

01/29
10



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“MEDICIONES FASORIALES EN LOS
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A :
GUSTAVO BARRIOS TOLEDANO

DIRECTOR ING. JUAN JOSÉ LÓPEZ MÁRQUEZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MÉXICO, D.F.

DICIEMBRE DE 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACION DISCONTINUA

Dedicatorias

Ayudézcote a:

Dios que me dio la vida y que me permitió realizar esta meta y me permita realizar muchas más.

Mis padres Antonio y Guadalupe gracias por que me brindaron toda su confianza y nunca dudaron de mí, esto también es su logro los quiero mucho.

Mis hermanos Raúl y Laura les agradezco que me tuvieron confianza y que sus críticas siempre me ayudaron a dar el extra necesario para salir adelante los quiero.

Mis cuñados Diana y Miguel que forman parte de mi familia esto también es para ustedes.

Mis sobrinas Alejandra, Emiliano, Anahi y Fátima con todo mi cariño espero que les sirva de ejemplo algún día.

Toda mi familia y que es difícil nombrarlos a todos, pero gracias por su granito de arena y especialmente a mi tía Rosalinda por sus consejos y oraciones se lo agradezco de todo corazón.

La persona que ha estado conmigo en todo momento apoyándome incondicionalmente y que ya eres parte de mi vida te amo Yuliett.

El Ing. Juan José López Márquez gracias por dedicarme un poco de tiempo de su vida para cambiar la mía.

A mis amigos Alejandro, Julián, Angélica y a todos los que también forman parte de este logro.

A las personas que por olvido no menciono, pero que por alguna razón contribuyeron para que lograra esta meta mil gracias.

Sustavo Barrero Solisano

B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	Página
Índice.....	I
Prólogo.....	II
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	
1.1.El sistema eléctrico de potencia.....	1
1.1.2 Descripción y configuración del sistema eléctrico de potencia.....	1
1.2 Teoría de fasores.....	6
1.2.1 Definición fasorial.....	6
1.2.2 Representación fasorial.....	8
1.2.3.Operación fasorial.....	11
CAPÍTULO 2 MEDICIÓN FASORIAL	
2.1Definición de la medición fasorial.....	17
2.1.1. Componentes simétricas de fasores.....	18
2.2 Aplicaciones de la medición fasorial.....	23
2.2.1 Estimación de estado.....	23
2.2.2 Protecciones adaptivas.....	30
2.3 Tendencias fasoriales a nivel mundial.....	32
CAPÍTULO 3 MEDICIÓN FASORIAL EN MÉXICO	
3.1Equipo empleado para la medición fasorial.....	37
3.2 Ubicación geográfica de las unidades de medición fasorial en el sistema eléctrico nacional (sen).....	45
3.3 Aplicaciones de la medición fasorial en CFE.....	54
3.3.1 Como registrador de eventos.....	54
3.3.1.1 Por voltaje.....	54
3.3.1.2 Por corriente.....	54
3.3.1.3 Por frecuencia.....	54
3.3.2 Protección con medición fasorial.....	55
3.3.3 Control con medición fasorial.....	55

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

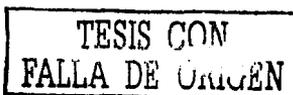
CAPITULO 4 EXPERIENCIA DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD EN MEDICIONES

FASORIALES	Página
4.1 Criterios para la asignación de los equipos de medición fasorial (pmu).....	56
4.1.1 Sistema interconectado.....	57
4.1.2 Nivel de tensión 400 kv y 230 kv.....	58
4.1.3 Sistemas aislados.....	59
4.1.3.1 Sistema Sonora-Sinaloa.....	59
4.1.3.2. Sistema peninsular.....	61
4.2 Registros de fallas en el sistema eléctrico nacional.....	62
4.2.1 Fallas por pérdida de generación.....	62
4.2.2 Fallas por pérdida de carga.....	64
4.2.3 Fallas por salida de líneas de transmisión.....	65
4.2.4 Fallas por causas naturales.....	66
4.2.4.1 Fallas por sismos.....	66
4.3 Aportaciones realizadas por la comisión federal de electricidad	
en el monitoreo de la medición fasorial en tiempo	67
4.3.1 Comunicación local.....	67
4.3.2 Comunicación vía tcp/ip.....	67
4.3.3 Análisis de las fallas con medición fasorial.....	68

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Conclusiones.....	73
-------------------	----

BIBLIOGRAFIA.....	75
--------------------------	-----------



PROLOGO

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer tanto la medición fasorial como el PMU (Unidad de Medición Fasorial) por sus siglas en inglés, ya que son temas poco conocidos y no existe suficiente información al respecto.

Este trabajo está destinado tanto a alumnos de Ingeniería como profesores y profesionistas interesados en el tema, ya que la información presentada es muy completa respecto al tema.

Encontrará conceptos nuevos como el aparato llamado Unidad de Medición Fasorial, el cual es un aparato único en su tipo tanto en México como en el mundo; en México solo existen 16 de estos, los cuales ayudan enormemente al sistema eléctrico nacional, tanto para pronosticar como para analizar fallas por citar algunas de sus aplicaciones.

Otro punto importante del PMU el cual cuenta con tecnología de punta, es su forma de sincronización a través del sistema satelital llamado GPS (Sistema Global de Localización) por sus siglas en inglés el cual nos ofrece mediciones en tiempo real.

Estos y otros puntos de interés son tratados con más detalle en los capítulos 3 y 4 y específicamente en el capítulo 4 encontrará gráficas de situaciones reales en las que intervinieron los PMU's y que gracias a estos se pudo obtener un análisis y así poder saber que fue lo que pasó realmente.

Tanto la medición fasorial como el PMU son temas nuevos para los sistemas eléctricos de potencia pero es poca la información que existe al respecto y espero que este trabajo sirva para darlo a conocer.

1.INTRODUCCION

1.1 EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

1.1.2 DESCRIPCIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

El descubrimiento del fenómeno de la inducción electromagnética por Faraday, en 1831, que dio lugar al invento del generador eléctrico, inicio de la electrotécnica, cuyo desarrollo está íntimamente ligado al de los sistemas de energía eléctrica.

Generalmente se considera que los sistemas de energía eléctrica se inician en 1882 con las instalaciones de Edison en Nueva York , aunque existían ya algunas instalaciones de alumbrado utilizando lámparas de arco eléctrico.

En un principio el suministro de energía eléctrica se hizo mediante corriente continua a baja tensión , utilizando el generador de corriente continua (dínamo) desarrollado en 1870 por Gramme. Inicialmente la carga eléctrica estaba constituida por lámparas incandescentes de filamento de carbón ; hacia 1884 se empezaron a utilizar motores de corriente continua.

Los primeros sistemas eran de dos hilos, a potencial constante.

El aumento de la carga condujo a desarrollar el sistema de tres hilos.

El uso de sistemas de corriente continua a baja tensión limitaba, por razones económicas, la distancia a que podía transmitirse la energía eléctrica con una regulación de voltaje aceptable.

Es fácil ver que si la tensión de transmisión se hace n veces mayor, el peso del conductor necesario para transmitir una potencia dada, con unas pérdidas determinadas, se reduce n^2 veces.

En efecto considérese el sistema de corriente continua de dos hilos.

Si se aumenta la tensión de V a $V_1 = nV$, manteniendo la potencia suministrada $P=VI$, constante, la corriente disminuye a :

$$I_1 = \frac{I}{n} \dots\dots(1)$$

Puesto que las pérdidas por efecto Joule en los dos conductores de la línea se van a mantener al mismo valor:

$$I^2 R = I_1^2 R_1 = \frac{I^2}{n^2} R \dots\dots(2)$$

$$R_1 = n^2 R \dots\dots(3)$$

Igualmente, si el criterio de comparación es que la caída de tensión en la línea represente el mismo porcentaje de la tensión entre hilos utilizada, puede mostrarse que la sección (y por lo tanto el peso de los conductores) puede reducirse n^2 veces cuando la tensión entre hilos aumenta n veces.

Se considera a Marcel Deprez como precursor de la transmisión de energía eléctrica a alta tensión¹. En un informe presentado a la Academia de Ciencias de París, en 1881, enunció la tesis de que elevando la tensión se puede transmitir una energía eléctrica de cualquier potencia a una gran distancia, con pérdidas mínimas. Al año siguiente realizó el experimento de transmitir con corriente continua una potencia de 1.5 KW a una tensión de 2000 V a una distancia de 57 Km.

La transmisión con corriente continua a alta tensión tuvo algunas aplicaciones industriales limitadas, de las cuales la mas importante fue el sistema Thury que consistía en conectar en serie varios generadores de corriente continua con excitación serie, funcionando a corriente constante, para obtener la tensión de

¹VIQUEIRA, JACINTO .REDES ELECTRICAS

transmisión requerida por la carga, que consistía en motores serie, conectados también en serie. Uno de estos sistemas funcionó en la región Lyon (Francia), transmitiendo una corriente constante de 75 Amperes, a una tensión variable con un máximo de 60000 V.

SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA

Los primeros sistemas de corriente alterna fueron monofásicos. En 1884 Gaulard realizó una transmisión de corriente alterna monofásica de 40 Km. en la región de Turín (Italia).

En 1886 se puso en servicio en Estados Unidos un sistema de corriente alterna monofásica usando transformadores con tensión primaria de 500 volts y tensión secundaria de 100 volts. En 1887 entró en servicio un sistema de transmisión y distribución con corriente alterna en la ciudad de Lucerna (Suiza) y 1888 en Londres.

En 1883 Tesla inventó las corrientes polifásicas, en 1886 desarrolló un motor polifásico de inducción y en 1887 patentó en Estados Unidos un sistema de distribución trifásico.

La primera línea de distribución trifásica se construyó en 1891 en Alemania, con una longitud de 800 Km. y una tensión de 12.000 volts.

El sistema de corriente alterna trifásico se desarrolló rápidamente y es actualmente de empleo general ya que presenta la ventaja de que la potencia total suministrada es constante siempre que el sistema trifásico sea equilibrado, mientras que en un sistema monofásico la potencia suministrada es pulsante.

Además, para una misma potencia, un generador o un motor monofásico es más grande y por lo tanto más caro que el correspondiente trifásico.

3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la misma longitud y la misma resistividad, el área de la sección recta de los conductores es inversamente proporcional a la resistencia y el peso y por lo tanto el costo de los conductores es directamente proporcional al área.

Actualmente se usan sistemas de corriente monofásico únicamente en algunos sistemas de distribución especialmente en los Estados Unidos y para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica. En todos los casos estos sistemas monofásicos se alimentan desde sistemas trifásico.

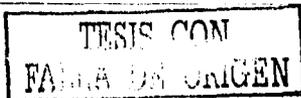
Por lo que hace a los sistemas trifásico, se usan tres conductores siempre que el desequilibrio entre las potencias de las tres fases es pequeño, que es el caso de las aplicaciones de la transmisión. En los sistemas de distribución se usan frecuentemente el cuarto hilo, especialmente en los circuitos de baja tensión.

En lo que se refiere a la frecuencia eléctrica utilizada en los sistemas de corriente alterna, inicialmente se prefirieron frecuencias bajas para disminuir las reactancias inductivas de la líneas y por razones de diseño de los motores de tracción, lo que hizo que se extendiera el uso de la frecuencia de 25 Hz.

Posteriormente se fue imponiendo el uso de frecuencias más elevadas , de 50 y 60 Hz. debido a que una frecuencia mayor permite utilizar circuitos magnéticos de mayor sección para una potencia dada lo que da como resultado aparatos de menor tamaño y más baratos.

