

Generalidades de los Sistemas Eléctricos de Potencia

- Dr. Pablo Lischinsky
Dpto. Sistemas de Control. EISULA
<http://www.webdelprofesor/ingenieria/pablo>
- Ing. Gustavo Araujo
Dpto. Ingeniería Eléctrica. UNEXPO

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

1

Plan

- Evolución histórica
- Generación de la energía eléctrica
- Potencia activa, reactiva y aparente
- Representación de los SEP
- Algunos estudios sobre los SEP
- Estados de operación
- Control, operación y monitoreo de los SEP
- Conclusiones

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

2

Evolución Histórica de la Energía Eléctrica

- Los primeros sistemas eléctricos de potencia estaban basados en **corriente continua (CC)**, cerca de 1882. Alimentaban pequeñas carga de iluminación en casas y avenidas.
- En 1890 aparecen los primeros sistemas eléctricos de potencia de **corriente alterna (CA)**, eran circuitos monofásicos.
- El transformador, la transmisión en CA y los **sistemas trifásicos** fortalecieron el uso de los sistemas en CA.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

3

Evolución Histórica de la Energía Eléctrica

- Se usaron diferentes valores de frecuencia y un uso progresivo de altos niveles de voltaje.
- **Hoy en día:**
 - Generación, transmisión y distribución es en **CA** mediante uso de **sistemas trifásicos**.
 - Opera a voltaje y frecuencia constante.
 - Transmisión en corriente continua de alto voltaje (**HVDC**). Mayor a 500km aéreo y 50km submarino o subterráneo; interconexiones.

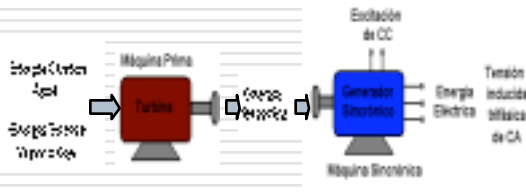
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

4

Generación de la Energía Eléctrica

La energía eléctrica consumida en la industrias, comercios y hogares es producida por los generadores sincrónicos ubicados en las centrales de generación.



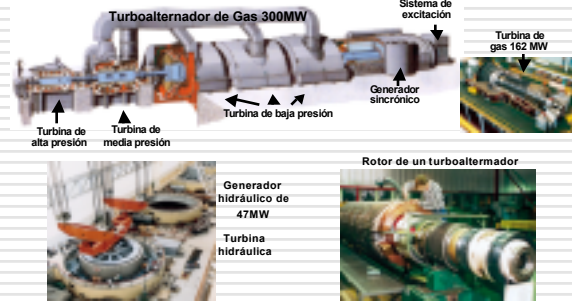
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

5

Generación de la Energía Eléctrica

Generador sincrónico



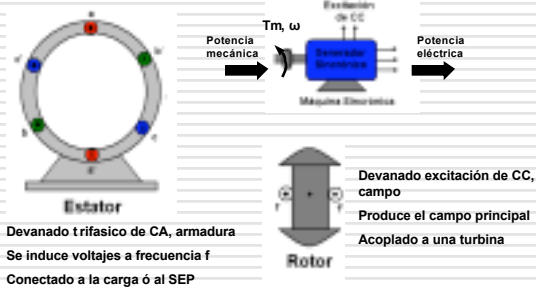
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

6

Generación de la Energía Eléctrica

Generador sincrónico



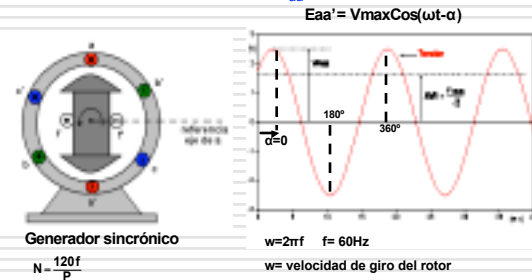
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

