

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Curso de posgrado intensivo  
Programa de Maestría y Doctorado en  
Ingeniería Eléctrica**

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE  
SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Coordinación:  
**DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO**

Responsabilidad académica y ejecución:  
**INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Programa Sintético**

- MODULO I:** Flujo de Potencia. Introducción al estudio de SSEE. Requerimientos. Modelación de componentes activos y pasivos. Cálculo no lineal. Flujo de Potencia rápido desacoplado. Utilización de resultados Análisis de Contingencias.
- MODULO II:** Análisis de Fallas en SSEE. Cálculos de fallas simétricas. Cálculo de fallas asimétricas particulares. Modo de operación de redes. Tratamiento de centro de estrella. Sistematización del cálculo de fallas.
- MODULO III:** Estabilidad en sistemas de transmisión. Introducción: Problemas de dinámica de redes. Conceptos básicos sobre el funcionamiento de la máquina sincrónica. Estabilidad estática y transitoria en sistemas eléctricos multimáquina.
- APLICACIONES DE TR:** Aplicaciones EMS (Energy Management System). Configuración, Estimador de Estado, Flujo de Carga, Análisis de Contingencia, Análisis de Cortocircuito. SCADA, Interface Hombre-Máquina. Base de Datos Estática y de Tiempo Real de Aplicaciones EMS.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**INSTITUTO DE ENERGIA ELECTRICA**

**Curso de Posgrado**

**Programa Analítico**

**MODULO I: FLUJO DE POTENCIA**

**1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA**

Tareas requeridas a los sistemas de energía eléctrica. Requerimientos principales. Esquema de sistemas de suministro de energía eléctrica.

Cálculo de estados estacionarios en redes eléctricas.

- Presentación del problema. Clasificación de problemas específicos: Cálculo de flujos de carga. Cálculo de cortocircuitos. Estimación del flujo de carga. Despacho óptimo de cargas.
- Descripción de la configuración de la red. Simplificaciones. Conceptos de la teoría de grafos. Descripción matricial.
- Descripción de las fuentes de alimentación y de las cargas.

**2. CÁLCULO DE FLUJOS DE POTENCIA**

Cálculo lineal de flujos de carga.

- Definición del problema.
- Derivación de las ecuaciones generales del sistema: El método de las mallas. El método de los conjuntos de corte. El método de los nodos.
- Utilización en redes eléctricas de suministro de energía.
- Métodos de solución:
  - Método de Gauss-Seidel.
  - Método de eliminación de Gauss

Cálculo no lineal de flujos de carga.

- Definición del problema
- Métodos de solución:
  - Método de Gauss-Seidel.
  - Método iterativo de la matriz triangular de admitancias. (Eliminación de Gauss iterativo)
  - Método de Newton-Raphson completo. Formulación cartesiana
  - Métodos de optimización para el cálculo de flujos de carga.

Utilización de flujos de potencia en la planificación y operación de sistemas eléctricos.

- Aplicación en la planificación de sistemas eléctricos.
- Aplicación en la operación de sistemas eléctricos. Cálculos de seguridad. Análisis de contingencias. Estimación del flujo de carga (Estimación de estado)

Cálculo no lineal de flujos de carga.

- Método de Newton-Raphson completo. Formulación polar.
- Métodos de Newton-Raphson simplificados.
  - Flujo de carga desacoplado.
  - Flujo de carga desacoplado rápido.
  - Flujo de carga de potencia activa.

Modelación de componentes de la red para el cálculo de flujos de carga

- Modelación de líneas y cables.
- Modelación de transformadores.
- Modelación de compensadores.
- Modelación de la generación y de la carga.
- Tratamiento de transformadores trifásicos regulables

### **3. ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS**

Evaluación de la seguridad de sistemas de suministro de energía eléctrica

Aplicaciones fuera de línea en relación con estudios de programación de la operación y aplicación a la expansión de redes eléctricas

Formulaciones del Análisis de Contingencias

- Elección del algoritmo para el cálculo de flujo de cargas
- Flujo rápido lineal iterativo (FRLI): Nomenclatura. Deducción del algoritmo: Modelo de potencia activa. Modelo de potencia reactiva. Simulación de salida de ramas. Descripción del programa de cálculo: Armado y factorización de matrices. Esquema iterativo.
- Flujo de carga desacoplado rápido (FRD): Nomenclatura. Deducción del algoritmo. Simulación de salida de ramas. Descripción del programa de cálculo: Armado y factorización de matrices. Esquema iterativo.
- Simulación de contingencias en generadores
- Selección de contingencias críticas: Esquema general del proceso de selección de contingencias. Importancia de los métodos de ranking. Esquema del algoritmo de selección de contingencias. Cálculo de la matriz inversa rara. Método de compensación basado en el método de Newton. Métodos de cálculo de los índices de severidad.

