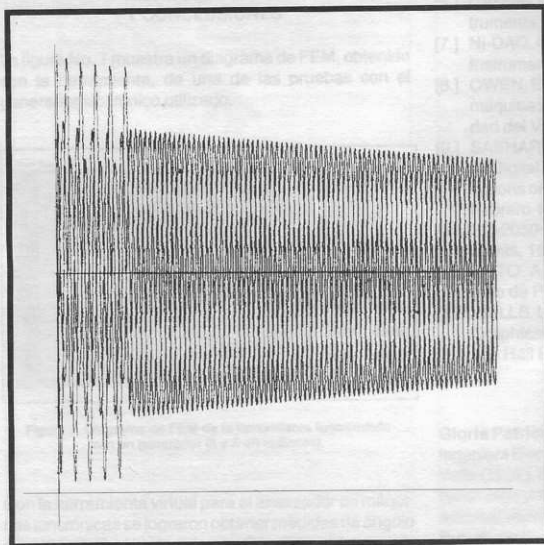


Modelo ATP / TACS / MODELS para una unidad sincrónica de generación



Carlos A. Lozano, M.Sc.
Grupo de Investigación en Alta
Tensión - GRALTA
Universidad del Valle

Luis A. Fajardo, M.Sc.
Universidad Nacional de Colom-
bia - Sede Medellín
Facultad de Minas

RESUMEN

Este artículo ilustra la metodología seguida y los resultados obtenidos en el desarrollo del Modelo ATP/TACS/MODELS de una unidad sincrónica de generación [1] cuyo objeto fundamental fue apoyar la interfase ADEMTP [2]. Con base en él, es posible aplicar los conceptos de sistemas de control y de regulación de potencia simultáneamente, utilizando como plataforma central el programa ATP (*Alternative Transient Program*). Los modelos resultantes se consideran también útiles en procesos industriales de Planificación de la Generación, para estudios transitorios relacionados, etc.

ABSTRACT

This paper shows the methodology and the results obtained from the development of the ATP/TACS/MODELS model of a generation synchronous unit [1], which fundamental objective was to support the interface ADEMTP [2]. From here it is possible applying the control systems and power regulating concepts at a time, and using the central reference of the ATP program. The resulting models are considered also usefulness in industrial processes of Generation Planning, for related transient studies, etc.

56

* Este texto se recibió, para ser publicado,
en octubre de 1997.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del este artículo considera los siguientes aspectos:

- Las características relevantes en los modelos del ATP para una Unidad Sincrónica de Generación, incluyendo la máquina sincrónica, el sistema de excitación (SE), el sistema de control de velocidad (RV) y la turbina (TD), haciendo uso del lenguaje de alto nivel MODELS, además de TACS;
- La elección conveniente de submodelos prácticos de los sistemas de control asociados que den flexibilidad al modelo total para su utilización en el ADEMT, documentando los submodelos con base en el programa ATP/TACS/ MODELS, y aplicando el modelo a la Central Hidroeléctrica del Alto Anchicayá.

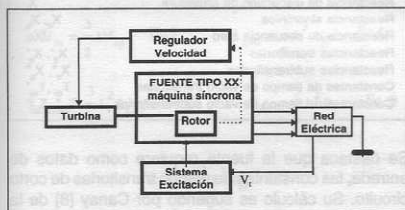


Figura 1. Filosofía general para el desarrollo del modelo.

Según la figura 1, tomando como eje central los modelos residentes para la máquina sincrónica, esto es, la fuente tipo 59, y una aplicación particular de la fuente tipo 19 (máquina universal), se estructuraron para el modelo las siguientes alternativas:

A. Modelos que utilizan directamente el formato tipo 59

- Primer caso: Se tiene en cuenta sólo el sistema de excitación (SE) para el modelamiento, tomándose el rotor y la turbina como masas. En este caso no se simula el regulador de voltaje.
- Segundo caso: Se modelan el sistema de excitación, el regulador de voltaje y la turbina. El rotor se simula como una masa dinámica.