A partir de la introducción de la transmisión con corriente alterna trifásica a fines del siglo pasado, la cantidad de energía transmitida, la longitud de las líneas y la tensión de transmisión han aumentado constantemente.

En 1896 se instaló una línea de 25 kV. en Estados Unidos.



En 1905 entró en servicio una línea de 60 kV. entre la planta hidroeléctrica de Necaxa en la ciudad de México, lo que constituyó en aquel momento la tensión más elevada del mundo.

En 1913 las tensiones de transmisión subieron a 150 kV, en 1923 a 220 kV, y en 1935 a 287 kV, en Estados Unidos. En 1952 entró en servicio en Suecia un sistema de 400 kV, en 1958 uno de 500kV en la Unión Soviética y en 1965 una línea de 735 kV en Canadá. Las tensiones más altas en servicio son en orden de 1000 kV.

SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN

En la figura 1 se representa esquemáticamente los principales elementos de un sistema de energía eléctrica.

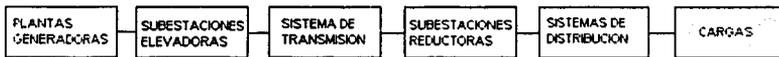


figura 1.1

La elevación y reducción de la tensión y la interconexión de los distintos elementos del sistema se realiza en las subestaciones, que constituyen los nudos de la red, cuyas ramas están constituidas por las líneas. De acuerdo con la función que realizan, las subestaciones pueden clasificarse en :

- a) Subestaciones elevadoras de las plantas generadoras.
- b) Subestaciones de interconexión de la red de alta tensión.
- c) Subestaciones reductoras para alimentar los sistemas de subtransmisión o de distribución.

Los sistemas de distribución pueden adoptar diversas disposiciones, ya sea que la distribución se haga con líneas aéreas o subterráneas y diversos arreglos de la topología del sistema: radial, en anillo o en red. Esto depende en gran parte de la densidad de carga en un área determinada y del tipo de carga.

1.1 TEORÍA DE FASORES

1.2.1. DEFINICIÓN FASORIAL

En los sistemas de corriente alterna funcionando en régimen permanente, las corrientes y los voltajes son funciones sinusoidales del tiempo.

Considérese, la representación de la corriente y el voltaje de un circuito de corriente alterna monofásico, en función del tiempo, mostrada en la figura 2.

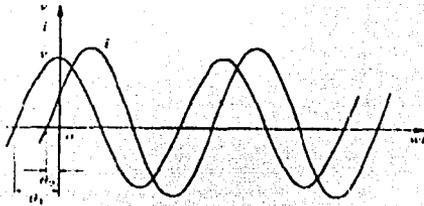


figura 1.2

Los valores instantáneos del voltaje y de la corriente en función del tiempo están dados por las siguientes expresiones:

$$v = V_m \text{sen}(wt + \theta_1) \dots (4)$$

$$i = I_m \text{sen}(wt + \theta_2) \dots (5)$$

Donde V_m e I_m representan, respectivamente, los valores máximos o de cresta del voltaje y de la corriente, θ_1 y θ_2 son los ángulos de fase del voltaje y de la corriente, en radianes y $w = 2\pi f$ radianes/seg, siendo f la frecuencia en ciclos por segundo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los valores instantáneos de cada una de esas funciones pueden obtenerse por la proyección sobre el eje de las ordenadas de un segmento de recta dirigido de magnitud igual al valor máximo de la función, que gire en sentido contrario a las manecillas del reloj, con una velocidad angular $\omega = 2\pi f$ radianes/seg, como muestra la figura 3.

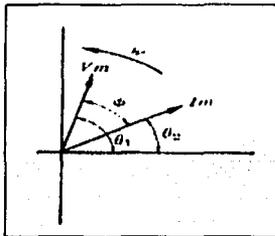


figura 1.3

Para una frecuencia determinada cada función sinusoidal queda totalmente definida por un segmento de recta fijo caracterizado por un módulo igual al valor máximo de la función y un argumento igual al ángulo de fase, medido tomando como referencia el eje de las abscisas.

Estos segmentos de recta dirigidos reciben el nombre de fasores. La diferencia angular entre fasores que representan funciones sinusoidales de tiempo de una misma frecuencia, indica el desplazamiento en el tiempo de las crestas positivas de las funciones sinusoidales de las funciones correspondientes.

1.2.2. REPRESENTACIÓN FASORIAL

REPRESENTACIÓN DE FUNCIONES SINUSOIDALES DEL TIEMPO MEDIANTE FASORES

En el cálculo de los sistemas de corriente alterna en régimen permanente, resulta más conveniente utilizar fasores cuya magnitud sea igual al valor eficaz de la función sinusoidal correspondiente; esta magnitud se obtiene dividiendo el valor de cresta por $\sqrt{2}$.

Para la siguiente notación las letras minúsculas (i), representarán cantidades escalares instantáneas; las letras mayúsculas (I), representarán valores eficaces de funciones que varían sinusoidalmente con el tiempo y el signo \sim colocado sobre la mayúscula (\tilde{I}) denotará un fasor de magnitud I .

Un fasor se expresa mediante un número complejo. Por lo tanto puede usarse cualquiera de las notaciones empleadas para representar los números complejos:

$$\text{Coordenadas polares: } \tilde{I} = I \angle \theta \dots (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Coordenadas cartesianas: } \tilde{I} &= I \cos \theta + j I \sin \theta \dots (7) \\ \tilde{I} &= \text{Re } I + j \text{Im } I \end{aligned}$$

donde Re significa "parte real de" e Im significa "parte imaginaria de".

En las expresiones anteriores $j = 1 \angle 90^\circ$, o sea que es un operador que gira la cantidad multiplicada en $+90^\circ$ sin alterar la magnitud.

Otra notación usada es la anotación exponencial, basada en la ecuación Euler:

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \dots (8)$$

Por lo tanto:

$$\tilde{I} = I e^{j\theta} \dots (9)$$

Considérese ahora la representación de las tres corrientes de un sistema trifásico equilibrado sinusoidal mostrado en la figura 4.

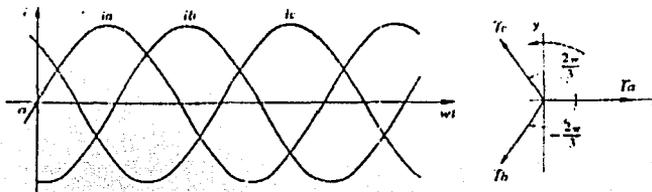


figura 1.4

Los valores instantáneos de las tres corrientes en función del tiempo están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$i_a = I_m \sin \omega t \quad \dots (10)$$

$$i_b = I_m \sin (\omega t - 2\pi/3) \quad \dots (11)$$

$$i_c = I_m \sin (\omega t + 2\pi/3) \quad \dots (12)$$

Estas tres corrientes pueden representarse por los tres fasores $\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c$ mostrados en la figura 4 cuyos módulos son iguales al valor eficaz de la corriente, o sea el valor de cresta dividido por $\sqrt{2}$ y cuyos argumentos difieren en $\frac{2\pi}{3}$ radianes o sea 120° eléctricos, que representan el desplazamiento en el tiempo de las tres sinusoides.

La secuencia de fase a, b, c, o sea el orden en que las tres corrientes alcanzan su valor máximo, se indica seleccionando los índices de los fasores de manera que si estos giran en el sentido contrario a las manecillas del reloj, pasen en ese orden a, b, c, por el eje de las ordenadas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Utilizando la anotación en coordenadas polares, los tres fasores quedan expresados por las siguientes expresiones:

$$\tilde{I}_a = I \angle 0 \dots (14)$$

$$\tilde{I}_b = I \angle -\frac{2\pi}{3} \dots (15)$$

$$\tilde{I}_c = I \angle \frac{2\pi}{3} \dots (16)$$

Utilizando las coordenadas cartesianas:

$$\tilde{I}_a = I(1 + j0) \dots (17)$$

$$\tilde{I}_b = I \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \dots (18)$$

$$\tilde{I}_c = I \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \dots (19)$$

Utilizando la notación exponencial:

$$\tilde{I}_a = I e^{j0} \dots (20)$$

$$\tilde{I}_b = I e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}\right)} \dots (21)$$

$$\tilde{I}_c = I e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)} \dots (22)$$

En los sistemas trifásicos es especialmente útil el operador $a = 1 \angle 120^\circ$.

Expresando los fasores de las tres corrientes mediante este operador se obtiene:

$$\tilde{I}_a = I \cdot 1 \dots (23)$$

$$\tilde{I}_b = a^2 \cdot I \dots (24)$$

$$\tilde{I}_c = a \cdot I \dots (25)$$

1.2.3. OPERACIÓN FASORIAL

POTENCIA REAL Y REACTIVA EN LOS SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA MONOFÁSICOS.

Considérese un circuito de corriente alterna monofásico, en el que el voltaje y la corriente estén dadas por las siguientes expresiones:

$$v = V_m \operatorname{sen} \omega t \dots (26)$$

$$i = I_m \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \dots (27)$$

La potencia instantánea es igual a:

$$p = vi = (V_m \operatorname{sen} \omega t) [I_m \operatorname{sen}(\omega t + \phi)] \dots (28)$$

Desarrollando y sustituyendo en la expresión anterior:

$$p = V_m I_m \operatorname{sen} \omega t (\operatorname{sen} \omega t \cos \phi + \cos \omega t \operatorname{sen} \phi)$$

$$p = V_m I_m (\operatorname{sen}^2 \omega t \cos \phi + \operatorname{sen} \omega t \cos \omega t \operatorname{sen} \phi) \dots (29)$$

Pero:

$$\operatorname{sen} \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2\omega t$$

$$\operatorname{sen}^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \dots (30)$$

Por lo tanto:

$$p = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) + \frac{V_m I_m}{2} \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} 2\omega t \dots (31)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la figura 5 se representa la gráfica de la potencia instantánea y de sus componentes.

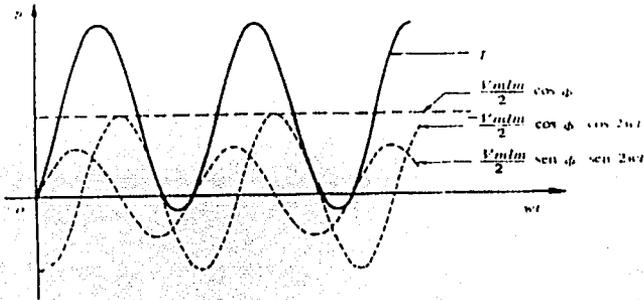


figura 1.5

El primer término de la ecuación:

$$\frac{V_m I_m}{2} \cos(1 - \cos 2\omega t) \dots (32)$$

representa una potencia instantánea que varía entre un mínimo igual a cero y un máximo igual a $V_m I_m \cos \phi$. Su valor medio, durante un número entero de periodos es :

$$\frac{V_m I_m}{2} \cos \dots (33)$$

y se llama potencia real o activa que representaremos con la letra P, teniendo en cuenta que :

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \dots (34)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

donde V e I son respectivamente los valores eficaces del voltaje y de la corriente, la potencia real puede expresarse de la siguiente manera:

$$P = VI \cos \phi \dots(35)$$

El $\cos \phi$ se llama factor de potencia. Si V esta en volts e I en amperes, la potencia esta expresada en Watts.

El segundo término de la ecuación:

$$\frac{V_m I_m}{2} \sin \phi \sin 2\omega t \dots(36)$$

representa una potencia instantánea que varía de un mínimo $-\frac{V_m I_m}{2} \sin \phi$ y un máximo de $\frac{V_m I_m}{2} \sin \phi$. Su valor medio durante un número entero de periodos es igual a cero.