### **4. CONTROL DE TENSIÓN — POTENCIA REACTIVA**

El Problema de la potencia reactiva en sistemas eléctricos

Ventajas de un buen tratamiento de la potencia reactiva

Relación entre la tensión y la potencia reactiva

Control de tensión-Potencia reactiva en sistemas de transmisión

### **5. BIBLIOGRAFÍA.**

- a) Kurt W. Edwin: Apuntes Seminario "Digitale Netzberechnung". RWTH Aachen 1985.
- b) Kurt W. Edwin: Apuntes Seminario "Elektrische Anlage II". RWTH Aachen 1985.
- c) Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg. "Power Generation, Operation, and Control". John Wiley & Sons, Inc -1996. ISBN: 0-471-58699-4.
- d) A. Gómez Expósito. "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica". Mc Graw Hill-2002. ISBN: 94-481-3592-X.
- e) J. Grainger, W Stevenson. "Análisis de Sistemas de Potencia". Mc Graw Hill-1996. ISBN: 0-07-061293-5.

## **MODULO II: ANÁLISIS DE FALLAS SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS.**

### **1. FALLAS EN INSTALACIONES Y SISTEMAS ELECTRICOS**

Causas e implicancias de las fallas en sistemas eléctricos.  
Solicitud eléctrica  
Solicitud Mecánica  
Manipulación errónea del hombre.

### **2. PRESENTACION DEL PROBLEMA.**

Tipos de cortocircuito.

### **3. CORTOCIRCUITO SIMETRICO (TRIPOLAR).**

Cortocircuito tripolar en las redes de tensión rígida.  
Cortocircuito tripolar en bornes del generador.  
Circuito equivalente de un generador en cortocircuito.  
Determinación de la corriente cortocircuito de choque  $I_S$  y de la corriente de interrupción  $I_a$ .  
Determinación de la corriente de cortocircuito permanente.  
El cortocircuito tripolar de máquinas asincrónicas.

### **4. MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LAS CORRIENTES INICIALES DE CORTOCIRCUITO.**

Método que considera el estado de carga del sistema  
Método que no considera el estado de carga del sistema (simplificado)  
Conclusiones

### **5. CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO EN REDES CON ALIMENTACIÓN MÚLTIPLE Y REDES MALLADAS.**

### **6. PLANIFICACIÓN DE INSTALACIONES RESISTENTES AL CORTOCIRCUITO.**

Leyes estadísticas de crecimiento de la potencia de cortocircuito en redes.  
Potencia de cortocircuito y economía en las instalaciones eléctricas.  
Posibilidades para limitar los efectos producidos por las corrientes de cortocircuito.  
Medidas constructivas.

### **7. CALCULO DE FALLAS ASIMÉTRICAS**

Fundamentos del cálculo del método de los componentes simétricos en sistemas alternos trifásicos.  
Formulación de los circuitos equivalentes de componentes de una red que satisface las condiciones de simetría cíclica.  
Cuadripolo activo lineal alterno trifásico  
La potencia expresada en función de las componentes simétricas.  
Procedimientos para determinar las impedancias de secuencia.  
Impedancia de secuencia de componentes de sistemas de energía eléctrica.  
Líneas y transformadores.  
Circuitos equivalentes de componentes de líneas.  
Circuito equivalente en componentes simétricos de transformadores.

## **8. MODOS DE OPERACIÓN DE REDES.**

Región de red.

Tratamiento del centro de estrella.

Cifra de puesta a tierra.

Formas del tratamiento del centro de estrella.

Cálculo de cortocircuito asimétrico.

Cálculo del cortocircuito bipolar aislado

Cálculo de cortocircuito bipolar con contacto a tierra

Cortocircuito unipolar con contacto a tierra.