7

Generación de la Energía Eléctrica

Fuerza electromotriz inducida $E_{aa'}$



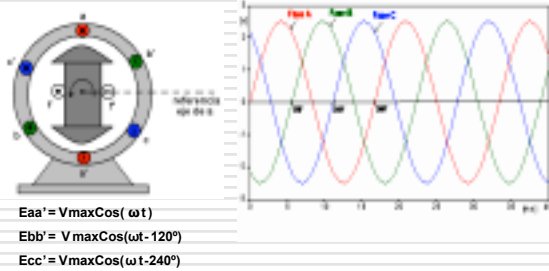
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

8

Generación de la Energía Eléctrica

Sistema trifásico de tensiones



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

9

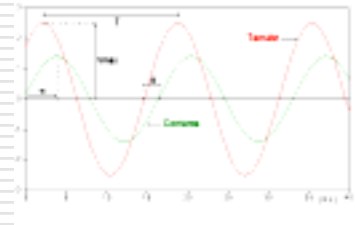
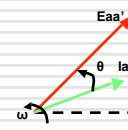
Generación de la Energía Eléctrica

Generador sincrónico bajo carga

$$E_{aa'} = V_{\max} \cos(\omega t - \alpha) \quad I_a = I_{\max} \cos(\omega t - \beta)$$

$\theta = \alpha - \beta$ ángulo de desfase

Representación fasorial



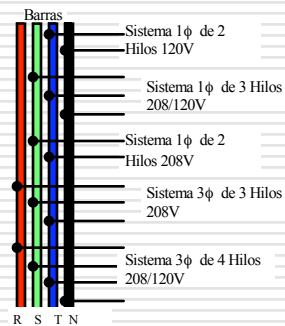
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

10

Sistemas de Alimentación

Dependiendo del nivel de tensión y número de fases de la carga, los sistemas de alimentación pueden ser monofásicos o trifásicos, de 2 hilos, 3 hilos ó 4 hilos.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

11

Potencia activa, reactiva y aparente

La potencia eléctrica es determinada por:

$$\bar{S} = \frac{\bar{V} \bar{I}^*}{2} = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\epsilon) + j \frac{V_m I_m}{2} \sin(\epsilon)$$

■ Potencia activa (kW): $P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\epsilon)$
produce trabajo, calor

■ Potencia reactiva Q (kVar): $Q = \frac{V_m I_m}{2} \sin(\epsilon)$
no produce trabajo

■ Potencia aparente S (kVA) $S = \frac{V_m I_m}{2}$

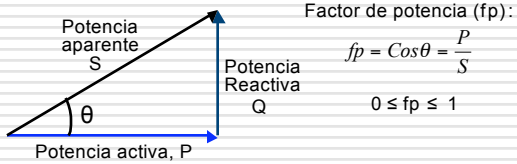
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

12

Potencia activa, reactiva y aparente

Triángulo de potencia



θ es el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

13

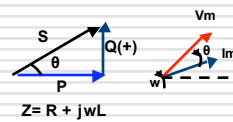
Potencia activa, reactiva y aparente

Naturaleza de las cargas de un SEP

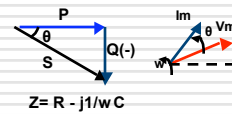
1) Resistiva:

fp unidad $\rightarrow S = P \quad Q = 0$ $Z = R$ $w \quad \theta = 0$ $Im \quad V_m$

2) Inductiva: fp en atraso



3) Capacitiva: fp en adelanto



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

14

Potencia activa, reactiva y aparente

- Si Q aumenta $\rightarrow S \uparrow$, Corriente \uparrow , Costo \uparrow
- Es conveniente tener un sistema funcionando con alto factor de potencia, cercano a 0.9.
- A veces se requiere compensación reactiva mediante condensadores.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