B. Modelos que utilizan el módulo de Máquina Universal (UM)

- Primer caso: Se simula el SE únicamente, modelando el rotor y turbina como sus análogos eléctricos. No se modela RV.
- Segundo caso: Se modelan el SE, RV y la TB. En este caso el rotor se representa por su análogo eléctrico.

C. Modelos que utilizan el formato tipo 59 a través del módulo UM

- Primer caso: Como en el caso anterior, se modela

únicamente la SE, con el rotor como masa y la turbina como análogo eléctrico constante. En este caso no se modela el RV.

- Segundo caso: Se simula únicamente el SE, con el rotor y la turbina como masas. Igual que en el caso anterior, no se modela RV.
- Tercer caso: Se modelan tanto el SE, RV como la TB. El rotor se simula como una masa.

2. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Durante el análisis del modelo se consideran el sistema de excitación, el regulador de velocidad, la turbina y la máquina sincrónica, como objetos modularizables, de tal manera que se presentan los siguientes submodelos. Para el sistema de excitación:

- El filtro de entrada, que incluye la señal de entrada y su procesamiento antes de inyectarla al regulador de voltaje.
- El regulador de voltaje.
- El sistema estabilizador de realimentación.

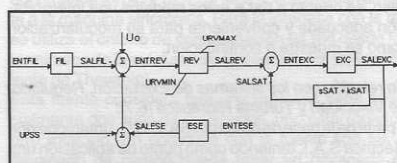


Figura 2. Modelo del sistema de excitación de la Central Hidroeléctrica del Alto Anchicayá.

El sistema del regulador de velocidad comprende:

- El acondicionamiento de la entrada.
- El Servomotor Piloto.
- La realimentación por estatismo permanente.
- La realimentación por estatismo transitorio.
- El Servomotor Principal.

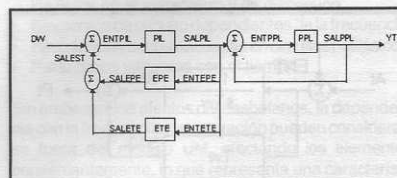


Figura 3. Modelo del regulador de velocidad de la Central Hidroeléctrica del Alto Anchicayá.

La turbina presenta dos alternativas [4]:

- Modelo Ramey - Skooglund equivalente.
- Modelo Ramey - Skooglund detallado.

La máquina sincrónica presenta tres alternativas [5]:

- Modelo que utiliza la fuente tipo 59 del ATP.
- Modelo que utiliza la fuente tipo 19 del ATP: Máquina Universal.
- Modelo que invoca la fuente tipo 59 a través del módulo fuente tipo 19.

Cada uno de los submodelos de los sistemas de control, se implementaron y probaron en TACS y MODELS. Con base en estas alternativas, el usuario del modelo puede simular una Unidad Sincrónica de Generación para fines académicos e industriales.

3. ASPECTOS DE LA MODELACIÓN

Durante la modelación se tomó en cuenta y se confrontaron las afirmaciones científicas que las fuentes básicas [4,5] presentan. El objetivo de este artículo, en este caso, se orientó a dar a estos modelos una interpretación adecuada y conveniente para su modularización como se muestra a continuación:

En relación con los sistemas de Excitación, Regulador de Velocidad y Turbina Hidráulica [6,7]:

A partir de la base de datos de ISA, E.S.P. (Interconexión Eléctrica S.A.), teniendo como punto de aplicación una unidad de la Central Hidroeléctrica del Alto Anchicayá, se han tomado los modelos:

- VCO 7: Sistema de excitación con rectificador controlado y saturación fija; tensión de cielo en función del voltaje terminal del generador y la corriente de la excitatriz.
- PCO 3: Controlador de velocidad con caídas transitoria y estática tomadas desde la salida de la válvula piloto.
- PMU 6: Turbina Hidráulica no lineal, sin la dinámica de la tubería de conducción.