Cálculo simplificado del contacto a tierra.

Puesta a tierra rígida (directa) del centro de estrella.

Centro de estrella aislado de la región de red.

Puesta a tierra inductiva (resonante) del centro de estrella.

Aspectos particulares de la operación en condiciones normales de redes con centro de estrella vinculado a tierra inductivamente (resonante). Efecto de la asimetría de las capacidades y de las conductancias a tierra.

Puesta a tierra de baja impedancia.

Cálculo de cortocircuito doble a tierra.

## **9. SISTEMATIZACION DEL CALCULO DE FALLAS EN SSEE.**

Cálculo digital de fallas simétricas en SSEE.

Interpretación del significado de los elementos de la matriz de impedancia de barra.

Cálculo de la  $I_a$  (corriente de apertura) e  $I_s$  (corriente de choque).

Cálculo digital de fallas asimétricas en SSEE

Modelo circuital para llevar a cabo el estudio.

Circuitos de secuencia

Análisis del contacto unipolar a tierra.

## **10. BIBLIOGRAFÍA.**

a) Vargas, A.: Publicaciones y Material de apoyo de Investigación y docencia. Apuntes del mismo curso dictado en 2012 y anteriores.

b) Stagg - El Abiad: "Computer Methods in Power Systems Analysis". Mc Graw Hill, 1968.

c) Richard Roeper: "Short Circuit Currents in Three phases Systems". Siemens. Jhon Wiley and Sons. Second edition 1985.

d) Kurt W. Edwin: Apuntes Seminario "Elektrische Anlage II". RWTH Aachen 1985.

## **MODULO III: ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA**

### **1. ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA**

Conceptos básicos y definiciones. Ordenamiento de los fenómenos transitorios: Electromagnéticos, electromagnéticos-mecánicos y electromecánicos. Estabilidad de ángulo del rotor: Estabilidad de estado estacionario y Estabilidad transitoria. Estabilidad de tensión. Estabilidad de frecuencia.

## 2. GENERADOR SINCRÓNICO

Descripción y comportamiento operativo de la máquina sincrónica. Campos magnéticos presentes. Ángulo de carga. Constante de inercia y tiempo de arranque mecánico. Ecuación diferencial de movimiento. Teorema de la constancia de los enlaces de flujo magnético. Cortocircuito en bornes del generador sincrónico y su influencia sobre las corrientes del estator y del rotor. Reactancias de eje directo y de eje en cuadratura del generador sincrónico: sincrónicas  $(x_d, x_q)$ , transitorias  $(x'_d, x'_q)$  y subtransitorias  $(x''_d, x''_q)$ . Reactancia de secuencia cero  $(x_0)$  y reactancia de secuencia inversa  $(x_2)$ . Diagrama fasorial del generador sincrónico. Expresiones para el cálculo de las potencias activas y reactivas entregadas a la red por el generador sincrónico. Expresiones para calcular el módulo y el ángulo de fase de la tensión de la rueda polar. Cálculos necesarios para la construcción del diagrama fasorial de la máquina sincrónica de polos salientes para estados de carga inductiva y capacitiva a partir de los parámetros  $(x_d, x_q)$  y de los valores de potencia trifásica activa y reactiva y del módulo de la tensión en bornes. Cálculo de la tensión transitoria a partir de magnitudes de operación del generador sincrónico en la situación prefalla. Línea característica de potencia en función de ángulo de la transmisión, calculada para el estado prefalla utilizando la tensión transitoria de la rueda polar. Funcionamiento del generador sincrónico conectado a una red rígida: a) Ante variaciones de cupla mecánica de impulso para corriente de excitación y velocidad angular mecánica constantes; b) Ante cambios en la corriente de excitación para cupla mecánica de impulso y velocidad angular mecánica constantes.

