

## CONTROL OPTIMO DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA Y DINAMICA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

**Ing. Jaime Luyo Kuong**  
**E-mail : jluyo@unmsm.edu.pe**

*Decano de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
Facultad de Ingeniería Electrónica, Lima-Perú*

**Resumen :** El presente trabajo se refiere a la optimización del factor de amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas presentadas en el Sistema Eléctrico de Potencia Interconectado Peruano (SIP), mediante procedimientos del cálculo computacional de los valores propios y de la adición de señales estabilizantes en los reguladores de tensión. Este trabajo se realiza cada vez que existe un cambio sustancial en la red tales como: entradas en servicio de nuevas líneas de transmisión o centrales generadoras; incremento importante de la demanda del Sistema. En el Sistema SIP se ha producido en diferentes períodos en el pasado fenómenos de inestabilidad con oscilaciones crecientes que se presentaban bajo ciertas condiciones del flujo de potencia y con determinada topología de la red de transmisión. Esta problemática fue analizada a nivel de estudio de sistema de potencia por medios de computacionales para la obtención de los valores característicos (o propios); a partir de los datos del SIP, como: estudios de flujos de carga, modelamiento de reguladores de las plantas de producción de energía eléctrica, tipos de carga y modelos dinámicos de orden superior en máquinas síncronas. Como consecuencia de este análisis se concluyó que la mejor solución a fin de evitar estas oscilaciones era modificar el regulador de tensión mediante la adición de señales estabilizantes.

**Abstract :** This paper concerns optimization of damping factor of electromechanical oscillations occurring in interconnected peruvian electrical power system (SIP), by means of computer-aided calculation methods of characteristic values as well as by applying stabilizing signals to voltage regulators. This optimization technique is performed each time a substantial change is introduced into the network, namely: start-up of new transmission lines or generating stations, substantial increase in system demand. In SIP system there have occasionally been instability problems with increasing oscillations occurring under certain conditions of power flow and with particular topologies in the transmission system. This problematic issue was studied from the point of view of power system analysis using computerized means in order to achieve characteristic values on the basis of SIP data, namely: power flow analysis, preparation of models of electric power generation plants, types of load and dynamic higher-order models in synchronous machines. As a result of this analysis it was concluded that the best answer to prevent these oscillations is the modification of voltage regulator by means of applied stabilizing signals.

**Palabras claves :** Sistema Eléctrico de Potencia, Amortiguación, Regulador, Valores característicos, Oscilaciones electromecánicas.

## I. MODELO DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA PARA ESTUDIO DE AMORTIGUACION.

El modelo utilizado para evaluar este tipo de inestabilidad, caracterizado por pequeñas pendulaciones iniciales que crecen con el tiempo, es el modelo dinámico lineal que permite el análisis de los valores propios.

Los valores propios dan una información directa de las frecuencias de oscilación, coeficientes de amortiguación y constantes de tiempo de esta oscilación electromecánica. Esta información es necesaria y a menudo suficiente para la ubicación de adecuados controles en forma sistemática.

### 1.1 Modelamiento de la red pasiva y cargas.

Se utilizan las ecuaciones de aplicación en los métodos de solución del flujo de potencia, donde la red pasiva y las cargas son representadas en términos de flujo de potencia activa y reactiva relacionada por los ángulos y voltajes.

En general se tiene para nodos de generación y/o carga:

$$P_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q Y_{pq} \cos(\theta_{ypq} + \theta_p - \theta_q) + \sum_{\ell=1}^L C_{\ell} \frac{\omega_p}{V_p} \quad (1)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q Y_{pq} \sin(\theta_{ypq} + \theta_p - \theta_q) + \sum_{\ell=1}^L D_{\ell} \frac{\omega_p}{V_p} \quad (2)$$

$p = 1, \dots, n-1$  máquinas y cargas

$\ell = 1, \dots, L$  tipos de cargas

Diferenciando estas ecuaciones, se linealizan tomando la forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{PV} & J_{P\theta} \\ J_{QV} & J_{Q\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta V$ ,  $\Delta \theta$  son vectores con variables: variación de potencia activa, reactiva y de amplitud y fase en voltajes terminales.