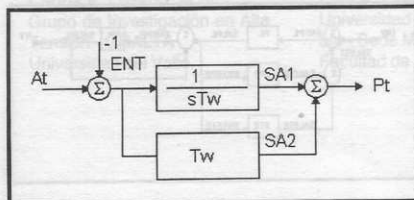


Figura 4. Modelo de turbina.

Se observó pertinente, además, considerar los modelos Ramey-Skooglund por su aceptación industrial ampliamente referenciada en la literatura técnica consultada. Las referencias [8,9] permitieron considerar los rangos de variabilidad esperada para los parámetros de los diferentes sistemas relacionados.

En relación con la Máquina Sincrónica se destacan algunos elementos metodológicos, introducidos para el uso racional de las fuentes tipo 59 y 19.

3.1 Alternativa No. 1 para la utilización de la fuente tipo 59

Parámetros dados por el fabricante	
PARÁMETRO	SÍMBOLO
Resistencia de armadura	R_a
Reactancia de dispersión de armadura	X_d
Reactancia sincrónica	X_d, X_q
Reactancia de secuencia cero	X_0
Reactancias transitorias	X_d', X_q'
Reactancias subtransitorias	X_d'', X_q''
Constantes de tiempo de vacío transitorias	T_{d0}', T_{q0}'
Constantes de tiempo de vacío subtransitorias	T_{d0}'', T_{q0}''

Se destaca que la fuente requiere como datos de entrada, las constantes de tiempo transitorias de corto circuito. Su cálculo es sugerido por Canay [8] de la siguiente manera:

Para eje d y eje q (cambiando d por q)

$$T_{d0}' + T_{d0}'' = \frac{X_d'}{X_d} T_d' + \left(1 - \frac{X_d'}{X_d}\right) T_d'' \quad \text{Ec. 1}$$

$$T_{d0}' T_{d0}'' = T_d' T_d'' \frac{X_d}{X_d'} \quad \text{Ec. 2}$$

3.2 Alternativa No. 2 para la utilización de la fuente tipo 59

Los parámetros de entrada son inductancias obtenidas por un proceso de conversión de parámetros [8], tomando en cuenta algunas suposiciones. Mediante un factor de escala compensatorio 'k' se simula la relación entre espiras de los bobinados de campo y amortiguamiento en ambos ejes (relación de la corriente de excitación nominal en vacío y el voltaje nominal en terminales), a fin de obtener una matriz [L] simétrica. Con ese factor 'k' se asocia una incertidumbre que se soluciona de la siguiente manera:

- Resolver el sistema de ecuaciones arriba mostrado, para T_{d0}' (T_{q0}'), T_{d0}'' (T_{q0}'').
- Resolver para las constantes de tiempo T_1, T_2 de las ramas 'F' y 'D' respectivamente, en el circuito equiva-

lente para eje directo con cantidades modificadas de la estructura de campo, según figura 1 [9].

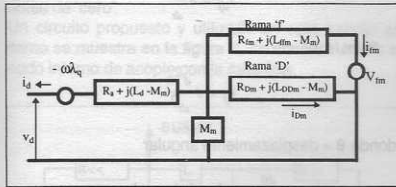


Figura 5. Circuito equivalente para eje directo, con cantidades modificadas en la estructura de campo [9].

con:

$$M_m = \frac{3}{2} k M_{af} \quad \text{Ec. 3}$$

$$L_{ffm} = \frac{3}{2} k^2 L_{ff} \quad \text{Ec. 4}$$

$$L_{DDm} = \frac{3}{2} k^2 L_{DD} \quad \text{Ec. 5}$$

$$R_{fjm} = \frac{3}{2} k^2 R_f \quad \text{Ec. 6}$$

$$R_{Dm} = \frac{3}{2} k^2 R_D \quad \text{Ec. 7}$$

donde R, resistencias de rama; L, inductancias de rama y M, inductancias mutuas. Finalmente, si se define:

