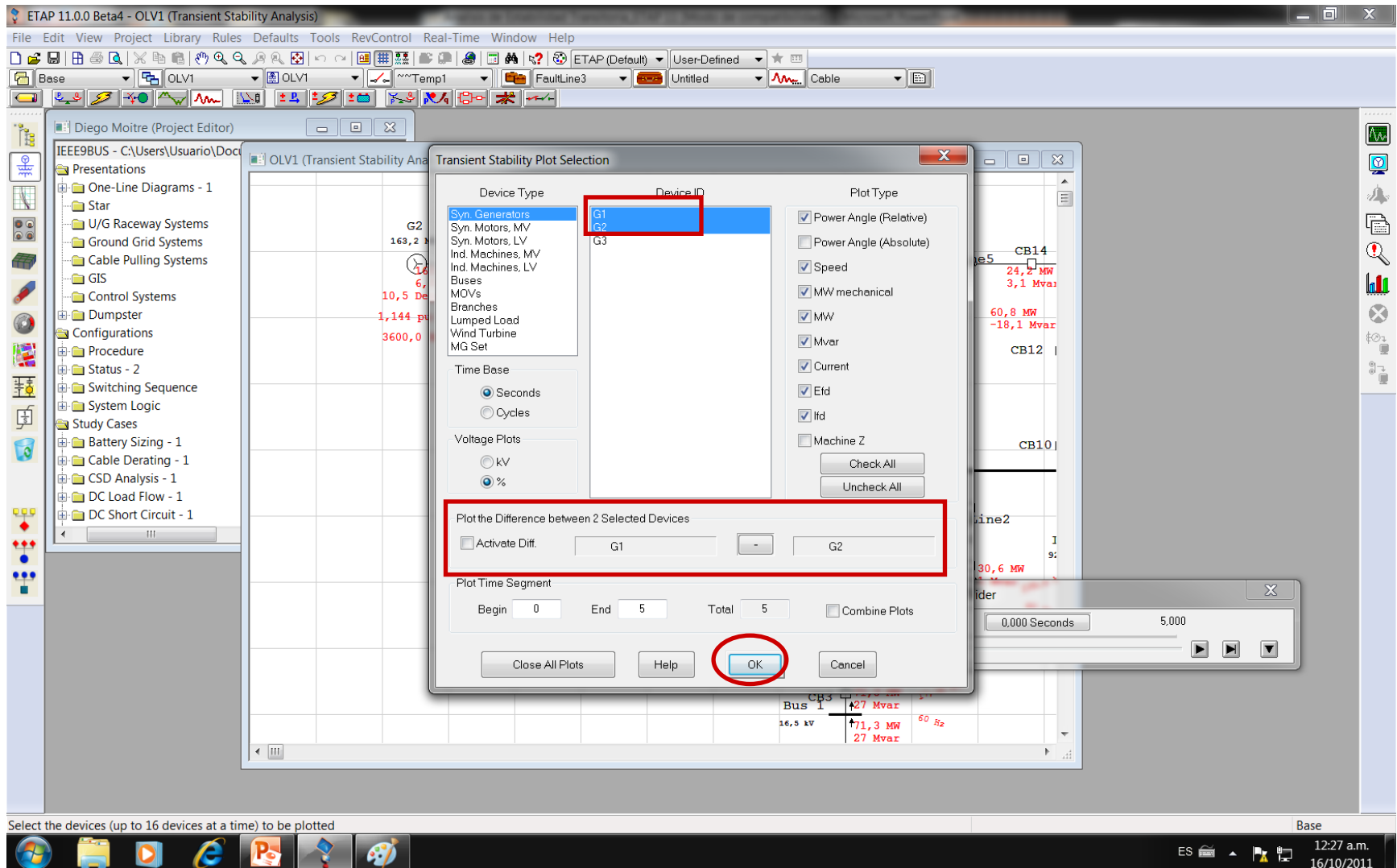
Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11