### 1.2 Modelamiento de la máquina síncrona.

Utilizando el modelo de 5to. orden en base a la teoría de Park se tiene:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (4)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{T\alpha} (P_m - P) \quad (5)$$

$$\dot{\varphi}_f = \omega_s \left\{ V_f - r_f \left[ -d_{12} V \cos(\delta - \theta) + d_{22} \varphi_f + d_{23} \varphi_\alpha \right] \right\} \quad (6)$$

$$\dot{\varphi}_a = \omega_s r_a \left[ -d_{13} V \cos(\delta - \theta) + d_{23} \dot{\varphi}_f + d_{33} \dot{\varphi}_a \right] \quad (7)$$

$$\dot{\varphi}_b = \omega_s r_b \left[ q_{12} V \sin(\delta - \theta) + q_{22} \dot{\varphi}_a \right] \quad (8)$$

Ecuaciones algebraicas que relacionan las variables en terminales de máquina y variables internas:

$$P = \frac{1}{2} (d_{11} - q_{11}) V^2 \sin 2(\delta - \theta) + V \sin(\delta - \theta) \left[ d_{12} \dot{\varphi}_f + d_{13} \dot{\varphi}_a \right] + q_{12b} V \cos(\delta - \theta) \quad (9)$$

$$Q = V^2 \left[ d_{11} \cos^2(\delta - \theta) - q_{11} \sin^2(\delta - \theta) \right] + V \cos(\delta - \theta) \left[ d_{12} \dot{\varphi}_f + d_{13} \dot{\varphi}_a \right] + (-q_{12}) \dot{\varphi}_b V \sin(\delta - \theta) \quad (10)$$

Donde :

$\delta$  ángulo del rotor

$\omega$  velocidad angular

$\varphi_f$  flujo del circuito ( $f$ ) de campo

$\varphi_a$  flujo del circuito de amortiguamiento equivalente (A) en el eje directo.

$\varphi_b$  flujo del circuito de amortiguamiento equivalente (B) en el eje cuadratura.

$P, Q, V, q, V_f, P_m$  Potencia activa, reactiva, amplitud y fase del voltaje en terminales, voltaje de campo y potencia mecánica.

$d_{ij}, q_{ij}$  Dependen de las reactancias transitorias y subtransitorias y constantes de tiempo.

$r_f, r_a, r_b$  Resistencias de los circuitos  $f, A, B$ .

Diferenciando estas ecuaciones (6), (7), (8), (9) y (10) se obtienen las ecuaciones dinámicas y algebraicas linealizadas de la máquina síncrona.

### 2.3 Modelamiento de los sistemas de regulación.

#### 2.3.1 Regulador de Voltaje.

El regulador de voltaje presentado en la Fig. 1 puede llevarse a la formulación:

$$\Delta \dot{X}_{VR} = \left[ F_{VRVR} \right] \Delta X_{VR} + \left[ F_{VR\delta} \quad F_{VR\omega} \quad F_{VRf} \quad F_{VRS} \right] \quad (11)$$

$$\Delta V_f = \begin{bmatrix} R_{V\delta} & R_{V\omega} & R_{Vf} & R_{VS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta f \\ \Delta A \\ \Delta B \end{bmatrix} + [R_{VVR}] \Delta\lambda_{VR} + [R_{VV} \quad R_{V\delta}] \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta\theta \end{bmatrix} + [R_{V\delta}] + [K_{VP}] \Delta P \quad (12)$$

Donde  $X_{VR}$  son las variables que se crean al formular las ecuaciones del regulador.

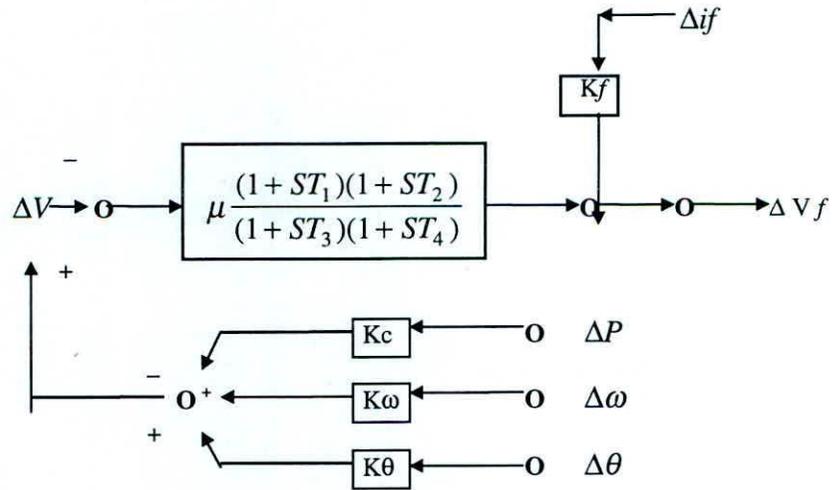


Figura 1. Diagrama en bloques del regulador de voltaje.