El valor máximo:

$$\frac{V_m I_m}{2} \sin \phi \dots(37)$$

se llama potencia reactiva, que representaremos con la letra Q y puede expresarse en función de los valores eficaces del voltaje y de la corriente de la siguiente manera:

$$Q = VI \sin \phi \dots(38)$$

Si el voltaje y la corriente están en volts y amperes, respectivamente, la potencia reactiva quedara expresada en volt-amperes reactivos (vars).

La potencia reactiva considerada durante un periodo de tiempo, representa la oscilación de energía producida por la existencia de inductancias y capacitancias en el sistema, que almacenan energía en el campo magnético y en el campo eléctrico, respectivamente, durante un semiperiodo y la descarga en el otro semiperiodo.

Se definen como potencia aparente de un circuito monofásico el producto del valor eficaz del voltaje por el valor eficaz de la corriente de dicho circuito.

$$S = VI \dots (39)$$

La potencia aparente se mide en volt-amperes.

Elevando al cuadrado las ecuaciones, sumando y extrayendo la raíz cuadrada, se obtiene:

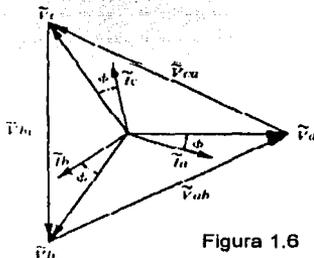
$$\sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{V^2 I^2 (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi)} = VI \dots (40)$$

Por lo tanto puede escribirse:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots (41)$$

POTENCIA REAL Y REACTIVA EN LOS SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS.

Considérese el sistema trifásico equilibrado representado por los fasores mostrados en la figura 6 en dichos sistemas los voltajes y corrientes de las tres fases están dados por las siguientes expresiones:



$$v_a = 2V \sin \omega t$$

$$i_a = 2I \sin(\omega t + \phi)$$

$$v_b = 2V \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_b = 2I \sin(\omega t - \phi - 120^\circ)$$

$$v_c = 2V \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$i_c = 2I \sin(\omega t + \phi + 120^\circ)$$

Donde: $V = V_a = V_b = V_c$

$$I = I_a = I_b = I_c$$

La potencia instantánea de cada fase es igual, de acuerdo con lo que se vio en la sección anterior, a:

$$p_a = v_a i_a = V I \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) + V I \sin \phi \sin 2\omega t \quad \dots(42)$$

$$p_b = v_b i_b = V I \cos \phi [1 - \cos 2(\omega t - 120^\circ)] + V I \sin \phi \sin 2(\omega t - 120^\circ) \quad \dots(43)$$

$$p_c = v_c i_c = V I \cos \phi [1 - \cos 2(\omega t + 120^\circ)] + V I \sin \phi \sin 2(\omega t + 120^\circ) \quad \dots(44)$$

La potencia instantánea trifásica es la suma de las potencias instantáneas de las tres fases

$$p = p_a + p_b + p_c \quad \dots(45)$$

$$p = 3VI \cos \phi - VI \cos \phi [\cos 2\omega t + \cos(\omega t - 120^\circ) + \cos 2(\omega t + 120^\circ)] + 3VI \sin \phi [\sin 2\omega t + \sin 2(\omega t - 120^\circ) + \sin 2(\omega t + 120^\circ)] \quad \dots(46)$$

y como la suma de los términos incluidos dentro de los paréntesis rectos es igual a cero:

$$p = 3VI \cos \phi \quad \dots(47)$$

Nótese que en el caso de un sistema trifásico equilibrado, la potencia instantánea es constante, mientras que en caso de un sistema monofásico la potencia instantánea es una función armónica del tiempo, de frecuencia doble a la del voltaje y la corriente.

Por definición, se llama potencia real trifásica a la suma de las potencias reales de las tres fases. Por lo tanto:

$$P = V_a I_a \cos \phi + V_b I_b \cos \phi + V_c I_c \cos \phi \quad \dots(48)$$

$$P = 3V_a I_a \cos \phi$$

donde V_a es el valor eficaz del voltaje al neutro de una de las fases, I_a es el valor eficaz de la corriente correspondiente y \cos es el factor de potencia.

TESIS CON
FALSA DE ORIGEN

La potencia real trifásica puede expresarse en función del voltaje entre fases, teniendo en cuenta que :

$$V_{ab} = V_a \sqrt{3} \dots (49)$$

Por lo tanto:

$$P = \sqrt{3} V_{ab} I_a \cos \phi \dots (50)$$

Análogamente, se llama potencia reactiva trifásica a la suma de las potencias reactivas de las tres fases:

$$\begin{aligned} Q &= V_a I_a \sin \phi + V_b I_b \sin \phi + V_c I_c \sin \phi \dots (51) \\ Q &= 3 V_a I_a \sin \phi \end{aligned}$$

Expresando la potencia reactiva en función del voltaje entre fases:

$$Q = \sqrt{3} V_{ab} I_a \sin \phi \dots (52)$$

La potencia aparente trifásica es la suma de la potencia aparente de las tres fases.

$$\begin{aligned} S &= V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \\ S &= 3 V_a I_a \dots (53) \\ S &= \sqrt{3} V_{ab} I_a \end{aligned}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. MEDICIÓN FASORIAL

2.1 DEFINICIÓN DE LA MEDICIÓN FASORIAL

Definición de Fasor:

Como se comentó en el capítulo anterior un fasor es un segmento de recta dirigido en el tiempo, cuya magnitud es un parámetro eléctrico. En la figura 2.1 se ilustra la representación de un fasor en el tiempo y con su respectivo ángulo.

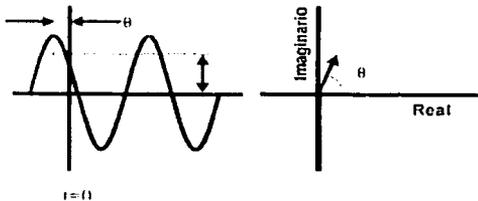
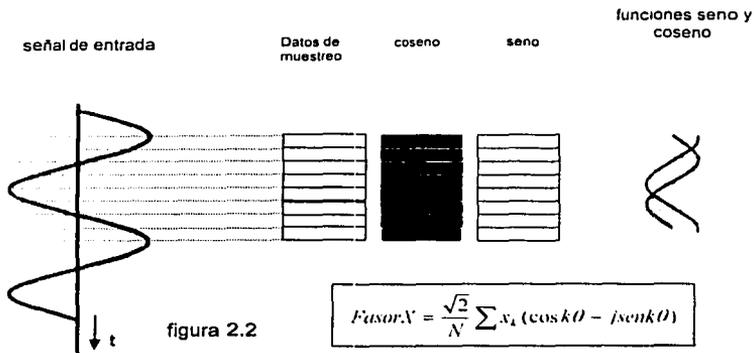


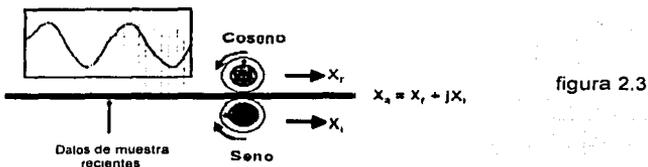
figura 2.1

- El tiempo de salida define el ángulo de la fase del Fasor.
- Esto es arbitrario.
- Sin embargo, las diferencias entre los ángulos de la fase son independientes de la hora de salida.
- Proceso del muestreo, filtro de Fourier para los Fasores.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- Analogía mecánica.

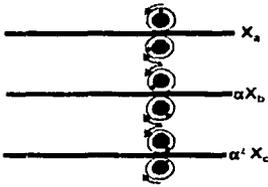


2.1.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS DE FASORES

- Componentes simétricos de los Fasores.
- Podría ser calculado usando la definición.

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Alternativamente, podría también ser calculado directamente por los desplazamientos de fase bien elegidos en los cálculos de Fourier.



Secuencia positiva
 $X = 1/3[X_a + \alpha X_b + \alpha^2 X_c]$

figura 2.4

- La sincronización Fasorial

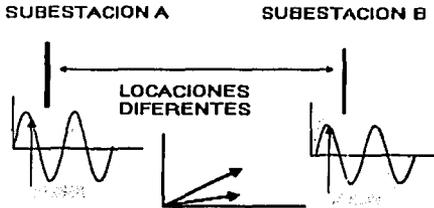


figura 2.5

Sincronizando los procesos del muestreo para diversas señales ¿Cuáles pueden ser cientos de millas aparte, es posible poner su Fasor en el mismo diagrama del Fasor.

- Medición de la Frecuencia con Fasores

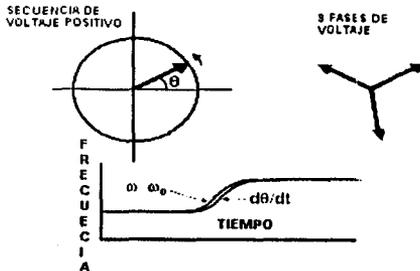


figura 2.6

- Proceso de muestreo, filtros de Fourier para Fasores

Los filtros de Fourier se pueden también describir como:

- Mínimos cuadrados en un período.
- Correlación cruzada con seno y coseno.
- Filtros Kalman (bajo muchas circunstancias)

Fasores del ciclo fraccionario:

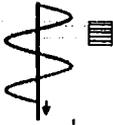


figura 2.7

Retransmisión de alta velocidad

$$X_s - jX_s = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_k (\cos k\theta - j\sin k\theta)$$

Fasor $X = (AX_c + BX_s) + j(CX_c + DX_s)$

- Cálculos no recurrentes del Fasor

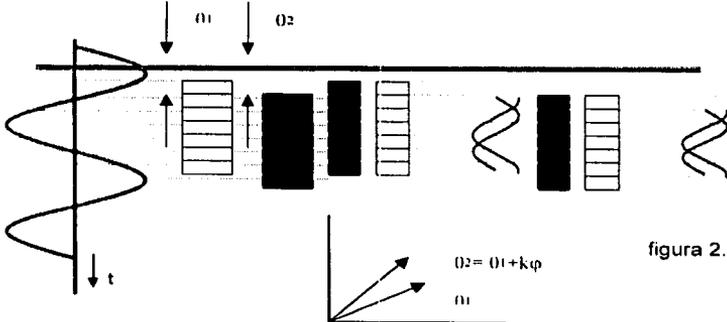


figura 2.8

El Fasor no recurrente rota en las direcciones delanteras, un ángulo de la muestra por muestra.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

- Cálculos recurrentes del Fasor

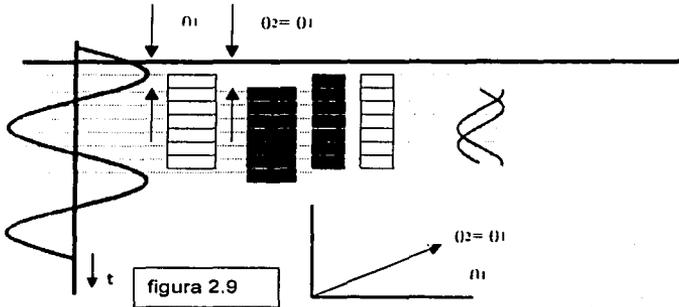
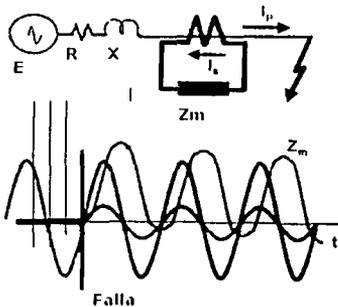


figura 2.9

El resto recurrente del Fasor de referencia si la forma de onda de la entrada es constante.