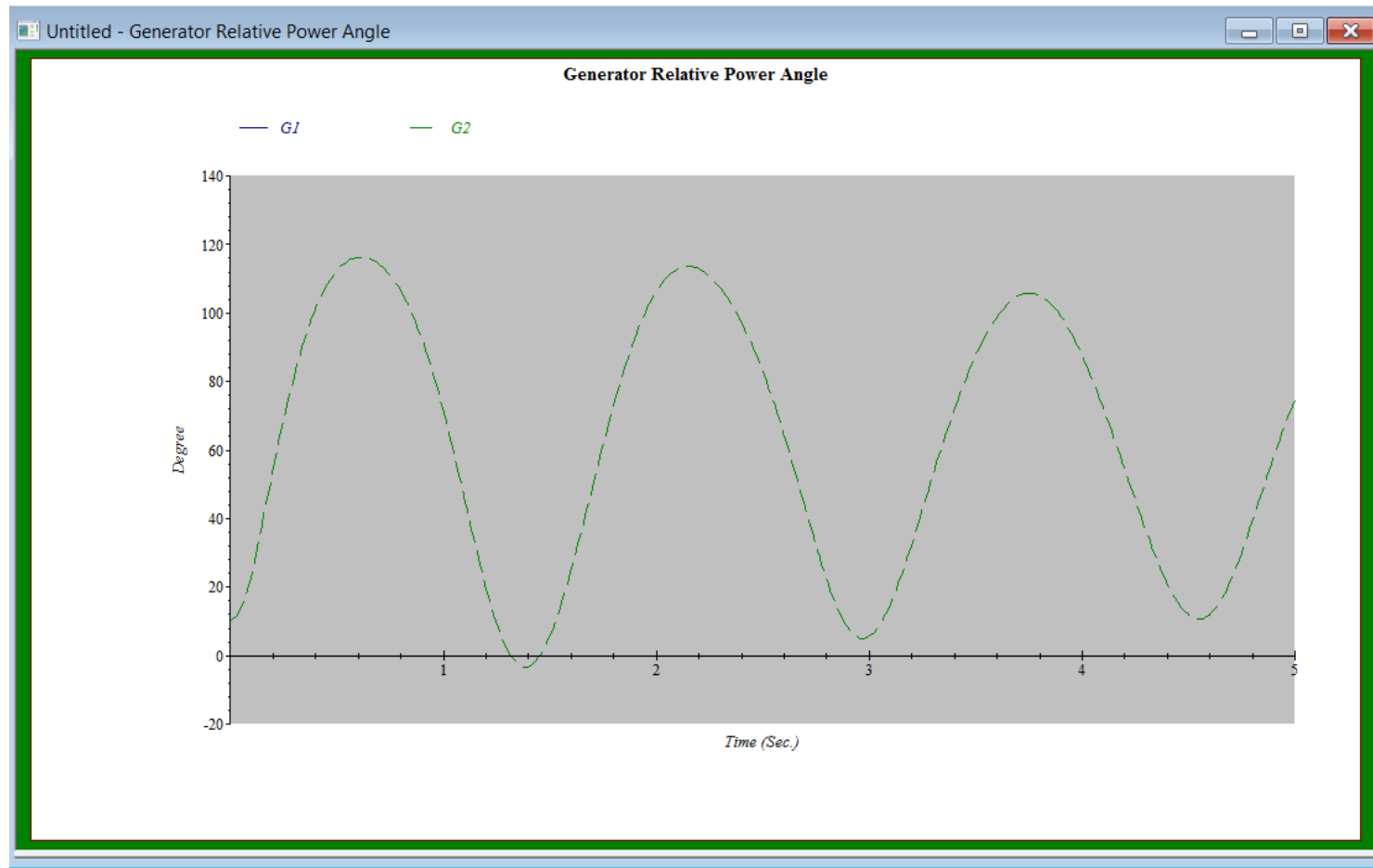
Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11