$$T_1 = \frac{L_f}{R_f} \quad \text{Ec. 8}$$

$$T_2 = \frac{L_D}{R_D} \quad \text{Ec. 9}$$

$$L_f = L_{ffm} - M_m \quad \text{Ec. 10}$$

$$L_D = L_{DDm} - M_m \quad \text{Ec. 11}$$

Se resuelven simultáneamente:

$$T_1 + T_2 = (T_{do} + T_{do}') \times \frac{M_m - L_d}{M_m} + (T_d' + T_d'') \times \frac{L_d}{M_m} \quad \text{Ec. 12}$$

$$T_1 T_2 = T_{do}' T_{do}'' \times \frac{M - L_d + L_d'}{M} \quad \text{Ec. 13}$$

Una vez conocidas \$T_1\$ y \$T_2\$ (constantes de tiempo), se procede de la siguiente manera:

$$\text{Paralelo } L_f, M_m = \frac{M_m (T_1 - T_2)}{T_{do}' + T_{do}'' - (1 + \frac{M_m}{M_m - L_d + L_d'}) T_2} \quad \text{Ec. 14}$$

De donde:

$$L_f = \frac{\text{Paralelo } L_f, M_m \times M_m}{M_m - \text{Paralelo } L_f, M_m} \quad \text{Ec. 15}$$

Y, en consecuencia:

$$L_D = \frac{(M_m - L_d + L_d') \times \text{Paralelo } L_f, M_m}{\text{Paralelo } L_f, M_m - (M_m - L_d + L_d')} \quad \text{Ec. 16}$$

Finalmente, se calcula:

$$R_f = \frac{L_f}{T_1} \quad \text{Ec. 17} \quad R_D = \frac{L_D}{T_2} \quad \text{Ec. 18}$$

$$L_{ff} = L_f + M_m \quad \text{Ec. 19} \quad L_{DD} = L_D + M_m \quad \text{Ec. 20}$$

3.3 La fuente tipo 19. Máquina Universal (UM)

En el presente trabajo se utiliza esta fuente según la documentación ATP [5, 11] y se la aplica exclusivamente a la máquina sincrónica. Para la interfase con la red se utiliza el criterio de compensación (la red desde los terminales de la máquina se representa por un equivalente de Thevenin).

Esta fuente considera que una máquina tiene esencialmente dos tipos de devanados, uno estacionario y otro rotatorio. En contraste con la fuente tipo 59, el devanado de campo puede tener un devanado de secuencia cero para permitir la conversión de devanados trifásicos en la estructura de campo en devanados hipotéticos \$d, q, 0\$.

En relación con la máquina sincrónica, la naturaleza, misma del módulo UM, no le permite tratar directamente las siguientes situaciones:

- Desbalance magnético de devanados polifásicos.
- Devanados polifásicos asimétricamente distribuidos.
- Rutas de flujo de dispersión saturable.
- Capacitancia interna distribuida.
- Distribución no sinusoidal de flujo en el entrehierro.
- Pérdidas en el núcleo asociadas directamente con los flujos en el entrehierro y de dispersión.
- Elementos de circuito dependientes de la frecuencia.
- Resistencias desbalanceadas en circuitos polifásicos.
- Parámetros variantes con el tiempo.

Sin embargo, los efectos del desbalance, la dependencia con la frecuencia y la saturación pueden considerarse fuera del módulo UM, afectando los elementos convenientemente, lo que representa una característica ventajosa respecto de la fuente tipo 59. Otras limitaciones adicionales por la conveniencia de programación y los métodos de solución iterativa propios del

módulo UM, en relación con la máquina sincrónica (su configuración), son las siguientes:

- Considera sólo devanado de armadura trifásica.
- Considera sólo devanado de campo monofásico.
- No se permite la inclusión tanto en la red eléctrica propiamente dicha como en el equivalente eléctrico del sistema mecánico, de elementos no lineales directamente acoplados a una bobina de la máquina o a un nodo.