- Manejo de la compensación de la D.C en la corriente

Circuito mímico



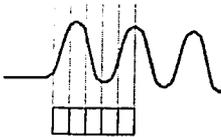
Si $\angle Z_m = \text{atan}(X/R)$
si no se tiene un voltaje de de referencia

figura 2.10

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

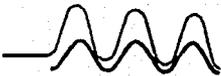
- Manejo de la compensación de la D.C en la corriente

Método de los mínimos cuadrados



$$x(k) = X_C \cos k\theta + X_S \sin k\theta + X_0 r^k$$

$$\begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{matrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & r^1 \\ \cos 2\theta & \sin 2\theta & r^2 \\ \cos 3\theta & \sin 3\theta & r^3 \\ \cos 4\theta & \sin 4\theta & r^4 \\ \cos 5\theta & \sin 5\theta & r^5 \\ \cos 6\theta & \sin 6\theta & r^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ X_S \\ X_0 \end{bmatrix}$$



figuras 2.11 y 2.12

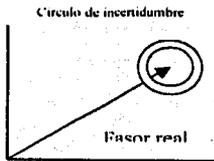
$Y = AX$ en la notación de la matriz

Solución en mínimos cuadrados

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y$$

Sustrayendo off $X_0 r^k$

- Otras fuentes de ruido
- Los armónicos eliminaron correctamente si el criterio de Nyquist está satisfecho
- No componentes de los armónicos
- Ruido al azar



TAMAÑO DEL CÍRCULO DE INCERTIDUMBRE



Medición de datos

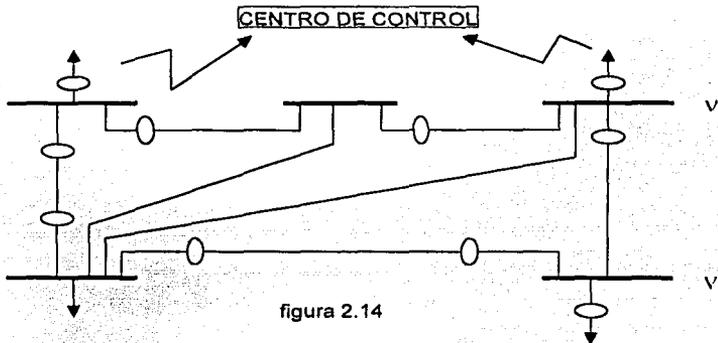
figura 2.13

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2.2. APLICACIONES DE LA MEDICIÓN FASORIAL

2.2.1. ESTIMACIÓN DE ESTADO

Estimación de Estado con mediciones Fasoriales, es el empleo de métodos de estimación basados en cálculos probabilísticos del comportamiento del sistema eléctrico.



Mediciones P y Q

V Medición de voltaje

N Numero de buses

m Numero de mediciones

n Numero de variables de estado

m/n Redundancia global

$$n = 2N - 1$$

$$1.5 \leq m/n \leq 3$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La unidad de la medida del fasor (PMU) establecida en el bus calcula los componentes positivos de la secuencia de:

- El voltaje fasorial de ese bus: $V_i < \theta_i$,
- La corriente fasorial en todas las ramas del incidente de ese bus:

$$I_j < \psi_j \text{ para } j=1, \dots, L$$

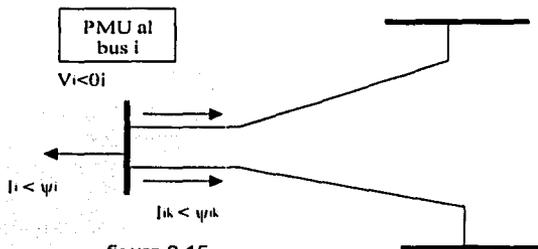


figura 2.15

Estos valores medidos se incorporan en el sistema de la medida y la matriz Jacobiana se amplía por consiguiente

	V_i	θ_i	V_k	θ_k
V_i	1			
θ_i				1
P_{ik}				
Q_{ik}				

Nota: Las celdas correspondientes a P_{ik} y Q_{ik} en las columnas de V_i y θ_i están sombreadas con diagonales.

Porque las mediciones basadas de los PMU's son más exactas que las mediciones basadas en las RTU, ellas serán asignadas desviaciones de estándar más pequeñas.

Consecuentemente, recibirán pesos más altos por el estimador del estado. Los PMU's aumentará la redundancia de la medida en el sistema y de tal modo, mejorará las malas capacidades de detección y de la identificación de los datos del estimador del estado.

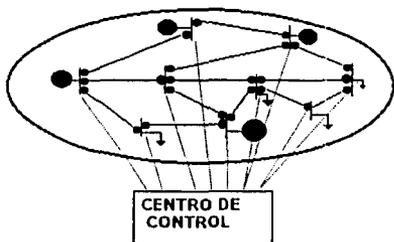


figura 2.16

Las medidas se exploran y no son simultáneas. Las medidas son primaria P, Q, |E| = [Z]. Las medidas son funciones no lineales del estado E: $Z = h(E)$
Iterativo cargó solución de mínimos cuadrados.

$$[Z - Z_k] \approx \left[\frac{\partial h}{\partial E} \right]_k \Delta E_k$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Estimación del estado con medidas del Fasor

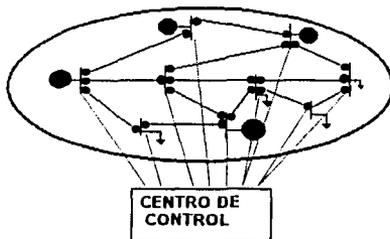


figura 2.17

La secuencia positiva Fasorial es el vector del estado. Porque se sincronizan en la fuente, son simultáneos sin importar la comunicación de la velocidad. La redundancia en la medida es proporcionada por las medidas positivas de la corriente de la secuencia..

- Estimación del estado con medidas del Fasor

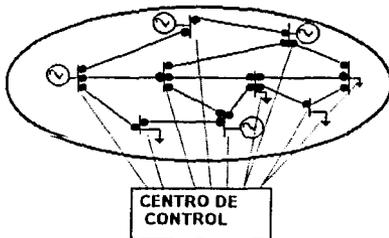


figura 2.18

Desde las corrientes y los voltajes están relacionados linealmente al vector del estado. Las ecuaciones del estimador son lineales, y no se requiere ninguna iteración.

$[Z]=[A] [E]$, y cargado la solución de mínimos cuadrados se obtiene de nuevo con una matriz constante del aumento.

- Estimación del estado con medidas del Fasor



figura 2.19

¿Es posible obtener Fasores de localizaciones extensamente separadas?

¿Cuántos PMU's debe ser instalados? Para la observancia completa, cerca de 1/3 del número de buses (junto con las corrientes en todas las líneas conectadas) en la necesidad del sistema de ser supervisado.

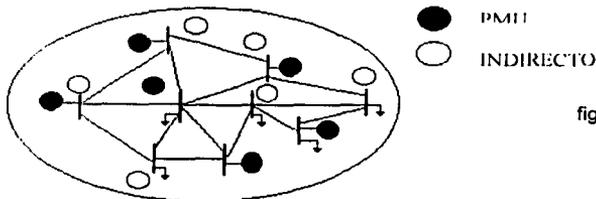


figura 2.20

- Estimación del estado con medidas del Fasor

Colocación de PMU para la observancia y la interpolación incompletas de estados inadvertidos:

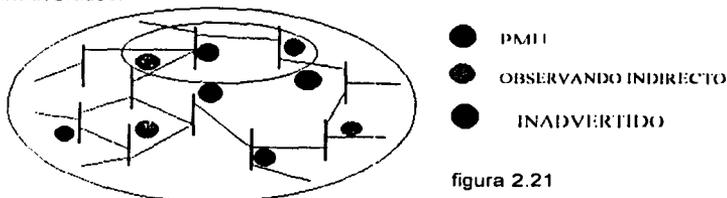


figura 2.21

El sistema inadvertido se puede aproximar por la interpolación del sistema observado.

$$[E_{\text{INADVERTIDO}}] = [B][E_{\text{VECINOS}}]$$

- Control mejorado con Fasores sincronizados

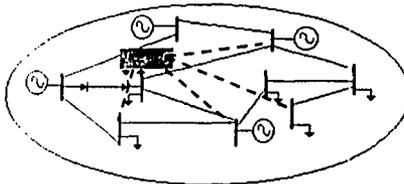
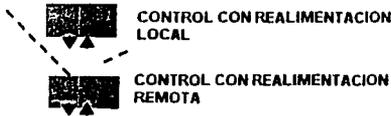


figura 2.22



Los Fasores pueden obtener el control continuo con un estado latente de la orden de 50 milisegundos para el mejorado del control de realimentación.

- Control mejorado con Fasores sincronizados.

Estudio del estabilizador del sistema de energía (Snyder, INPG, Edf)

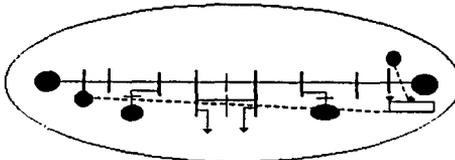


figura 2.23

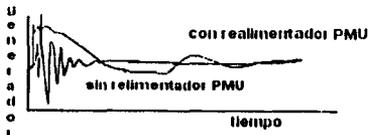
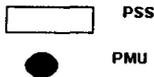


figura 2.24

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Control mejorado con Fasores sincronizados

Plan de Defensa (Edf)

PMUs distribuidos en siete regiones del país ,diferencias en tiempo real del ángulo de la fase de una región con el resto de los monitores del país en el centro. Las líneas de lazo de la región rota con el resto del país desconectado si la separación del ángulo excede límites.

- Control mejorado con Fasores sincronizados

Otros estudios del control:

Control de la excitación con la regeneración del Fasor:

Mark Smith

Control terminal de la HVDC con la regeneración del Fasor:

Niusha Rostamkolai

Control de la línea de la HVDC en sistema de WSCC:

James Throp

- Control mejorado con Fasores sincronizados

Supervisión en tiempo real para la estabilidad del voltaje y el progreso del control(en, el Tecnológico de Virginia y la Universidad de Estado de Iowa).

Sistema de Energía



Estado basado en
las medidas del fasor

Jacobiano

Entradas fuera de línea



Estimador del margen



Margen a ala inestabilidad del voltaje

Contamedidas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.2. PROTECCIONES ADAPTATIVAS

- Protección adaptante con Fasores sincronizados

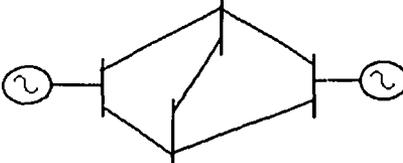


figura 2.25

La oscilación transitoria de la estabilidad expone los relés de la distancia a los viajes posibles

- Protección adaptante con Fasores sincronizados

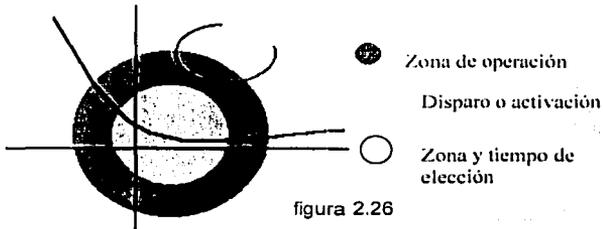


figura 2.26

- Protección adaptativa con Fasores sincronizados

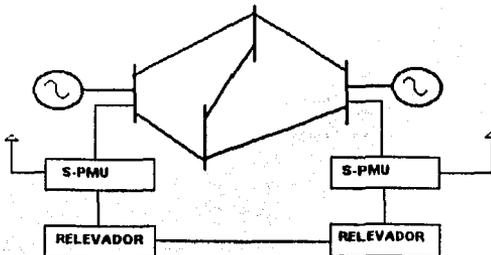


figura 2.27

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Protección adaptante con Fasores sincronizados

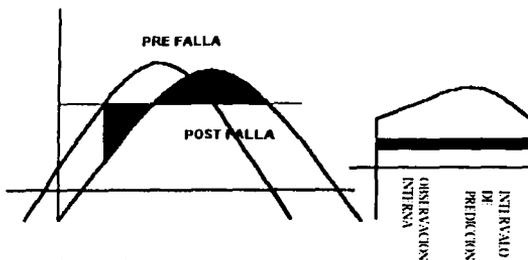


figura 2.28

Perspectivas futuras

- La tecnología de PMU continúa avance.
- Sincronizador fasorial con formato IEEE .
- Taller y simposios sobre las medidas de Fasores y sus usos.
- Actividad en la valoración del estado con Fasores.
- Usos del control y de la protección

¿CÓMO REPRESENTAR EL ÁREA FASORIAL?