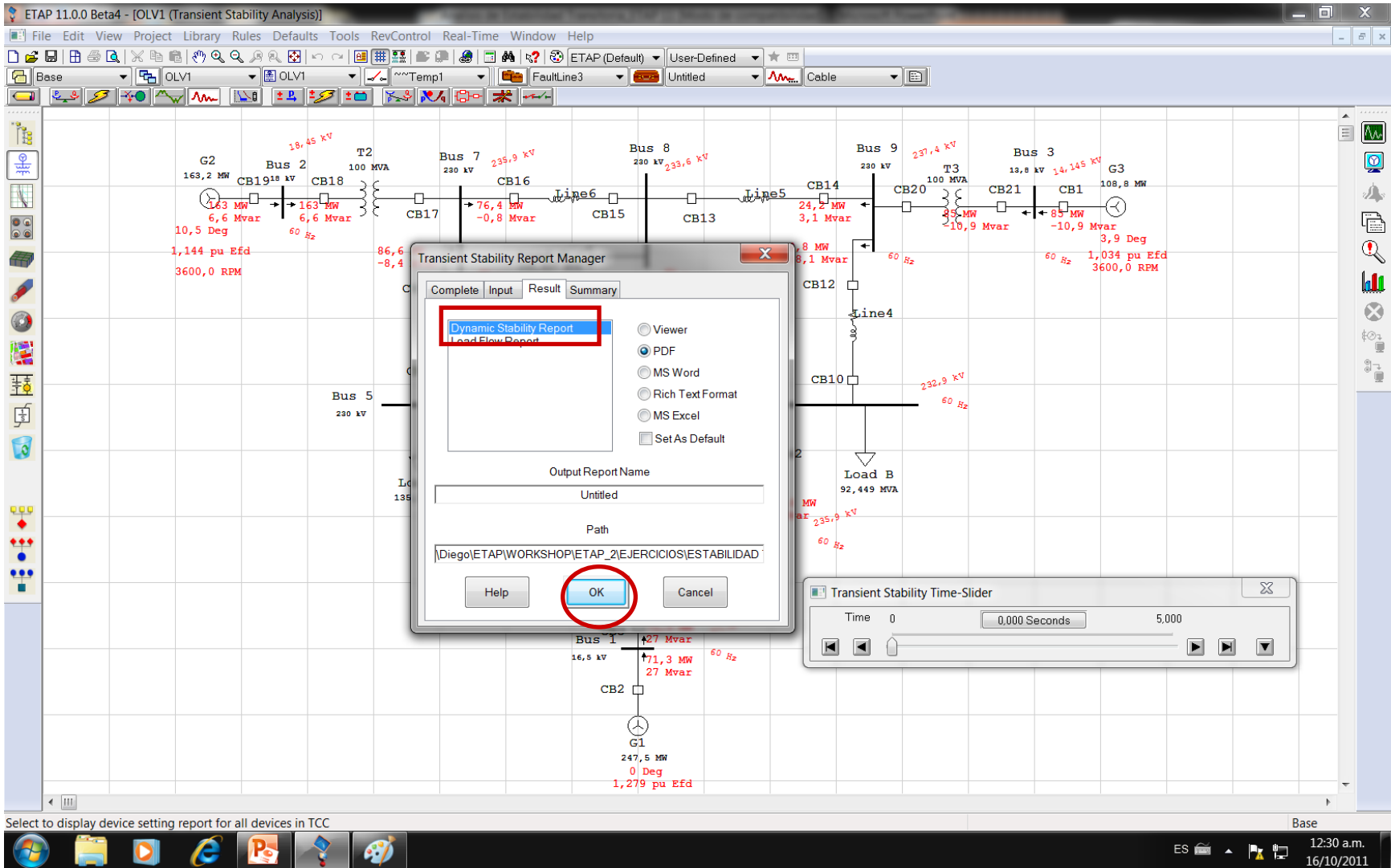
Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11



Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11



Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11



The screenshot displays the ETAP 11.0.0 Beta4 software interface. The main window shows a power system diagram with various components including generators (G1, G2, G3), transformers (T2, T3), buses (Bus 1, Bus 2, Bus 3, Bus 5, Bus 7, Bus 8, Bus 9), breakers (CB1, CB2, CB10, CB12, CB13, CB14, CB15, CB16, CB17, CB18, CB19), and loads (Load B). The diagram is overlaid with a grid. Two dialog boxes are open in the center of the screen. The first dialog box is titled "Transient Stability Report Manager" and has tabs for "Complete", "Input", "Result", and "Summary". The "Complete" tab is selected, and the "Dynamic Stability Report" option is highlighted with a red rectangle. The "Output Report Name" field is set to "Untitled", and the "Path" field is set to "D:\Diego\ETAP\WORKSHOP\ETAP_2\EJERCICIOS\ESTABILIDAD". The "OK" button is circled in red. The second dialog box is titled "Transient Stability Time-Slider" and shows a time range from 0 to 5,000 seconds, with a slider set to 0.000 seconds. The status bar at the bottom indicates "Select to display device setting report for all devices in TCC" and "Base". The taskbar at the bottom shows the Windows taskbar with various icons and the system clock displaying "12:30 a.m. 16/10/2011".

Ejemplos de aplicación utilizando ETAP®11



Project: TS V&V
Location: Lake Forest, CA
Contract: 123456789
Engineer: OTI
Filename: IEEE9BUS

ETAP

11.0.0D

Study Case: FaultLine3

Page: 1
Date: 16-10-2011
SN: RAIENDLRCL
Revision: Base
Config.: Normal

TSC-TS-126. Test generator model.

Dynamic Stability

Device ID: G1
Device Type: Syn. Gen.

Time (s)	Angle (Deg.)	Freq. (Hz)	Mech. MW	Elec. MW	Amp	Field (pu)		% Z	Time (s)	Angle (Deg.)	Freq. (Hz)	Mech. MW	Elec. MW	Amp	Field (pu)		% Z
						Efd	Ifd								Efd	Ifd	
0.000	0.00	60.00	71.558	71.340	2565.9	1.28	1.28	351,01	0.001	0.00	60.00	71.558	57.036	10586.3	1.28	2.07	62,72
0.011	0.00	60.00	71.558	53.845	10243.9	1.28	1.99	63,16	0.021	0.00	60.00	71.558	51.408	9997.2	1.28	1.94	63,49
0.031	0.00	60.01	71.558	49.492	9824.0	1.28	1.90	63,74	0.041	0.00	60.01	71.558	47.874	9701.0	1.28	1.88	63,92
0.051	0.00	60.01	71.558	46.409	9612.3	1.28	1.86	64,05	0.061	0.00	60.01	71.558	45.003	9547.2	1.28	1.85	64,14
0.071	0.00	60.02	71.558	43.593	9498.6	1.28	1.84	64,21	0.081	0.00	60.02	71.558	42.138	9461.5	1.28	1.83	64,25
0.091	0.00	60.02	71.558	40.615	9433.0	1.28	1.83	64,28	0.101	0.00	60.03	71.558	39.010	9411.0	1.28	1.82	64,28
0.111	0.00	60.03	71.558	37.315	9394.3	1.28	1.82	64,25	0.116	0.00	60.03	71.558	36.433	9387.8	1.28	1.82	64,23
0.117	0.00	60.03	71.558	51.433	2459.5	1.28	1.17	324,06	0.127	0.00	60.04	71.558	49.405	2532.3	1.28	1.22	320,22
0.137	0.00	60.04	71.558	46.225	2578.4	1.28	1.26	317,99	0.147	0.00	60.04	71.558	42.234	2609.7	1.28	1.28	316,24
0.157	0.00	60.05	71.558	37.713	2637.0	1.28	1.30	314,03	0.167	0.00	60.05	71.558	32.861	2668.4	1.28	1.32	310,70
0.177	0.00	60.06	71.558	27.822	2709.4	1.28	1.33	305,86	0.187	0.00	60.06	71.558	22.700	2763.4	1.28	1.35	299,39
0.197	0.00	60.07	71.558	17.569	2832.1	1.28	1.36	291,38	0.207	0.00	60.08	71.558	12.483	2916.2	1.28	1.37	282,07
0.217	0.00	60.08	71.558	7.482	3014.9	1.28	1.38	271,80	0.227	0.00	60.09	71.558	2.597	3127.3	1.28	1.39	260,94