

Generadores Síncronos en Régimen Transitorio

• Introducción .

El análisis transitorio de las máquinas síncronas se ocupa de la determinación de los flujos y corrientes transitorias y de su influencia en el comportamiento eléctrico.

Durante condiciones transitorias, varias son las perturbaciones que pueden hacer cambiar de magnitud y desplazamiento angular a las ondas de flujo cuando el rotor se aparta de la velocidad síncrona.

Las corrientes Transitorias que aparecen en las bobinas del estator y del rotor como resultado de las bobinas inductivas de la máquina tienden a oponerse en los enlaces de flujo.

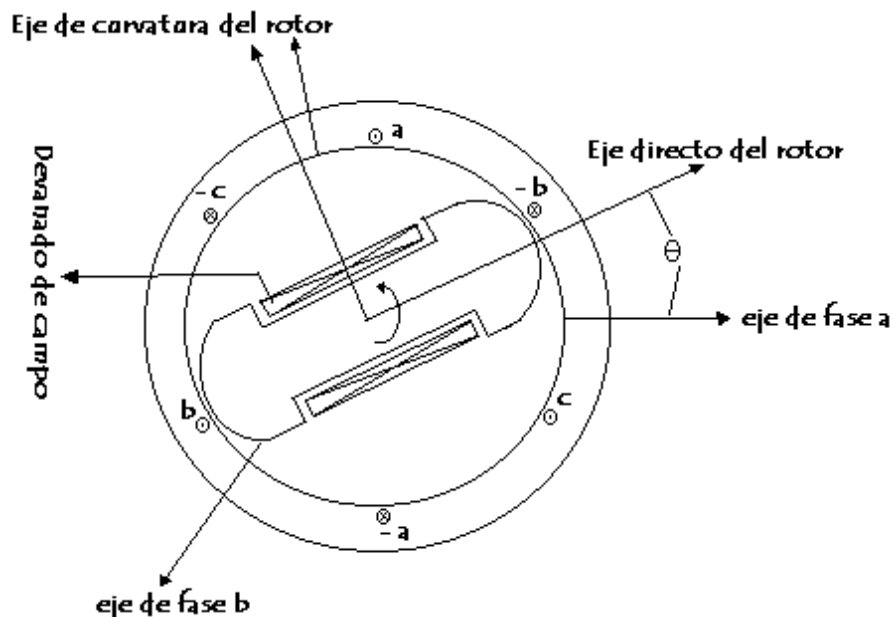
El estado transitorio es un estado casi instantáneo que ocurre por ejemplo en casos de fallas o de desconexiones súbitas de carga en el cual ocurren cambios instantáneos en las condiciones de operación.

En éstas condiciones los parámetros aprendidos y determinados en laboratorio se hacen insuficientes para representar el comportamiento transitorio de la máquina.

Es necesario introducir nuevos conceptos y nuevos parámetros, que en el desarrollo del trabajo se darán a conocer.

• Estado Transitorio.

Antes de iniciar el estudio del comportamiento en régimen transitorio, conviene recordar algunos aspectos constructivos esenciales de la máquina.



Máquina Síncrona Idealizada

El estator contiene los *devanados de fase* (a,b,c), el *inductor* ilustrado (polos salientes) normalmente tiene dos bobinas: el *bobinado de campo*, a ser alimentado por una fuente de corriente continua (excitatriz) y el

bobinado de amortiguación, constituido por conjuntos de barras conductoras, alojadas en ranuras situadas en las zapatas polares, las barras están interconectadas como aquellas en los rotores de inducción y tienen como objetivo amortiguar las oscilaciones del rotor relativas al campo girante del inducido.

Cada uno de los bobinados tienen resistencias e inductancias propias, inductancias mutuas entre cada uno de los diversos pares de bobinados existentes.

Frecuentemente, el núcleo del inductor es macizo, pudiendo comportarse semejante a un arrollamiento cerrado. Las inductancias mutuas, entre las fases del inducido y los arrollamientos del rotor, varían con la rotación. Las inductancias propias de los bobinados del rotor pueden ser considerados independientes de la rotación.

Las inductancias mutuas, entre las fases del inducido y los arrollamientos del rotor, varían alternativamente con la rotación. En el caso de las máquinas de polos salientes las reluctancias de los circuitos magnéticos, son sensiblemente diferentes según los ejes directos y en cuadratura.