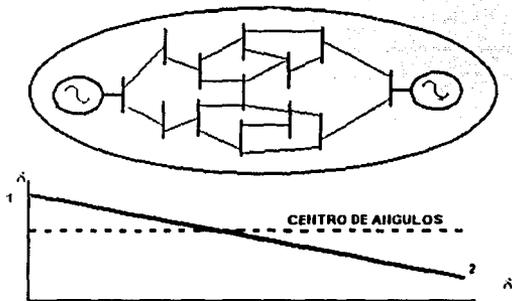


figura 2.29

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

¿CÓMO REPRESENTAR EL ÁREA FASORIAL?

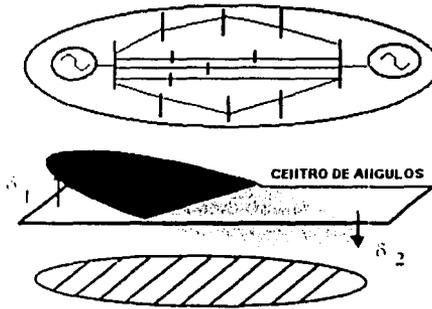


figura 2.30

2.3. TENDENCIAS FASORIALES A NIVEL MUNDIAL COLAPSO DE VOLTAJE Y MEDICIONES FASORIALES

DISTURBIOS AMPLIOS DEL ÁREA

- Tamaño grande, topología que cambia, transacciones complejas de la energía.
- Consecuencia de la inhabilidad de proteger con la información local solamente: Apagones.
- Progresos de las nuevas estrategias para el control del sistema //a separación //a protección.
- Utilización del hardware nuevo para supervisar, la sincronización y la comunicación.

REQUISITOS

- Mediciones rápidas.
- Comunicaciones confiables y rápidas.
- Central eficiente, o proceso distribuido de la información amplia del sistema.
- detección exacta de problemas.
- Reacción rápida en un nivel de sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- El seguir en tiempo real del balance de energía

COMPAÑÍAS DE ELECTRICIDAD REESTRUCTURADAS

Protección del área y control amplios de la emergencia

- Motivación: Incidentes recientes.
- Conocimiento de limitaciones de las técnicas actualmente usadas.
- Conocimiento de tecnologías avanzadas.
- Conocimiento de la zona central: Cuál estará disponible mañana

El costo de interrupciones de la energía a las compañías de la energía y a sus clientes:

\$26 billones/ año en U.S

5-16 centavos por kWhr.

El apagón de la Ciudad de Nueva York de 1977 costó \$350 millones de dólares.

El 10 de Agosto de 1996 una interrupción en California solo costo \$1 billón de dólares.

El reducir la capacidad normal del costo inicial \$1millon/día en California /Oregon es el costo más alto de energía y de réditos perdidos.

La interrupción de 20 minutos en la fabricación del circuito integrado = \$30 millones

- La capacidad de transmisión es una cantidad que varía del tiempo
 - Estructura de la red
 - Los dispositivos del control
 - La tendencia de la carga

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Análisis del estado constante:**ASUNTOS DE LA INVESTIGACIÓN**

- ¿Qué tan lejos está el sistema del límite de cargabilidad ?
- Los márgenes directos o indirectos.
- Las tendencias en variaciones de la carga necesitan un cierto pronóstico
- problema desafiador
- Vierta la carga o aplique los controles para mantener el suficiente margen.

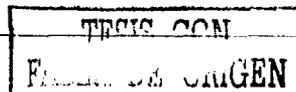
Análisis del estado constante

¿Cómo alcanzar cargabilidad al colapso de voltaje?

- Aumento de la carga contra aumento del MW:
 - mientras sinónimo $Z_{app} > Z_{crit}$
- Reducción en Z_{app}
 - Más dispositivos de carga de encendido
 - Comportamiento dinámico de la carga
 - Regulador del voltaje, ej., cambiadores del golpecito
- Derrumbamiento de aceleración del voltaje

Análisis del estado constante**FLUJOS DE ENERGÍA CONTINUOS**

- Modelo de Sistema del Estado Constante: Análisis de flujo de energía como herramienta universal.
- Sistema de ecuaciones algebraicas no lineales
- Soluciones: Métodos de la trayectoria (continuación)
- De gran alcance, robusto, conveniente para el análisis de problemas condicionados.



ESENCIAS DE LA TÉCNICA

- Método de Newton: Solución iterativa para las ecuaciones no lineales
- Ventajas: Velocidad, exactitud, buena convergencia
- Desventajas: Convergencia a una sola solución
- Problema: Resolver las ecuaciones no lineales alrededor de soluciones múltiples.

$$3 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} - y^2 - 4y - 3 + \lambda = 0$$

$$\lambda - 3 - 4y - y^2 + y' + 3y' = 0$$

FLUJOS OPTIMOS DE POTENCIA: EL PROCEDIMIENTO

- A: Punto de partida inicial.
 B: Paso de estimación.
 C: Paso del corrector.
 D: Nueva interacción.
 E: Solución final.

EL PASO DE ESTIMACION

- Tangente de la dirección a la curva: Múltiple lineal
- Fuente: Matriz Jacobiana del sistema.
- Parámetro Variable: Demanda del sistema de energía.
- Primera aproximación de la orden a la solución para un diverso valor de parámetros.
- Ediciones: Eligiendo una dirección, una medida de paso(usando la curvatura de la información).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CONTROL DEL TAMAÑO DE PASO

- Esencial para la puesta en práctica acertada.
- Cambiar: Pasos pequeños demasiado costosos de cómputo, los grandes problemáticos.
- Curvatura: Para las regiones lineales cercanas, el tamaño de paso grande es aceptable.
- Solución: Ajuste adaptante del tamaño de paso usando curvatura y # de iteraciones en el paso del corrector.

REDUCCIÓN DEL VOLTAJE

- Medida impopular.
- Favorable al vertimiento de carga.
- Alza del voltaje del uso de algunas utilidades (Australia) para aumentar beneficios.
- Puede ayudar:
 - Evite la generación en los picos.
 - Prevenga las inestabilidades del voltaje.
- Satisfacción de cliente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3. MEDICION FASORIAL EN MEXICO

3.1 EQUIPO EMPLEADO PARA LA MEDICIÓN FASORIAL

Para la medición fasorial existe un equipo llamado PMU (Phasor Measurement Phasor), el cual se define como unidad de medición fasorial. Para procesar y convertir las señales de entrada utiliza la secuencia positiva. El PMU es capaz de registrar disturbios del sistema eléctrico de gran duración y su formato de salida es un número complejo, es decir, una parte real y la otra imaginaria de voltajes de bus y corrientes de línea, y otra principal característica es que el PMU usa una señal de reloj GPS¹, en donde se podrá sincronizar con otras unidades fasoriales.

UNIDADES DE MEDICION FASORIAL

Las principales funciones del PMU las podemos mencionar como se muestran a continuación:

- Acondicionamiento de señales
- Sincronización de muestreo
- Procesamiento de datos
- Registro de información de datos
- Comunicación externa

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Las señales de entrada que son requeridas son las Analógicas y Digitales.

- Dentro de las señales analógicas manejamos:
 - Filtros anti-aleatorios
 - Aislamiento de señales
 - Convertidor analógico /digital (A/D)

¹ GPS Global Positioning System

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Entradas de voltaje y corriente

➤ Dentro de las señales digitales manejamos:

Aislamiento

Circuito de rebote

Muestreo sincronizado a señal analógica de Filtros Anti-aleatorios

SERIE DE FOURIER.

Debido a varias razones las señales consideradas por los relés protectores no son senoidales puras. El contenido no fundamental de la frecuencia del voltaje y de la corriente considerados por un relé no es realmente periódico sino cambio en el tiempo.

La serie de Fourier proporciona una técnica para examinar estas señales y determinar su contenido armónico. El objetivo del análisis de Fourier es descomponer una señal periódica arbitraria en componentes como:

$$r(t) = \sum_{k=-N}^{k=N} c_k e^{jk\omega_0 t}$$

Un $r(t)$ de la señal se dice para ser periódico si hay un T tal que:

$r(t) = r(t+T)$; para toda T .

Si $r(t)$ es periódica y no una constante entonces se convierte en el valor positivo más pequeño de T para el cual la ecuación antes dicha está satisfecha. Se llama el período fundamental del $r(t)$.

Ej:

Si $r(t) = \text{sen}(\omega_0 t)$ entonces la ecuación anterior está satisfecha para:

$$T = 2\pi / \omega_0$$

Se asocia al período fundamental una frecuencia fundamental

$$\omega_0 = 2\pi / T_0$$

SERIE DE FOURIER EXPONENCIAL

Dada una señal periódica con la frecuencia fundamental ω_0 la serie de Fourier exponencial se escribe como:

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} c_k e^{jk\omega_0 t}$$

La podemos manejar:

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} r(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

La ecuación antes dicha se puede evaluar sobre cualquier período que sea conveniente.

Ej. Considere la onda cuadrada demostrada en la figura 3.1 siguiente:

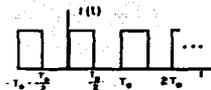


fig 3.1

Calcularemos los coeficientes de la serie de Fourier Exponencial.

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} e^{-jn\omega_0 t} dt = \left[\frac{e^{-jn\omega_0 t}}{-jn\omega_0} \right]_0^{T_0} = \left[\frac{e^{-jn\omega_0 T_0} - 1}{-jn2\pi} \right] = \left[\frac{e^{-jn\pi} - 1}{-jn2\pi} \right] = \frac{(-1)^n - 1}{-jn2\pi}$$

$$= \frac{1}{jn\pi}; n \text{ impar}$$

$$= 0; n \text{ iguale, } n \neq 0$$

$$c_0 = \frac{1}{2}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El coeficiente c_0 (el valor medio de la señal) se debe evaluar con frecuencia por separado.

Las aproximaciones formadas por la suma finita:

$$r(t) = \sum_{k=-N}^{k=N} c_k e^{jk\omega_0 t}$$

Para $N=1, 3$ y 5 mostradas en la figura 3.2:

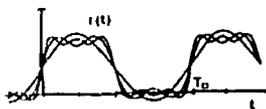


Fig 3.2 Aproximaciones finitas de la serie de Fourier a la onda

cuadrada

Como podemos ver de la figura 3.2, pues aumentamos N la aproximación consigue más cercano a la onda cuadrada periódica.