## 3. CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE ESTADO ESTACIONARIO

El concepto de estabilidad ante pequeñas y grandes perturbaciones. Caracterización de los puntos de funcionamiento del generador sincrónico en la gráfica de la función potencia activa generada en función del ángulo de carga. Condición para el funcionamiento estáticamente estable del generador sincrónico. Cálculos básicos empleados para analizar problemas de estabilidad estática y transitoria. Tensiones nodales: Procedimiento de cálculo en un sistema de transmisión sencillo partiendo de los parámetros de la red y de los valores conocidos de tensión de línea y de potencia trifásica en un punto de suministro, sin necesidad de calcular corrientes. Métodos prácticos de cálculo aplicados al problema de estabilidad estática. Influencia de la regulación de tensión del generador sincrónico sobre la estabilidad estática. Característica externa de la estabilidad estática resultante de una variación lenta de carga y de la respuesta de los reguladores de velocidad y de tensión. Potencia límite estática: Máxima potencia transmisible que satisface las condiciones de estabilidad de estado estacionario. Potencia límite estática entregada por un generador de tensión  $\underline{U}_G$  a una red rígida de tensión  $\underline{U}_S$  a través de un sistema de transmisión sencillo bajo la condición  $|\underline{U}_G| = |\underline{U}_S|$ . Influencia de las pérdidas ( $R \neq 0$ ) en la estabilidad estática de un sistema de transmisión. Toma intermedia de potencia a ( $\cos \varphi \neq 0$ ). Sistema de transmisión de dos máquinas sincrónicas. Expresiones de las potencias activas y reactivas entregadas por cada máquina. Criterio de estabilidad de estado estacionario. Procedimiento para calcular la potencia límite de estado estacionario. Estabilidad estática artificial. La potencia límite en el caso de la estabilidad estática artificial.

#### **4. CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA**

Descarga del generador ante cortocircuitos cercanos a él. Comportamiento del generador ante cortocircuitos alejados. La potencia acelerante y su representación gráfica. Pérdida de estabilidad transitoria por efecto de un cortocircuito de duración ilimitada. Estabilidad transitoria garantizada por la rápida interrupción del cortocircuito trifásico. Estabilidad transitoria y sus criterios prácticos. Método de la igualdad de áreas. Caso crítico. Reserva de estabilidad. Pérdida de estabilidad. Determinación del ángulo límite de desconexión de la falla. Prueba de la estabilidad cuando se emplea la reconexión automática de la línea afectada por la falla. Tiempo límite de desconexión de la falla. Ejemplos para su cálculo aproximado sin recurrir a la integración numérica de la ecuación diferencial de movimiento. Influencia de diferentes factores en los cálculos de estabilidad transitoria. Supuestos básicos para los cálculos de estabilidad transitoria.

Influencia del amortiguamiento en los procesos transitorios. Influencia del amortiguamiento y de la disminución del momento mecánico de la turbina durante la caída total de potencia. Influencia de la regulación automática en los procesos transitorios. La regulación del motor primario. La regulación de excitación del generador. Métodos de cálculo para el problema de estabilidad transitoria. Suposiciones para el cálculo práctico de estabilidad transitoria. Magnitudes que deben ser calculadas. Resolución numérica de la ecuación diferencial de movimiento mediante el método de integración paso a paso: Fórmulas de utilidad práctica. Ejemplo de cálculo de la evolución en el tiempo del ángulo de la transmisión y del máximo tiempo admisible para la duración de la falla. Principales cuestiones prácticas de la estabilidad transitoria. Influencia de los siguientes factores sobre la estabilidad transitoria: a) La consideración de la resistencia óhmica en las líneas de transmisión. b) El lugar donde se produce la falla. Relación entre la potencia de transmisión máxima admisible y el tiempo máximo admisible de duración de la falla. Estabilidad transitoria ante diferentes tipos de cortocircuitos.

#### **5. BIBLIOGRAFÍA**

- a. PrabhaKundur. Power System Stability and Control. Power System Engineering Series of the Electric Power Research Institute. 1994
- b. Giménez, M del Carmen: Material didáctico de apoyo a la enseñanza y al aprendizaje del tema Estabilidad de Sistemas de Potencia.
- c. W. H. Peralta: Material de apoyo a la enseñanza y al aprendizaje del tema Estabilidad de Sistemas de Potencia.
- d. Kraus-Fleisch: ELECTOMAGNETÍSMO con Aplicaciones. Mc Graw-Hill. Quinta Edición. 1999
- e. Kimbark, E. W.: Power System Stability: Synchronous Machines. Dover Publications, Inc., New York, 1956.
- f. Kaminski, A.: Stabilität des elektrischen Verbundbetriebes, VEB Verlag Technik Berlin, 1959.