15

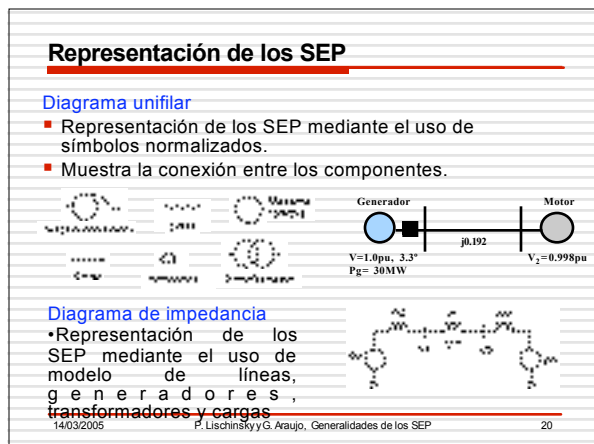
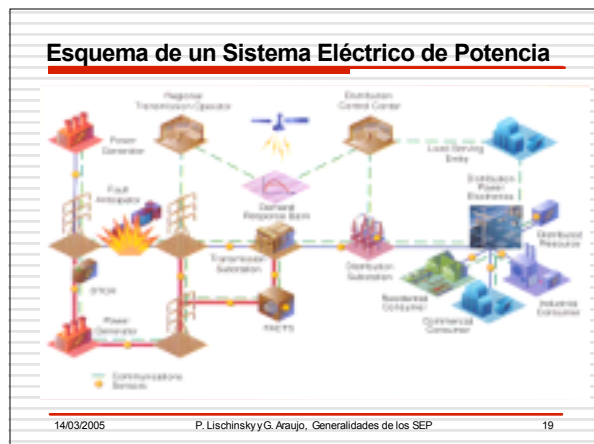
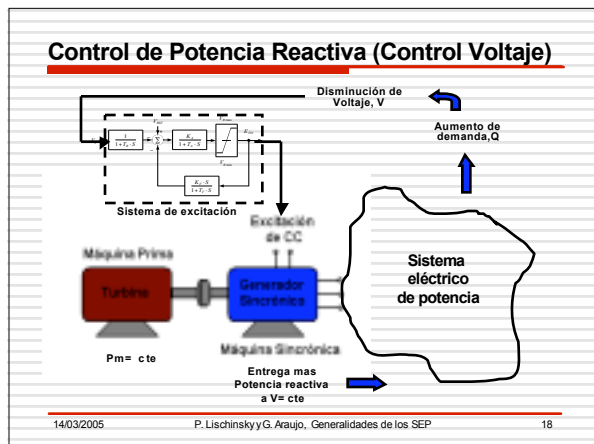
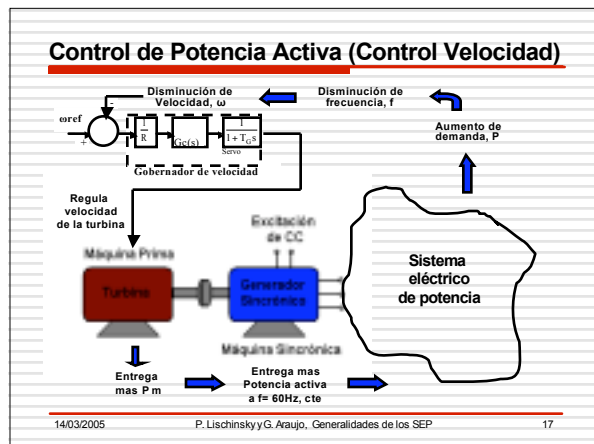
Control sobre Máquina Sincrónica

- Para una operación satisfactoria de un sistema eléctrico de potencia, la frecuencia y la tensión deben permanecer constantes o casi constantes.
- El control de la potencia activa está estrechamente relacionado con el control de la velocidad, mediante el gobernador.
- El control de la potencia reactiva está estrechamente relacionado con el control del voltaje, mediante el sistema de excitación.