2.3.2 Regulador de Velocidad.

De igual procedimiento que para los reguladores de voltaje se tiene:

$$\Delta X_{SG} = [F_{SG\omega}] \Delta\omega [F_{SGSG}] \Delta X_{SG} \quad (13)$$

$$\Delta P_m = [Rp\omega] \Delta\omega [R_{PSG}] \Delta X_{SG} \quad (14)$$

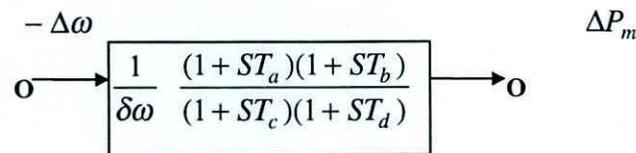


Figura 2. Diagrama en bloques del regulador de velocidad.

2.4 Matriz dinámica del sistema completo y características de los valores propios

Utilizando las ecuaciones diferenciales de (6), (7), y (8) y eliminando las variables  $\Delta P, \Delta Q, \Delta V, \Delta \delta$  en (1) por medio de las ecuaciones diferenciales de (9) y (10) y adicionando luego las ecuaciones (11), (12), (13) y (14). Se pueden ordenar las ecuaciones del sistema en la forma:

Se obtiene :  $\Delta \dot{X} = A \Delta X$

Donde :  $A = (I - M')^{-1} F'$

En forma desarrollada :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{f} \\ \Delta \dot{A} \\ \Delta \dot{B} \\ \Delta \dot{X}_{VR} \\ \Delta \dot{X}_{SG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I & . & . \\ A\omega\delta & . & . & . \\ A & f\delta & . & . \\ A & A\delta & . & . \\ A & B\delta & . & . \\ A & VR\delta & . & . \\ 0 & . & . & . \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta f \\ \Delta A \\ \Delta B \\ \Delta X_{VR} \\ \Delta X_{SG} \end{bmatrix} \tag{15}$$

La ecuación (15) contiene las variables que definen el comportamiento dinámico del sistema en la zona lineal o de pequeñas oscilaciones.

La solución de (15) es :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta(t) \\ \Delta \omega(t) \\ \Delta f(t) \\ \Delta A(t) \\ \Delta B(t) \\ \Delta X_{VR}(t) \\ \Delta X_{SG}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \\ . \\ . \\ . \\ . \\ K_{n1} \end{bmatrix} e^{\lambda_1 t} + \dots + \begin{bmatrix} K_{1n} \\ K_{2n} \\ . \\ . \\ . \\ . \\ K_{nn} \end{bmatrix} e^{\lambda_n t} \tag{16}$$

Donde  $\Delta \delta, \dots, \Delta X_{SG}$  son vectores con variables del mismo significado. Así para  $n$  elementos se cumple :

$$\Delta \delta = [\Delta \delta_1 \quad \Delta \delta_2 \quad \dots \quad \Delta \delta_n]^{-1} \tag{17}$$

Los valores propios autovalores  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  son indicadores de la estabilidad del sistema.

## II. METODO DE OPTIMIZACION PARA EL MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE AMORTIGUACION DE LAS OSCILACIONES ELECTROMECHANICAS.

La optimización del mejoramiento del factor de amortiguación está ligado a mejorar el valor propio crítico trasladándolo niveles de amortiguamiento satisfactorio.

Mediante tanteos de configuraciones y cambios en el sistema de control se demuestra que el mejor efector práctico se logra instalando señales adicionales de potencia y velocidad en la referencia del regulador de tensión.

Bajo esta premisa la optimización consiste en determinar las máquinas del sistema donde se debe instalar estas señales estabilizantes y cual sería su calibración.

### 2.1 Ubicación de las máquinas donde instalar señales estabilizantes.

Utilizando un modelo simplificado del sistema se desarrollará una expresión que permita señalar en que plantas de generación del sistema la instalación de un estabilizador tendría mayor efecto en el movimiento de la raíz crítica.

El factor que indica en qué central la instalación de un estabilizador tendría mayor influencia es la sensibilidad. Para su cálculo partiremos de las consideraciones siguientes:

- (a) Modelo de la máquina síncrona de 2° orden.
- (b) Red lineal.
- (c) Cargas tipo impedancia constante.

Suponiendo que el sistema carece de elementos atenuadores las ecuaciones que lo caracterizan serían :

$$M \Delta \ddot{\delta} + F \Delta e + K_D \Delta \dot{\delta} = \Delta P_n \quad (18)$$

$$\Delta P_n = -D \Delta \dot{\delta} \quad (19)$$

$$\Delta \dot{\Omega} = \Delta \ddot{\delta} \quad (20)$$

donde :  $F$  es una matriz de elementos  $F_{ij} = \frac{\partial \Delta P_{ei}}{\partial \Delta e_j}$  (21)

Las ecuaciones (18), (19) y (20) se pueden escribir como :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & | & 1 \\ C & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & | & 0 \\ R & | & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

donde :  $C = M^{-1} K_D$  (23)

$R = -M^{-1} F$  (24)

### III. SOLUCION DE INESTABILIDAD DEL SISTEMA INTERCONECTADO PERUANO

Mediante el cálculo de los autovalores en el Sistema Peruano, analizando diversas configuraciones del Sistema y aplicando en forma computacional la teoría expuesta en los capítulos precedentes, se concluyó que el sistema de regulación con estabilizador estaría ubicado en la Central Mantaro y cuyo diagrama en bloques se muestra en la Fig. 3.