• Desarrollo de las Ecuaciones generales de la Máquina._

Frente a las dificultades resultantes de la multiplicidad de circuitos magnéticamente acoplados, el análisis del comportamiento transitorio de la máquina síncrona se efectuará aceptando algunas hipótesis simplificadas, inclusive lo relacionado a la saturación.

Escribir las ecuaciones para el comportamiento transitorio de la máquina nos conduce a sistemas de ecuaciones diferenciales simultáneas, cuya solución no es simple.

Para reducir las dificultades inherentes al problema se reducen éstas aplicando el método de las transformaciones $dq0$ o transformación de Park o de Blondel. En la cual las corrientes, voltajes y flujos del estator se sustituyen por cantidades equivalentes que giran a la velocidad del rotor.

Frente a las dificultades resultantes de la multiplicidad de circuitos magnéticamente acoplados, el análisis del comportamiento transitorio de la máquina síncrona se efectuará aceptando algunas hipótesis simplificativas, inclusive lo relacionado a la saturación.

• Transformación a Variables de Ejes Directo y de Cuadratura._

El concepto consiste en descomponer cantidades giratorias de armadura, en dos componentes giratorias, una alineada con el eje del devanado de campo, que es la componente de eje directo y una en cuadratura con eje de campo, que es la componente de eje de cuadratura.

La idea que subyace a la transformación ya es antigua y procede del trabajo de André Blondel, en Francia; a veces se le llama a la técnica el Método de Blondel de dos reacciones.

La transformación misma que se conoce como transformación **$dq0$** , se puede representar en forma directa en términos del ángulo entre el eje directo del rotor y el eje de la fase del estator.

Si S representa la cantidad del estator que se va a transformar (corriente, voltaje ó flujo), se puede escribir la transformación en forma matricial como sigue:

y la transformación inversa en la forma:

En donde la letra S se refiere a la cantidad que se va a transformar y los subíndices d y q representan respectivamente a los ejes directo y de cuadratura. Una tercera componente, la componente de *secuencia cero*,

identificada con el subíndice 0, también aparece. Esta se necesita para dar una transformación única a las tres cantidades de fase del estator; corresponde a las componentes de la corriente de armadura que no producen flujo neto en entrehierro y por lo tanto no producen flujo neto enlazado a los circuitos del rotor.

• Relaciones Básicas de la máquina en Variables $dq0$. _

Esta sencilla máquina es suficiente para demostrar las propiedades básicas de la representación de la máquina en $dq0$; se pueden introducir los efectos de otros circuitos del rotor en forma directa.

Se tiene las relaciones flujo–corriente en términos de las variables de fase

en la cual se han agregado los signos negativos en consistencia con una selección de la referencia del generador para las corrientes de armadura.

Para los fines de éste análisis se supone que la máquina síncrona idealizada satisface dos condiciones:

- Que la permanencia del entrehierro tiene una permanencia constante, al mismo tiempo que una componente menor que varía cosenoidalmente con respecto al ángulo del rotor, medido desde el eje directo.
- Que se pueden ignorar los efectos de las armónicas espaciales sobre el flujo de entrehierro.
- **Análisis de un Corto Circuito Trifásico Repentino.** _

La condición transitoria más severa que puede ocurrir en un generador síncrono es la situación en que repentinamente los tres terminales son puestos en corto. En un sistema de Potencia dicho corto se denomina *falla*. Hay varios componentes de corriente presentes en un generador síncrono en corto.

Los mismos efectos se presentan para condiciones transitorias menos severas, como cambios de cargas, pero ellos son mucho más obvios en el caso extremo de un corto circuito.

Cuando ocurre una falla en un generador síncrono, el flujo de corriente resultante en sus fases para aparecer, la corriente en cada fase, según se observa puede representarse como una componente transitoria de cc, añadida sobre una componente de ca simétrica.

Para demostrar la aplicación de la transformación $dq0$ así como para empezar a desarrollar la comprensión del comportamiento transitorio de las máquinas síncronas, es útil analizar el transitorio que sigue a un corto circuito trifásico repentino en las terminales de la armadura.