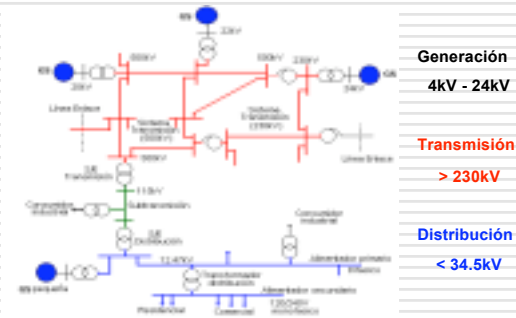
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

16



Estructura de los SEP



14/03/2005

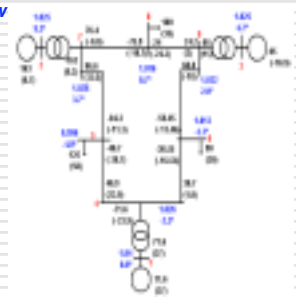
P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

21

Algunos estudios sobre los SEP

Flujo de carga: *load flow* ó *power flow*

- Voltajes y flujos de potencia.
- Uso de herramienta de análisis no lineal y métodos de integración numérica.
- Determinar posibles sobrecargas o niveles inaceptables de voltaje.
- Simular diferentes escenarios de operación a partir de una demanda estimada.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

22

Algunos estudios sobre los SEP

Análisis de corto circuito

- Calcula niveles de corriente y potencia de corto circuito.
- Usado para la correcta elección y dimensionamiento de los diversos aparatos, equipos y conductores.
- Ajustar equipos de protección.

14/03/2005

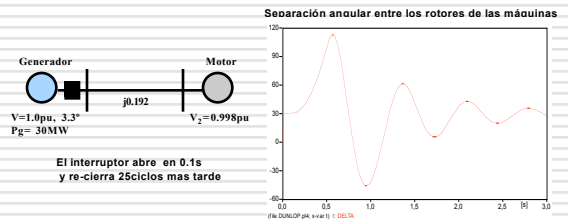
P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

23

Algunos estudios sobre los SEP

Análisis de estabilidad

- Capacidad del sistema de alcanzar un nuevo punto de equilibrio estable o de volver al punto de equilibrio estable.



14/03/2005

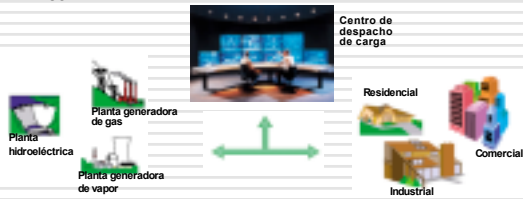
P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

24

Algunos estudios sobre los SEP

Despacho económico

- Reparte la demanda total de la carga del sistema entre los generadores disponibles, minimizando el costo de la generación.
- Herramientas de optimización, programación lineal, no lineal.



14/03/2005

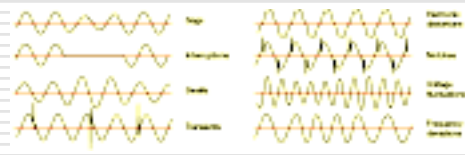
P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

25

Algunos estudios sobre los SEP

Calidad de la energía

Consiste en evaluar y determinar los principales fuentes de distorsión de la onda de tensión y corriente. Así mismo implantar los mecanismos y dispositivos que minimicen los efectos de la distorsión de una mala calidad de la energía.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

26

Dispositivos FACTS

- Limitaciones económicas y medioambientales impuesta a la construcción de nuevas líneas.
- Transmisión de energía de manera eficiente para satisfacer la demanda de la carga.

↓
Uso de dispositivos controlables
de electrónica de potencia

↓
Nuevo tipo de sistema:
sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna
FACTS (Flexible AC Transmision Systems)

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

27

Dispositivos FACTS

Los dispositivos FACTS son utilizados para el control de flujo de potencia, compensación de potencia reactiva (VAR) ó para la amortiguación de las oscilaciones.

Dispositivos FACTS:

- SVC
- VSC
- TCSC
- STATCOM
- UPFC



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

28

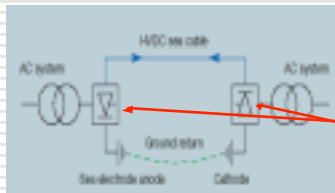
Transmisión de energía de HVDC

Alta capacitancia de los cables en CA



HVDC

Corriente continua de alto voltaje



Cable submarino

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

29

Sistema Eléctrico Nacional (Venezuela)

18 empresas eléctricas públicas y privadas.