SINCRONIZACION DE MUESTREO

En esta etapa se sincronizan diferentes muestras para señales que viaja en el tiempo, la cual requiere de señales de reloj muy precisa como son:

GPS

Su siglas en inglés son: Global Positioning System o Sistema Global de Localización

El reloj GPS:

- Genera un pulso por segundo
- Precisión de ± 100 nanosegundos
- Señal de tiempo
- Circuito de muestreo
- Pulsos de muestreo
- Precisión de ± 1 microsegundo

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Se requieren la ubicación de 4 satélites como mínimo para su localización en latitud, altitud y hora, pero solo con un satélite es requerido para la sincronización en tiempo.

Ventajas del GPS sobre otros medios de sincronización

- Sistema global
- Bajo costo de receptor
- Alta precisión
- Acceso con mínimas restricciones

Una de las funciones es la sincronización, es decir, al tener dos puntos de medición, subestación A y subestación B poder comparar las señales ya que al tener un tiempo de inicio las poder sincronizar y así calcular su diferencia angular., figura 3.3

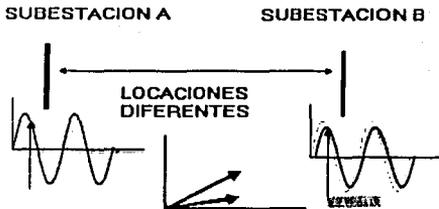


figura 3.3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos se base en la implementación de un algoritmo no recursivo y calculo de componentes simétricas, el procesador tiene una alta velocidad el cual nos dará como resultado el fasor de voltaje o corriente de falla antes y después del disturbio, también debido a la presencia de un reloj preciso

GPS y el voltaje de bus se obtiene la frecuencia del sistema eléctrico, la diferencia angular entre dos subestaciones o sistemas eléctricos, como se muestra en la figura 3.4.

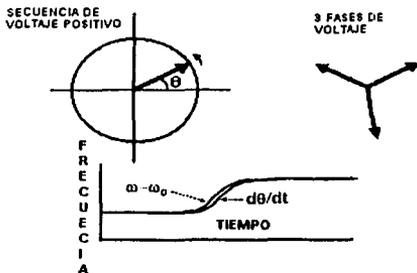


figura 3.4

REGISTRO DE DATOS

El PMU registra fasores de voltajes de bus y corrientes de línea, frecuencia del sistema, diferencia angular, df/dt , medición de armónicas en la red eléctrica, estado de los interruptores; todo esto antes y después de un disturbio.

Los registros son depositados en un archivo con formato: hora de evento, fasor (magnitud y ángulo), estado de los interruptores (1 cerrado, 0 abierto), canales o fases de falla de varios minutos de duración. Y en otros casos son enviados vía modem a un equipo que estará registrando todas las señales de cada PMU, a este equipo se le conoce como Concentrador de Datos, el cual tendrá la función de procesar los fasores, sincronizarlos y calcular la diferencia angular del sistema.

COMUNICACIÓN

El PMU tiene 4 puertos serie, los cuales se utilizan para comunicarse con otros equipos vía modem, y tarjeta Ethernet para comunicarse en forma local a computadora local o red a concentrador o computadora maestra, o para su función configurares vía remota.

HISTORIA DEL PMU

El primer prototipo del PMU fue realizado en el Politécnico de Virginia: (1986-1992) el cual usaba Filtros antialeatorios de mucha precisión con una velocidad de muestreo de 720 Hz, 15 canales analógicos, convertidor A/D de 12 bits, Fasores de secuencia positiva, disparo en un solo fasor, 4 Meg. de RAM, GPS y condicionador de señal externa, comunicación en serie a 14400 Baud.

Se desarrollaron después para la empresa eléctrica Norteamericana Boneville Power Administration (BPA) 3 Unidades de estudios 5 unidades, para el monitoreo de línea de 750 Kv.

Las unidades comerciales tienen las siguientes características:

- Velocidad de muestreo 2880 Hz.
- 30 Canales analógicos, 32 digitales
- GPS y condicionador de señal incorporado
- A/D de 16 Bits Sigma Delta
- Reduce requerimiento de filtro-Antialeatorio
- Disparos en todos los fasores
- Disco Rígido, 4 Meg RAM
- Comunicación en serie
- Comunicación via ethernet

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En los siguientes países el PMU utiliza GPS para su sincronización:

Estados Unidos	Canadá
México	Australia
Sur África	Francia

Para una sincronización independiente se utiliza en los países de:

Estados Unidos	Francia
Japón	España

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Área Central se tienen instalados tres PMU's, en las subestaciones de Texcoco, Tula y Salamanca.



Mapa 3.2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Área Occidental se tiene un PMU, en la subestación LAZARO CADENAS



Mapa 3.3

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En el Área Sureste se tienen un PMU, en la subestación MANUEL MORENO TORRES.



Mapa 3.4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Área Oriental se tienen tres PMU's, en la subestación POZA RICA DOS Y TEMASCAL DOS y TRES ESTRELLAS.



Mapa 3.5

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Área Norte se tiene dos PMU's, en la subestación GOMEZ PALACIO y SAMALAYUCA



Mapa 3.6

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Área Noreste se tienen dos PMU's, en la subestación HUINALA Y RIO ESCONDIDO.



Mapa 3.7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el Área Noroeste se tienen dos PMU's, en la subestación MAZATLÁN DOS y HERMOSILLO V.



Mapa 3.8

TESIS CON
VALOR DE ORIGEN

En el Área Peninsular se tienen dos PMU's, en la subestación ESCARCEGA y VALLADOLID.



Mapa 3.9

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3. APLICACIONES DE LA MEDICION FASORIAL EN CFE

3.3.1 Como registrador de eventos

El PMU se ha utilizado en la CFE como un registrador de eventos, es decir, al existir una falla el lo registra y varios días después se analiza el contenido de su información para un estudio a detalle.

Debido al modelo que se tiene actualmente es necesario ir a extraer la información personalmente ya que el equipo tiene un disco duro para el almacenamiento de los eventos, y hace unos meses se extrae en forma remota via Ethernet.

3.3.1.1 Por voltaje

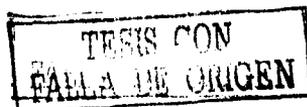
El PMU tiene varias formas de arranque ante un disturbio del sistema eléctrico, uno de ellos es cuando el voltaje de bus se ajusta a que al variar en un $10\% \pm$ el valor nominal se viole, entonces el equipo podrá registrar parte del estado de pre-falla y de post-falla, y esto se ajustará a un determinado tiempo, que varía de unos segundos a varios minutos.

3.3.1.2 Por corriente

El PMU también puede activarse cuando la corriente de línea se ajusta a que al variar en un $+10\%$ y 0 amperes el valor nominal se alcance, entonces el equipo podrá registrar parte del estado de pre-falla y de post-falla, y de igual forma se ajustará a un determinado tiempo, que varía de unos segundos a varios minutos dependiendo la duración del evento.

3.3.1.3 Por frecuencia

El PMU también puede activarse cuando la frecuencia del sistema eléctrico varíe, este valor anda entre $0.2 \text{ hz} \pm$ de los 60 hz, entonces el equipo podrá registrar parte del estado de pre-falla y de post-falla, y de igual forma se ajustará a un



determinado tiempo, que varía de unos segundos a varios minutos dependiendo la duración del evento, y dará como registros fasores de voltaje y corriente que en ese momento mida, aunque el arranque del equipo sea por frecuencia y no por voltajes y corrientes.

3.3.2 Protección con medición fasorial.

Dentro de las protecciones el empleo de la medición fasorial se prevé un gran avance, ya que se tiene pensado utilizar en México las Protecciones Adaptivas, esto es, que el PMU sea el que de la pauta para ajustar las protecciones ante un sistema eléctrico cambiante, como sucede al estar manejando bloques de generación horarias y que se traslapen con intercambio en líneas de enlaces. Entonces es cuando se tiene la doble función del PMU: reajustar al relé para una buena operación.

3.3.3 Control con medición fasorial.

Dentro de la parte de Control el PMU mandará señales a equipos como los PLC (Programador Lógico Programable), ya sea para subir y bajar generación dependiendo de la demanda del Sistema, o para un control de voltaje en puntos críticos de la red y coordinarse con los diferentes CEV's instalados en la red eléctrica nacional, para el control de reactivos por zona, y una parte importante será la segregación de áreas ante una eventos de gran magnitud, esto podrá ayudar a crear islas eléctricas y restablecer en menor tiempo la falla.

Al utilizar los PMU's la parte de suma importancia son los medios de comunicación ya que por ellos se enviarán las acciones que el PMU genero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. EXPERIENCIA DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD EN MEDICIONES FASORIALES

4.1. CRITERIOS PARA LA ASIGNACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN FASORIAL (PMU)

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN), esta formado por un sistema interconectado Nacional (SIN) y dos Sistemas Aislados, que en razones de tiempo y maniobras se convierten en uno.

Esto trae como consecuencia tener un sistema débil eléctricamente, ya que sus distancias eléctricas son grandes debido a que sus puntos de generación están retirados de las grandes centros de carga.

Los niveles de voltajes en la red de transmisión que maneja CFE son de 400 kV, 230 kV, y se consideran subtransmisión para los niveles de 161 kV, 115 kV.

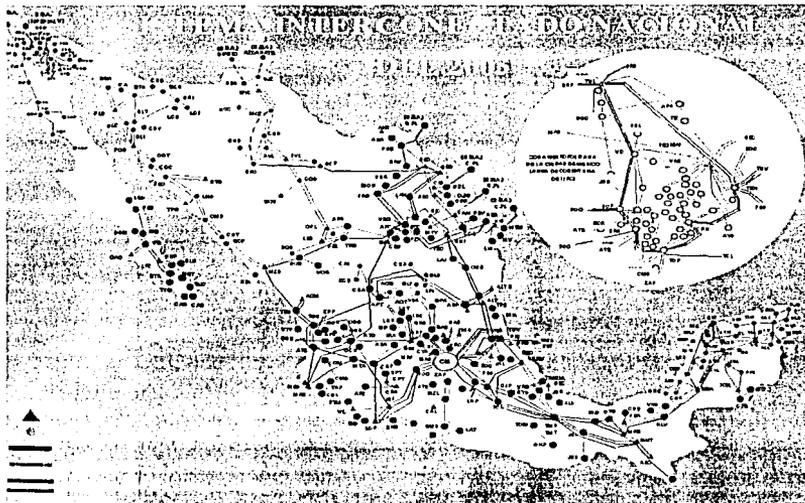
Se tiene 13,695 km de líneas de transmisión de 400 kV, 22,644 km de líneas de transmisión de 230 kV, y para los niveles de 161 kV y 115 kV es un dato variable, ya que el incremento en este nivel de voltaje no refleja el crecimiento real de la red Eléctrica Nacional, debido a la transferencia del proceso de transmisión a distribución.