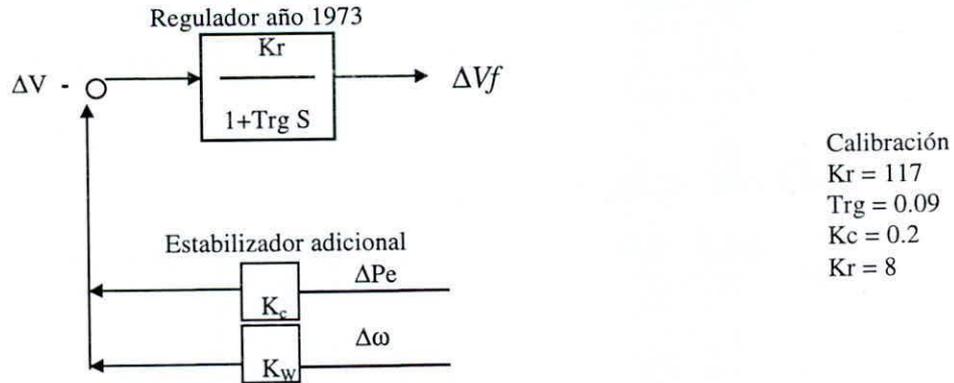


Figura 3. Diagrama en bloques del sistema de regulación de voltaje óptimo.

Este sistema de regulación provisto de señales adicionales estabilizantes de velocidad y potencia logran mejorar el factor de amortiguamiento de los autovalores críticos, con factor menor de 0.03, como se puede comparar en la tabla 1, sin señal estabilizante y con ésta respectivamente.

TABLA 1

Frecuencia de oscilación y factor de amortiguamiento para los modos críticos condición de máxima demanda

Modo	SIN ESTABILIZADOR		CON ESTABILIZADOR	
	Freq. (Hz)	Factor de Amortiguación ( $\lambda_n$ )	Freq. (Hz)	Factor de Amortiguación ( $\lambda_n$ )
1	0.90	0.026*	1.16	0.546
2	1.11	0.058	1.20	0.290
3	1.15	0.544	1.34	0.136
4	1.34	0.136	1.40	0.212
5	1.42	0.154	1.43	0.163
6	1.65	0.146	1.66	0.146
7	1.69	0.171	1.69	0.171
8	1.82	0.303	1.83	0.306
9	1.83	0.114	1.84	0.114
10	1.93	0.157	1.93	0.157

(\*) Factor de amortiguamiento bajo ( $\lambda_n < 0.03$ )

#### IV. CONCLUSIONES

La aplicación del método de los valores característicos del SIP considerado como un sistema dinámico, permite el mejoramiento de la estabilidad del Sistema de Potencia Interconectado. El método permite la identificación de la localización de los reguladores de tensión donde se deben aplicar las señales adicionales estabilizantes del sistema. El SIP por la aplicación del método desarrollado se mantendrá en sincronismo, evitándose las pérdidas de la conexión de centrales de generación eléctrica que se traducen en los llamados "apagones" en grandes zonas del país.

#### V. REFERENCIAS

- Athans M., Falb, P.; "Optimal Control", McGraw Hill Co. 1966.
- H.G. Kwany et al. : "An Optimal tracking approach to Load frequency Control", IEEE Trans. PAS, Set. 1985
- Lamont, J. W.; EPRI-Research Project 1208, Palo Alto, Cal., January 1987.
- Luyo K., Jaime; "Centro de Despacho Regional del Sistema Interconectado Centro Norte Ingeniería del Proyecto", Informe Técnico de Consultoría, ELECTROPERU S.A., Lima, Octubre 1986.
- Luyo K., J.; Producción de Energía para el Desarrollo. Fórum "Ingeniería y ciencia para el Desarrollo Nacional", Lima, Febrero 1985.
- Luyo K., J.; "Control de Sistemas Eléctricos Interconectados". Revista Electrónica Y Telecomunicaciones, Lima, Junio 1983.
- Luyo K., J.; "Control Automático de Generación del Sistema de Potencia Interconectado Peruano", VI CONIMERA, Agosto 1981.
- Taylor, C. W.; "Automatic Generation Control Analysis with Governor Dead band Effects", IEEE Trans. On PAS, Nov. 1979.