• Reactancias de Corto Circuito. _

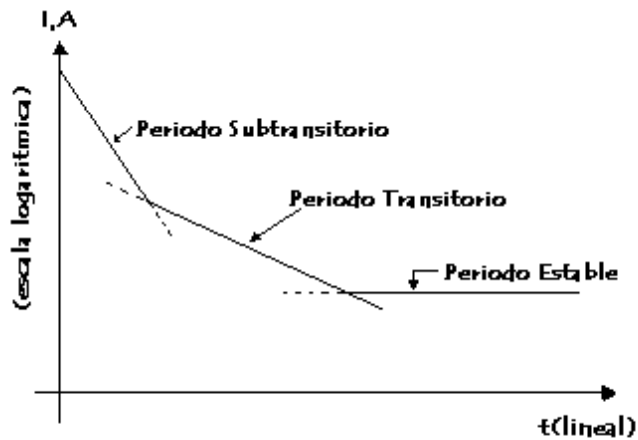
Se acostumbra definir las reactancias subtransitorias y transitorias de un generador síncrono, para describir cómodamente las componentes subtransitorias y transitorias de la corriente de falla.

La reactancia subtransitoria de un generador síncrono se define como la relación entre la componente fundamental de la tensión generada internamente y la componente subtransitoria de la corriente al comienzo de la falla. Se expresa por:

Subtransitoria

En forma similar, la reactancia transitoria de un generador síncrono se define como la relación de la componente fundamental de EA con la componente de la corriente I' al comienzo de la falla.

Transitoria



• Descripción Física del Transitorio._

Al principio la máquina no tiene carga, la única corriente previa a la perturbación que pasa por la máquina es la corriente de campo.

Con anterioridad a la falla, solamente voltajes y corrientes de ca estaban presentes dentro del generador.

En el momento del corto circuito trifásico, pasan ahora las corrientes en los devanados de la armadura de tal manera que mantienen el encadenamiento de flujo en el devanado de armadura en el valor que tenía cuando se presentó la falla.

Hay dos componentes de éstas corrientes:

- **AC** que corresponde a la corriente de armadura necesaria para oponerse a un flujo variable en el tiempo que se produce en el devanado de campo cuando gira.
- **CC** que corresponde al encadenamiento inicial de flujo que existía cuando se presentó la falla.

Cuando se presenta la falla, la componente de corriente alterna salta a un valor muy alto, pero toda la corriente no puede cambiar en un instante. La componente de cc es suficientemente grande, como para que la suma de las componentes ca y cc sea igual a la corriente alterna que circula inmediatamente antes de la falla.

Las componentes cc decaen rápidamente (inicialmente promedian 50% a 60% del flujo ca)

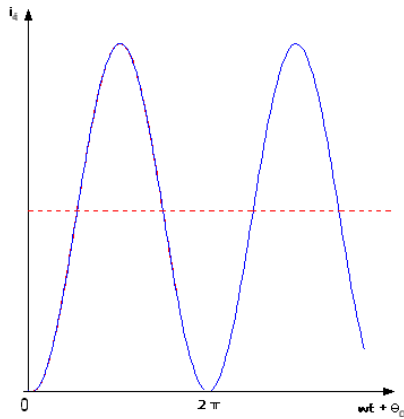
Después del periodo transitorio, la corriente de falla alcanza la condición de estado estable; se representa por el símbolo ISS y su magnitud aproximada se calcula dividiendo la componente de frecuencia fundamental del voltaje generado internamente por su reactancia sincrónica.

Estado Estable

• Omisión de las resistencias de devanado._

Es un análisis basado en la suposición de que las resistencias de la armadura y del campo son infinitamente pequeñas.

Las ecuaciones principales luego de la correspondiente deducción son:



Las componentes de cc de la corriente de armadura y de campo no decaen con el tiempo.

Debido a que se omitieron las resistencias del campo y de la armadura, ninguno de los términos en las ecuaciones anteriores, decae con el tiempo, en realidad se tienen decaimientos exponenciales como en cualquier circuito inductivo cuando hay resistencia. Aparecen corrientes de fase con sus componentes de CC desde un cortocircuito.

• Omisión de Resistencias y Voltajes de Transformador._

Cuando se omiten los términos p_d y p_q de las anteriores ecuaciones, se obtienen ecuaciones más sencillas de corriente:

La ventaja de resolver de ésta manera es que las ecuaciones son más simples.