Empresas públicas:

CADAFE (ELEORIENTE, ELECENRO, ELEOCCIDENTE, CADELA y SEMDA), EDELCA, ENELVEN, ENELCO y ENELBAR.

Empresas privadas:

Electricidad de Caracas (CALEV, ELEGGUA y CALEY), ELEBOL, CALIFE, ELEVAL y SENECA.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

30

Sistema Eléctrico Nacional (Venezuela)

Distribución de las empresas eléctricas



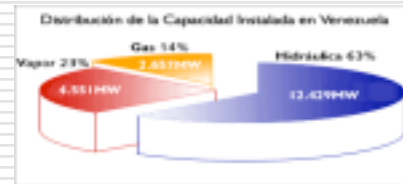
14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

31

Sistema Interconectado Nacional (S.I.N.)

- CADAFE, EDELCA, EDC y ENELVEN
- La capacidad instalada del S.I.N. alcanza los 19.637 MW y está compuesta por generación hidráulica y térmica.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

32

Parque de generación



120 unidades térmicas
 23 a vapor (Capital, Central y Zulia) y
 97 a gas (disperso en el territorio nacional)

51 unidades hidráulicas
 (Guayana y Los Andes)

14/03/2005

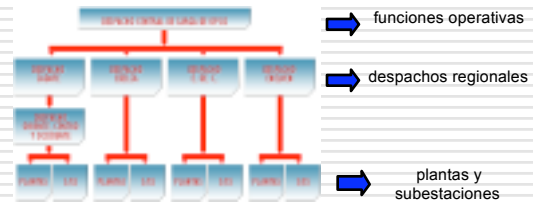
P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

33

Oficina de Operación de Sistemas Interconectados (OPSIS)



- Coordinar las actividades de planificación y operación del S.I.N.
- Asegurar la calidad, confiabilidad y seguridad del servicio eléctrico, menor costo, optimización.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

34

Ley Orgánica del Servicio Eléctrico Nacional

Tiene por objeto establecer las disposiciones que regirán el Sistema Eléctrico en el Territorio Nacional, constituido por las actividades de generación, transmisión, gestión del Sistema Eléctrico Nacional, distribución y comercialización de potencia y energía eléctrica y la actuación de los agentes que intervienen en el servicio eléctrico, así como la regulación, control y fiscalización de dichas actividades, en concordancia con la política energética y de desarrollo económico y social de la Nación, dictada por el Ejecutivo Nacional.

Gaceta Oficial Número: 5.568 del 31-12-2001

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

35

Control, Operación y Monitoreo de los SEP

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

36

Estados de Operación

- **Normal:** variables en rango normal, ningún equipo sobrecargado.
- **Alerta:** nivel de seguridad por debajo de cierto límite, sistema debilitado pero variables aun en rango aceptable.
- **Emergencia:** existe una perturbación, bajo nivel de voltaje en las barras y/o la carga de equipos exceden valores nominales, sistema todavía intacto.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

37

Estados de Operación

- **Emergencia extrema:** parada de gran parte del sistema, acciones de control para evitar el apagón total del sistema.
- **Restauración:** reconexión de todas las instalaciones del sistema y recuperación de la carga.



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

38

Objetivos del control tiempo real

- Aumentar la confiabilidad
- Determinar y mejorar la seguridad de la operación
- Mejorar la eficiencia operativa
- Asegurar la calidad del servicio
- Restaurar el servicio luego de una falla

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

39

Funciones de control a tiempo real

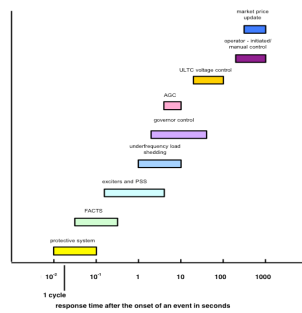
- Distintas funciones con escalas de tiempo diferente: desde milisegundos hasta horas
- Ayudas en línea a los operadores para la toma de decisiones
- Funciones automáticas a tiempo real

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

40

Escalas de tiempo en los SEP



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

41

Funciones de control a tiempo real (EMS)

- Control Automático de Generación (AGC)
- Control Automático de Voltaje (Var) (AVC)
- Despacho Económico (ED)
- Despacho Económico (ED)
- Monitoreo de Seguridad (SM)
- Estimación de Estado (SE)
- Análisis de Seguridad (SA)
- Cálculo en línea de Corto-Circuito (OSC)
- Control de Emergencia (EC)

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

42

Control Automático de Generación (ACG)

El algoritmo básico de ACG calcula el error de control de área y asigna la regulación de cada unidad (MW) reconociendo los puntos de operación deseados.