Como se puede ver se tiene una gran responsabilidad el proteger el Sistema Eléctrico Nacional, lo cual lleva a tener una optima localización de los PMU's, como son:

- Sitios de generación claves
- Áreas de mayor carga
- Puntos críticos de interconexión
- Puntos de mayor riesgo de estabilidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

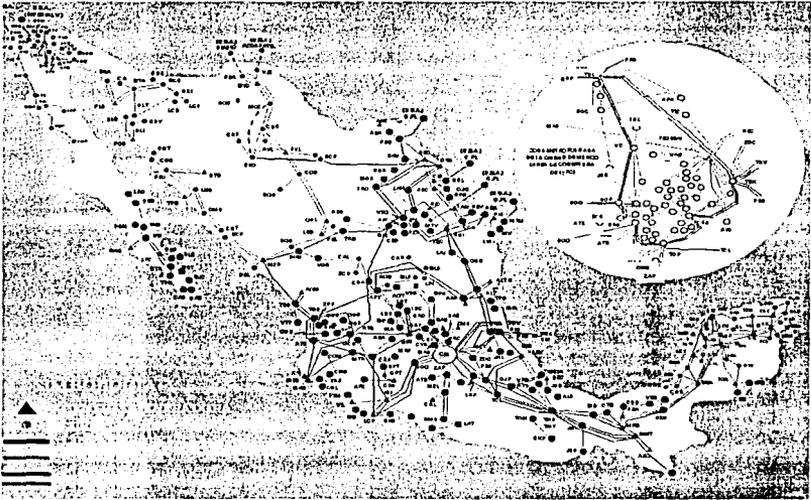
4.1.1 SISTEMA INTERCONECTADO



Mapa 1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1.2 NIVEL DE TENSIÓN 400 KV Y 230 KV



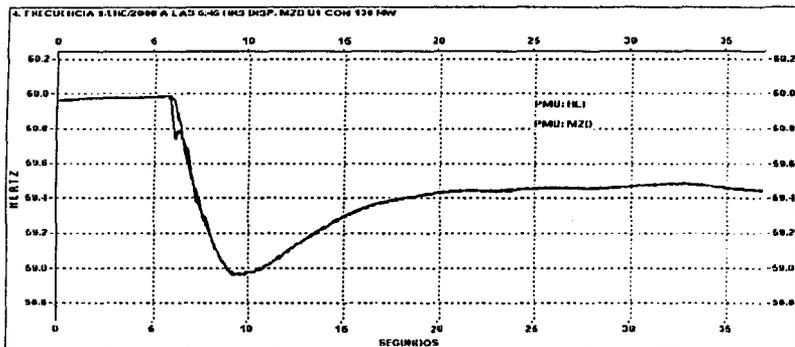
Mapa 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1.3 SISTEMAS AISLADOS

4.1.3.1 SISTEMA SONORA-SINALOA

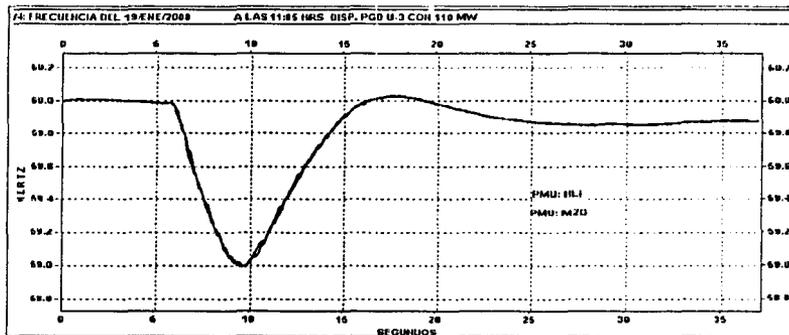
Gráfica 1



Mapa 3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tenemos un evento registrado en el sistema Noroeste, el 9 de enero del 2000 a las 5:45 hrs con disparo de la unidad 1 de Mazatlán con 130 MW, la frecuencia estaba en los 59.98 Hz. y ante la pérdida de generación cae a los 59.0 Hz., observándose un pequeño escalón en la gráfica del PMU de Mazatlán, esto debido a que los controles de generación se ven afectados.



Gráfica 2

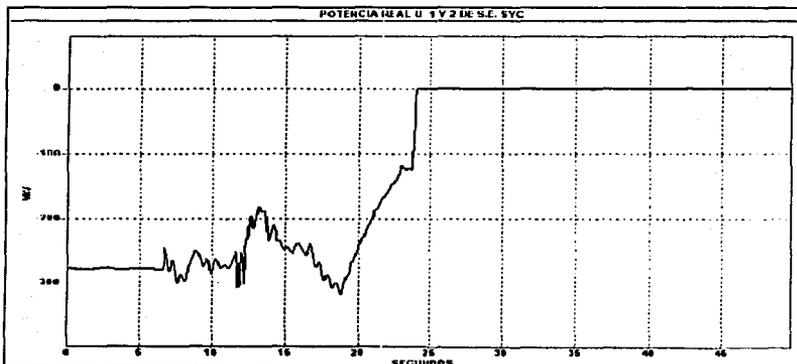
Aquí se tiene una pérdida de generación de 110 MW de la unidad 3 de puerto Guaymas Dos el 19 de enero del 2000 a las 11:05 hrs., teniendo una frecuencia de 60 Hz. y bajando a 59.0 Hz. teniendo una respuesta inmediata ante la regulación primaria de las máquinas, esto es debido a que el área Noroeste es pequeño y sus inercias son menores, por lo que las respuestas de sus máquinas son buenas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ante la entrada de Mérida Potencia, como se puede ver es un rechazo de carga para el Sistema Interconectado Nacional, ya que el área peninsular es una carga, registrando una frecuencia de 61.75 Hz, este evento fue captado por el PMU de Valladolid, y teniendo más de 180 segundos con una frecuencia arriba de los 60 Hz, en este evento solo lo registro un solo PMU que forma parte del área Peninsular.

4.2. REGISTROS DE FALLAS EN EL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

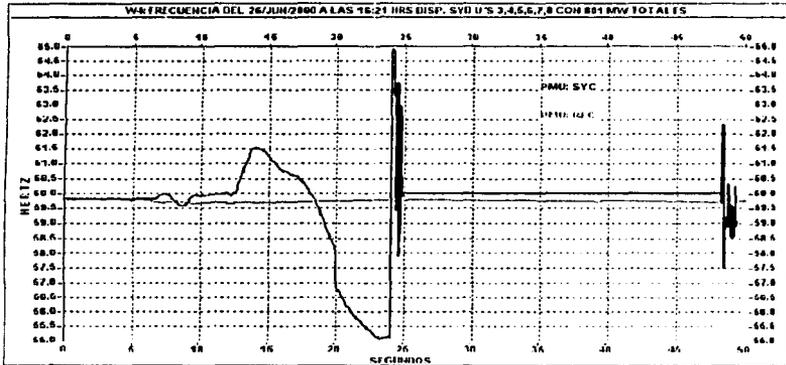
4.2.1. FALLAS POR PERDIDA DE GENERACIÓN



Gráfica 4

El evento ocurrió el 26 de junio del 2000 a las 16:21 hrs, disparándose las unidades: 3, 4, 5, 6, 7, 8 de la planta de Samalayuca Dos y las unidades 1, 2 y 3 de Samalayuca, en el área Norte del sistema, con una pérdida total de 801 MW, esto se debió a la caída de 5 torres de transmisión y separándose la sub-área Juárez.

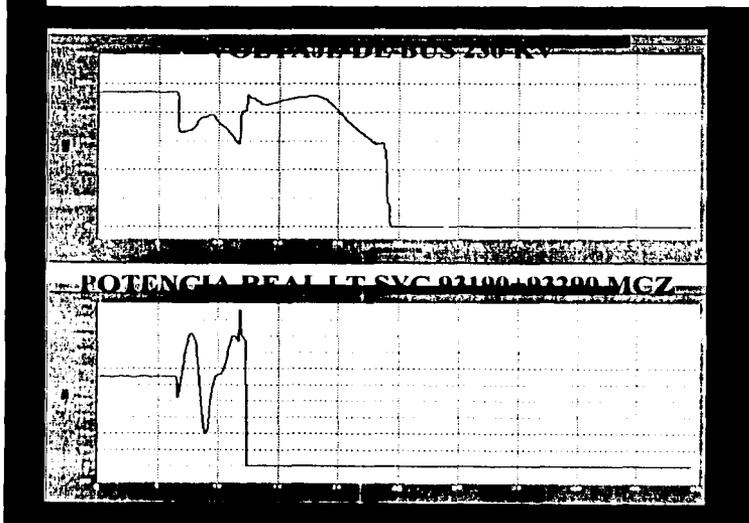
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gráfica 5

Como se puede ver en la siguiente gráfica:

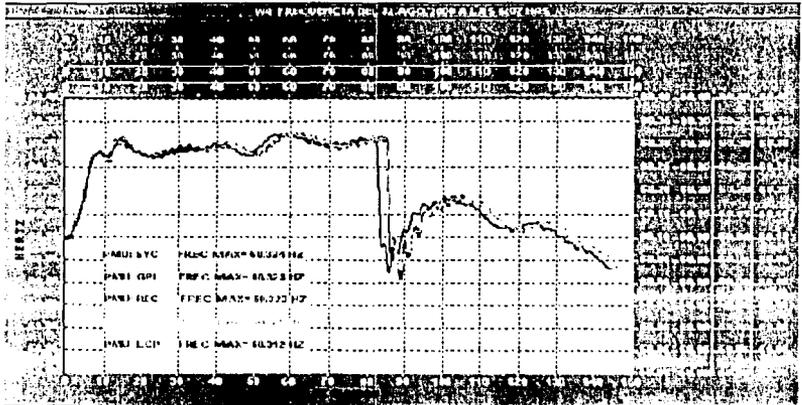
Gráfica 6



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La frecuencia del sistema estaba en los 59.89 Hz, detectado por los PMU de Rio Escondido, ubicado en Piedras Negras, Coahuila, y el otro PMU de Samalayuca, observándose que a los 6 seg se separan el área Norte del sistema interconectado y el área Noreste es el que se queda midiendo la frecuencia del Nacional. La frecuencia del área Norte llega 61.5 Hz ante un rechazo de carga y después a 55.2 Hz ante la pérdida de generación, después el PMU arroja un valor de frecuencia no valido debido a que el área se quedo sin energia.

4.2.2. FALLAS POR PERDIDA DE CARGA



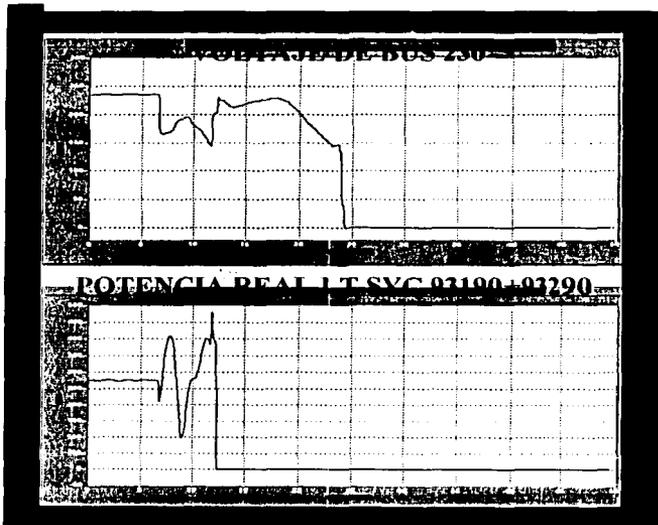
Gráfica 7

Aquí tenemos un registro ocurrido el 22 de agosto del 2000 a las 6:07 hrs en el área Central, donde se pierden 360 MW de carga, los equipos que registraron el eventos fueron:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El PMU de Samalayuca, Gómez Palacio, Río Escondido, Huinala y Lázaro Cárdenas, observando una frecuencia máxima de 60.324 Hz. En esta ocasión se pudo sincronizar los PMU's gracias a que tiene un reloj GPS.