• Inclusión de Resistencias de Campo y Omisión de Voltajes de Transformador._

Se analizará el decaimiento de las corrientes i_d y i_f , utilizando la combinación de los de los dos métodos anteriores, de nuevo $i_q = 0$.

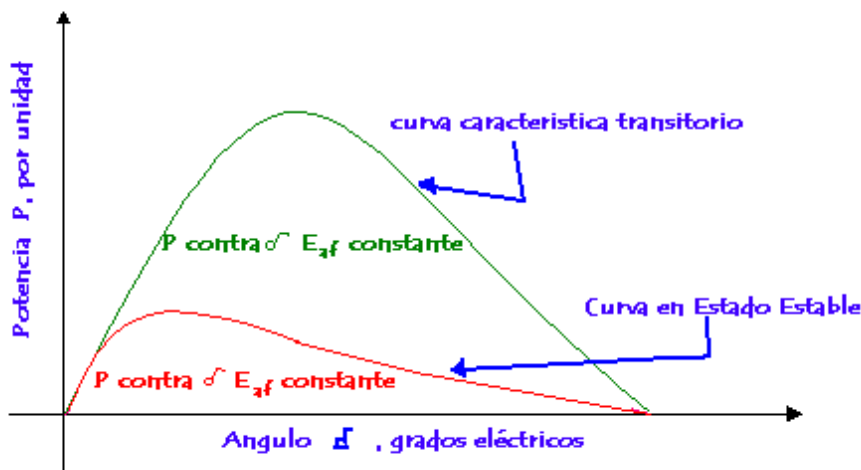
• Características Transitorias de Potencia–Angulo._

La curva Potencia–Angulo en el transitorio tendrá una amplitud bastante mayor que la de la curva en estado estable.

En la figura se muestran las amplitudes relativas para un caso determinado.

La consecuencia práctica es que la máquina es un elemento más rígido en el transitorio, puede reducir una sobrecarga grande aplicada en forma repentina, de potencia o par si la duración es relativamente corta.

La validez de éste modelo es muy limitada debido a las aproximaciones sobre las que se basa, incluyendo la suposición de que la saliencia transitoria es despreciable y la correspondiente suposición de que las constantes de tiempo asociadas con las del decaimiento de flujo transitorio tienen magnitudes semejantes en ambos ejes.



• Efectos de Circuitos Adicionales del Rotor._

En la mayoría de las máquinas síncronas hay varias trayectorias alternativas en el rotor por las cuales pueden pasar las corrientes inducidas.

Se ha considerado que el único elemento portador de corriente del rotor es el devanado de campo en el eje directo.

En las máquinas de polos salientes con construcción del rotor con laminaciones, en el cual no se permite que pase la corriente por el cuerpo del rotor, estas trayectorias adicionales se forman mediante devanados de barras o de jaula embebidos en la caras polares y conectados en sus extremos mediante anillos de cortocircuito. Se llaman en general *circuitos amortiguadores*.

En las máquinas de rotor cilíndrico que se forman con forjas de acero sólido, se pueden inducir corrientes transitorias en el cuerpo del rotor sólido. Aunque las trayectorias de las corrientes no están tan definidas como en los circuitos amortiguadores de las máquinas de polos salientes, sus efectos son bastante semejantes y se pueden representar de un modo similar. De hecho, las corrientes inducidas en las máquinas de rotor cilíndrico se llaman *corrientes amortiguadoras*.

En este párrafo se describe en forma cualitativa los efectos de las corrientes inducidas del rotor, en máquinas de rotor cilíndrico y con rotor de polos salientes.

• Efectos sobre la Relaciones Corriente-Voltaje._

Principio de encadenamiento de flujo constante a éstos casos con la siguiente modificación:

Los encadenamientos de flujo de cualquier trayectoria de conducción con resistencia finita no puede cambiar instantáneamente.