La implementación digital utiliza generalmente de 1 a 4 segundos de período de muestreo.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

43

Despacho Económico (ED)

El cálculo del despacho económico se realiza cada ciertos minutos usando un conjunto de ecuaciones que requieren que el costo incremental de la potencia suministrada de cada unidad operacional a un punto de referencia arbitrario sea el mismo para cada unidad.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

44

Control Automático de Voltaje (Var) (AVC)

El control automático de voltaje es muy utilizado en la actualidad.

La optimización de la potencia reactiva reduce los costos de producción y también tiene un efecto favorable en la seguridad del sistema, porque conlleva a los mayores perfiles de voltaje compatibles con las restricciones operacionales de la red.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

45

Monitoreo de Seguridad (SM)

El monitoreo de seguridad es la identificación en línea de las condiciones de operación del sistema de potencia, y requiere una instrumentación del mismo a una mayor escala y variedad que la requerida por un centro sin esta función.

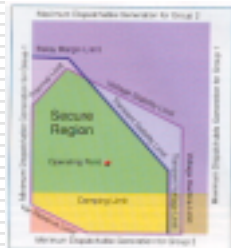
La función de monitoreo de seguridad chequea la data a tiempo real básicamente para determinar si el sistema de potencia está "cerca" o en estado de emergencia. Diferentes criterios y métodos existen y se investigan para definir esta cercanía a el límite de estabilidad o estado de emergencia.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

46

Monitoreo de Seguridad (SM)



14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

47

Estimación de Estado (SE)

Reconstruir lo mas precisamente posible el estatus del sistema a partir de las mediciones a tiempo real tomadas sobre la red y de la topología calculada por la función de monitoreo de seguridad:

- para validar y hacer mutuamente coherente todos los datos adquiridos a tiempo real,
- para detectar datos erróneos entre toda la data que llega a la sala de control,
- para estimar cantidades que no son medidas remotamente,
- suministrar algunas entradas necesarias para la función de monitoreo de seguridad.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

48

Análisis de Seguridad (SA)

El análisis de seguridad consiste en dos funciones. La primera es determinar si el sistema es en estado normal o de alerta. Esto es conocido como evaluación de contingencia debido a que en la práctica, la seguridad se determina en referencia a un conjunto probable de próximas contingencias.

La segunda función es la de determinar que acción preventiva debería tomarse cuando el sistema está inseguro.

La situación de emergencia a evitar es la sobrecarga de equipos o bajas tensiones en los buses.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

49

Control Supervisorio

Es una función manual realizada por medio de la interfaces interactivas. Incluye el control supervisorio de interruptores (breakers) (SBC) y dispositivos de regulación de voltaje (SVS). Con SBC los operadores tienen la posibilidad de abrir o cerrar interruptores para el bote de cargas y restauración de cargas como un tipo de control de emergencias manual.

Hay otras funciones del control supervisorio como el arranque y parada de unidades generadoras.

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

50

Sistema Eléctrico de Potencia



**El sistema dinámico más grande del mundo,
construido por el hombre ...**

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

51

Resumen y Conclusiones

- Sistema de gran pertinencia para el desarrollo nacional
- Complejo e interdisciplinario
- Enormes desafíos
- Grandes oportunidades de trabajo e investigación interdisciplinaria en Ing. de Sistemas
- Control y Automatización
- Sistemas Computacionales
- Investigación de Operaciones

14/03/2005

P. Lischinsky y G. Araujo, Generalidades de los SEP

52