4.2.3. FALLAS POR SALIDA DE LINEAS DE TRANSMISIÓN

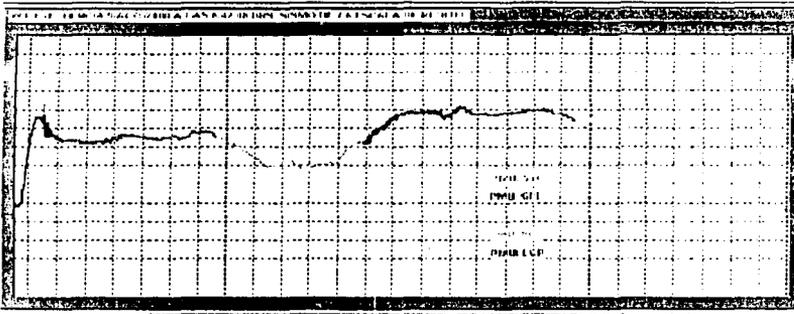


Gráfica 8

Este evento ocurrió como ya se menciona anteriormente el día 26 de junio del 2000 a las 16:21 hrs, disparándose un total de 801 MW esto se debió a la caída de 5 torres de transmisión y separándose la sub-área Juárez. Las líneas llevan un total de 280 MW de Samalayuca a Moctezuma, las líneas 93190 y 93290 de 230 kV, a las 8 segundos bajan su potencia 200 MW y un segundo después llegan a transmitir 400 MW, para después a los 9 segundos bajar su potencia a 100 MW y a los 13 segundos llegar a transmitir 500 MW y después dispararse.

4.2.4. FALLAS POR CAUSAS NATURALES

4.2.4.1. FALLAS POR SISMOS



Gráfica 9

Se registro un sismo de 7.0 en la escala Richter el 9 de agosto del 2000 a las 6:42 hrs en las costas de Guerrero, este evento es similar al de un rechazo de carga , en donde la frecuencia llega a los 60 53 Hz, y fue registrado por los PMU's de: Samalayuca, Gómez Palacio, Huinala y Lázaro Cárdenas, observándose que como el epicentro fue en las costas de Guerrero el PMU de Lázaro Cárdenas, se pude ver un pico en la frecuencia, esto es a las 4 unidades que estaban generando con 350 MW c/u, ante la entrada del pico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

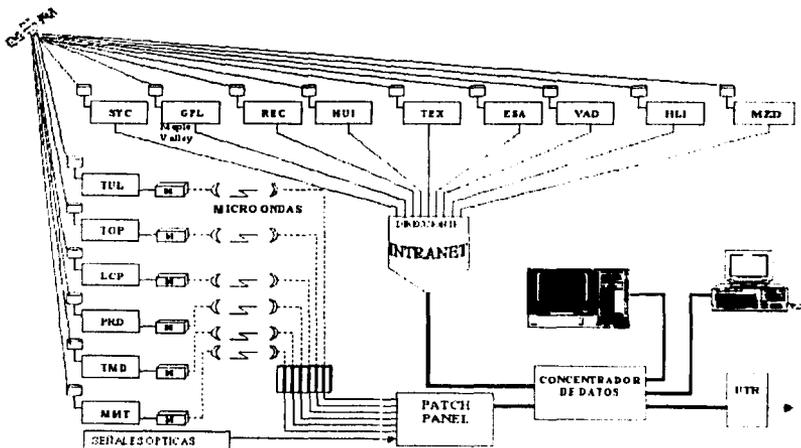
4.3. APORTACIONES REALIZADAS POR LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD EN EL MONITOREO DE LA MEDICION FASORIAL EN TIEMPO REAL

4.3.1. COMUNICACIÓN LOCAL

La comunicación es a través de una PC en forma directa o por medio de una red local.



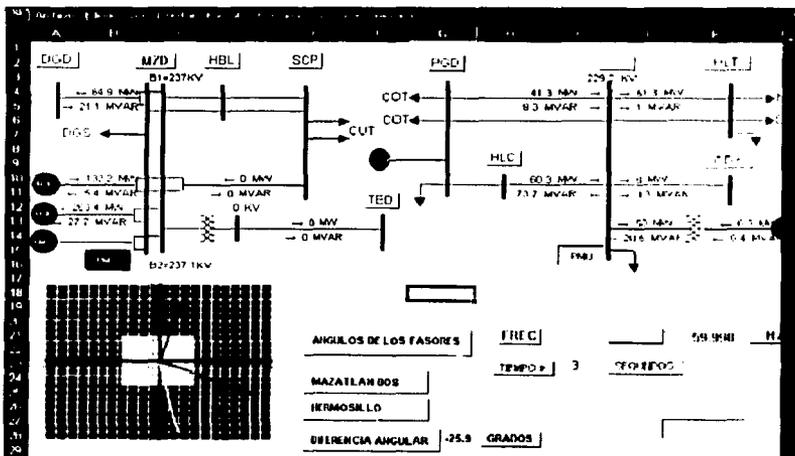
4.3.2. COMUNICACIÓN VÍA TCP/IP



ESTACIONES CON FALLA DE ORIGEN

se muestra una configuración del sistema de comunicación propuesto por la CFE para sincronización en línea de los equipos PMU a nivel Nacional, en donde se puede ver cada uno de ellos en una configuración TCP/IP y líneas telefónicas para un respaldo en la comunicación a través de MODEM, aquí se podrá analizar en tiempo real los eventos y acciones o para un estudio detallado con simulaciones y registros de otros equipos o relés.

4.3.3. ANÁLISIS DE LAS FALLAS CON MEDICIÓN FASORIAL



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Mérida Potencia fuera de servicio:

El Sistema Interconectado Nacional, a través de las líneas de transmisión 93810 y 93820 de Escárcega a Kilómetro Veinte y Escárcega a Mascuspana respectivamente envían un flujo de potencia al Sistema Peninsular de 260 MW.

Mérida Potencia con 245 MW generando:

Turbina de gas1 Y Turbina de gas2 con u total de 160 MW

Unidad de vapor con 170 MW

El Sistema Interconectado Nacional, a través de las líneas de transmisión 93810 y 93820 de Escárcega a Kilómetro Veinte y Escárcega a Mascuspana respectivamente envían un flujo de potencia al Sistema Peninsular entre 15 y 50 MW.

Mérida Potencia a máxima generación con 490 MW:

El Sistema Interconectado Nacional, a través de las líneas de transmisión 93810 y 93820 de Escárcega a Kilómetro Veinte y Escárcega a Mascuspana respectivamente recibe ahora un flujo de potencia del Sistema Peninsular de 230 MW.

Se tiene que para las líneas de 230 kV se tienen las siguientes protecciones:

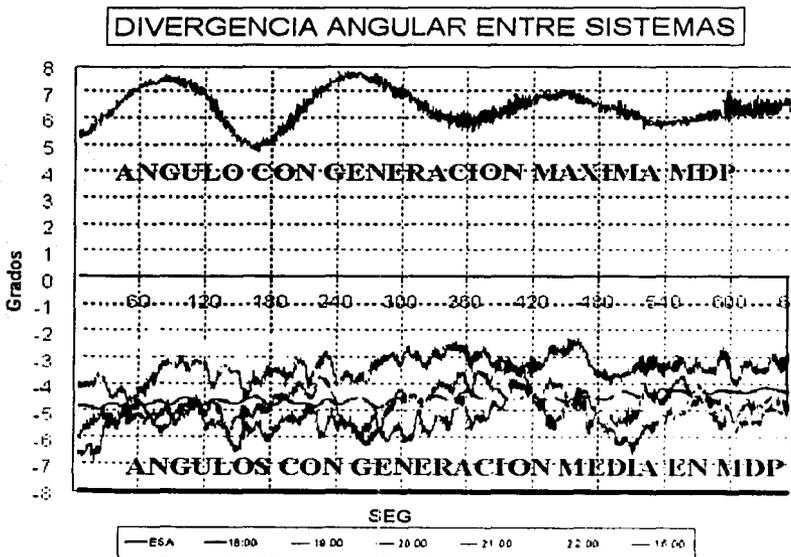
- PROTECCION DE DISTANCIA (21)
- PROTECCION DE SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL (67 N)
- RECIERRE MONOPOLAR (79) + 25/27
 - FALLA DE INTERRUPTOR (50FI)

PROTECCION DE SISTEMA

FLUJO INVERSO + BAJA FRECUENCIA (81/32)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Donde la protección del sistema, el esquema 81/32 queda ahora activado siempre, ya que ahora el flujo que antes se consideraba como falla es una operación normal del sistema, ya que con la entrada de la Generación en Mérida invirtió el flujo y solo queda una condición la baja frecuencia para que los enlaces se disparen, es por esto una aplicación de los relés adaptivos utilizando las señales de la diferencia angular entre áreas los PMU.



Gráfica 10

Se monitoreo todo un día el sistema Peninsular y se llego a la conclusión que al estar generando Mérida Potencia el ángulo entre el área oriental y el Peninsular era positivo, y al tener una generación media y no generación de Mérida Potencia el ángulo era negativo, tomado estas señales del PMU ahora se podrían alimentar

a un rele con el esquema 81/32 y así estar cambiando su configuración dependiendo el estado del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo sobre la medición fasorial me percate que este tema no esta muy difundido y es poco conocido. Uno de los objetivos de esta tesis es dar a conocer lo importante de este tema, y con la información recopilada de CFE, el Tecnológico de Virginia, el Instituto tecnológico de Georgia por mencionar algunas fuentes sea utilizado en un futuro como base para proyectos relacionados con el tema y así alcanzar una difusión en la Facultad de Ingeniería sobre todo en el área Eléctrica.

Lo que nos aporta la medición fasorial nos lleva a reflexionar sobre los comportamientos dinámicos tanto en la generación como en la carga lo que compromete a que cada día debe mejorar la calidad en el servicio eléctrico, por lo que es necesario acoplarse a las nuevas tecnologías y tener respuestas más rápidas en las mediciones de los equipos.

La medición fasorial aporta a los sistemas eléctricos, la utilización de equipos PMU Phasor Measurement Unit (Unidad de Medición Fasorial) la cual emplea variables de corriente, voltaje, potencia y frecuencias, que son utilizadas para la obtención de señales, así como el cálculo de la potencia activa y la potencia reactiva; que serán las que activen y pronostiquen los eventos y las fallas en el sistema eléctrico.

Los fasores son la representación mas completa de una variable, que al estar compuesto por un número complejo obtenemos información confiable por poseer una parte real y una imaginaria en función del tiempo de las componentes de magnitud y ángulo, lo cual en un sistema eléctrico es sumamente representativo ante variaciones de carga o generación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otro de los beneficios que trae consigo la medición fasorial es el monitoreo en tiempo real (gracias al GPS) de las variables anteriores y el control de diferentes dispositivos tanto de protección y comunicación.

La utilidad de la medición fasorial más importante hoy en día es la diferencia angular entre sistemas interconectados, ya que ésta puede dar una respuesta más rápida para la toma de decisiones en un centro de control de energía.

La medición fasorial en México ha traído grandes beneficios a la industria eléctrica, ya que se cuenta con lo más avanzado en este tipo de tecnología ya que el continuo cambio de una modernización del sector eléctrico nacional que exige cada día un servicio más eficiente y con el empleo de esta tecnología, para la predicción de eventos que puedan llevar a un colapso total en el suministro de energía eléctrica y por las reformas eléctricas que se avecinan, donde las dos empresas de nuestro país tendrán que competir con otras empresas no nacionales y tratar de no depender de los mismos mecanismos de medición y protección que se tienen implementados en la mayor parte del país.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Análisis de Fourier

Hwei P. Hsu

Editorial Addison Wesley Longman de México

México 1998

Sistemas Eléctricos de Potencia

William Stevenson Jr.

Editorial McGrawHill

México 1979

Redes Eléctricas Primera Parte

Jacinto Viqueira Landa

Editorial Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.

México 1986

Curso Tutorial Mediciones Fasoriales Sincronizadas

México 2000

www.cfe.gob.mx