• Valores Típicos de Constantes de Máquina. _

Generadores Motores en Polos Salientes					
Const de Máquina	Rotor Sólido	Polo Saliente	Conden. Sincrónico	Baja Velocidad	Alta Velocidad
X_d	1.9	1.7	2.2	1.5	1.4

X'd	0.25	0.30	0.50	0.40	0.35
Xd	0.20	0.18	0.30	0.25	0.20
Xq	1.55	1.0	1.3	1.0	1.0
X'q	0.50	1.0	1.3	1.0	1.0
Xq	0.20	0.25	0.35	0.30	0.25
T'd	0.55	0.50	1.5	0.35	0.50
Td	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01
T0	0.17	0.05	0.25	0.04	0.04

• Efectos sobre Potencia y Par . _

Un análisis detallado de la dinámica de la máquina síncrona debe incluir los efectos de los paras tanto síncronos como asíncronos.

Los pares producen amortiguamiento porque actúan para desacelerar el rotor cuando la velocidad de éste es mayor que la síncrona y para acelerarlo cuando su velocidad sea menor que la síncrona.

• Modelos de Máquinas Síncronas para Análisis Transitorio._

De acuerdo con el tipo de análisis y la capacidad del programa que se utilice, se puede usar varias representaciones para el comportamiento transitorio en las máquinas síncronas.

• Dinámica de Máquinas Síncronas._

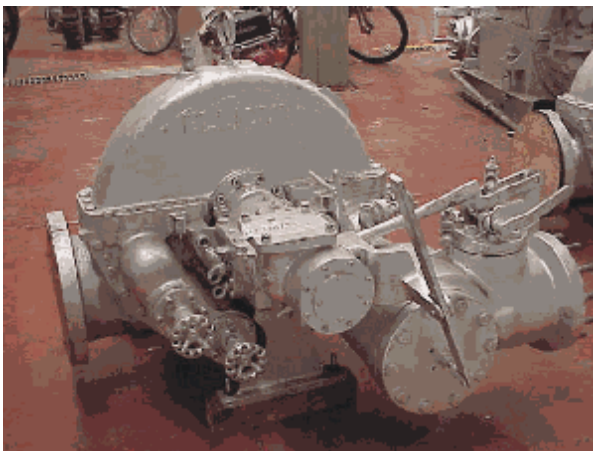
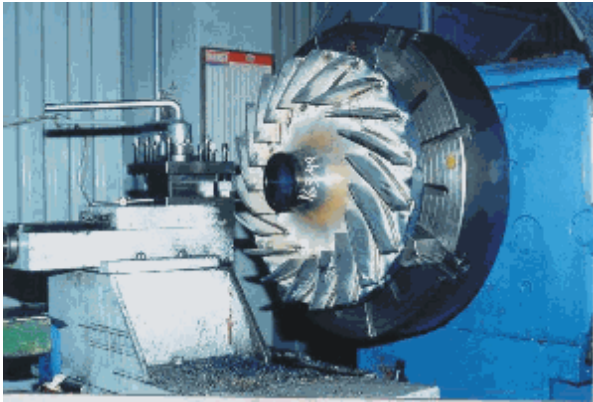
Se representan problemas dinámicos importantes en los sistemas de máquinas síncronas debido a que:

- El buen funcionamiento de la máquina requiere igualdad de la velocidad mecánica del rotor y la velocidad de campo del estator.
- Las fuerzas de sincronización que tienden a mantener a esta igualdad entran en juego y siempre se perturba la relación.

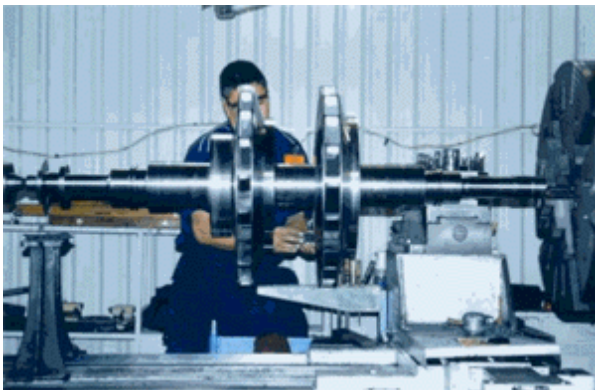
• Anexos._

Se anexan aquí fotos de centrales de diferentes partes del mundo, turbinas, la toma, diques, etc.









• **Bibliografía._**

Máquinas Eléctricas A.E. Fitzgerald

Máquinas Eléctricas Stephen J. Chapman

Máquinas Síncronas Texto Base de la materia