Para la alternativa de utilización del módulo UM bajo el formato tipo 59 se tendrá en cuenta que:

- Sólo esta permitido para máquinas trifásicas
- La forma del sistema mecánico se restringe a las 'n' masas conectadas por resortes.
- El algoritmo de conversión de datos del módulo UM construye internamente un análogo eléctrico del sistema mecánico especificado por los registros de masas del formato tipo 59, de tal manera que los parámetros disponibles para la salida son los mismos que para el análogo eléctrico del módulo UM.
- Cuando se especifica que una máquina en un grupo está representada por el formato tipo 59, se invoca una inicialización automática para la simulación completa (todas las unidades).

Puesto que el ATP no permite circuitos flotantes respecto a tierra, debe proveerse una ruta eléctrica (resistencia infinita) para ello, tanto en el circuito eléctrico como en el equivalente eléctrico del sistema mecánico.

Datos eléctricos para la simulación con la fuente tipo 19, ATP UM

Los datos de una máquina a simular con el módulo UM pueden separarse en cuatro grupos:

- Datos de configuración
- Datos de bobinas
- Datos de conexión a la red
- Datos de inicialización de las variables de la máquina

Datos mecánicos para la simulación con la fuente tipo 19, ATP UM

El sistema mecánico se representa mediante un circuito eléctrico análogo que se estructura de la siguiente manera.

- Para un sistema de masa simple: momento de inercia del rotor, coeficiente de amortiguamiento viscoso, fuente TACS para el torque mecánico. En situaciones en las cuales el torque mecánico se especifica como una fuente, la masa del rotor puede tratarse sin recurrir al modelo de la red.
- Forma UM del sistema mecánico: Las ecuaciones de torque para las componentes mecánicas son:
- Para un resorte torsional

$$T_{ij} = K\theta$$

- Para un amortiguamiento viscoso

$$T_{dj} = B \frac{d\theta}{dt}$$

- Para la inercia

$$T_{ij} = J \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

donde θ = desplazamiento angular

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{velocidad angular}$$

El algoritmo UM utiliza la siguiente analogía:

Corriente = análogo eléctrico del TORQUE

Voltaje = análogo eléctrico de la velocidad angular

En consecuencia:

- Para torsión entre dos masas

$$\frac{d(i_{sjk})}{dt} = K(V_{jg} - V_{kg}) = \frac{1}{L}(V_{jg} - V_{kg}) \quad \text{Ec. 21}$$

- Para amortiguamiento viscoso

$$i_{dj} = Bv_{jg} = Gv_{jg} \quad \text{Ec. 22}$$

- Para la inercia

$$i_{ij} = J \frac{d(v_{jg})}{dt} = C \frac{d(v_{jg})}{dt} \quad \text{Ec. 23}$$

donde 'j' y 'k' son los nodos eléctricos equivalentes a las masas 'j' y 'k'; 'g' es el nodo de referencia eléctrica o nodo de tierra.

La ecuación de torsión se presenta en forma invertida solo por facilidad en la escritura.

En consecuencia:

$$\begin{aligned} C \text{ (F) a tierra} &= J \text{ (Nm} \cdot \text{s}^2/\text{rad}), \text{ masa} \\ G \text{ (S) a tierra} &= B \text{ (Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}), \text{ amortiguamiento viscoso de la masa} \\ L \text{ (H)} &= 1/K \text{ (Nm}/\text{rad}), \text{ acoplamiento torsional entre masas} \end{aligned}$$

Si existe un amortiguamiento viscoso asociado con una diferencia en velocidad entre las dos masas, se modela conectando una conductancia entre los nodos correspondientes con su valor escogido de la misma manera que para la masa viscosa arriba mencionada. Los torques externos aplicados al sistema mecánico, tal como el torque desde el primomotor aplicado al generador, se modelan como fuentes de corriente en el análogo eléctrico, y se aplican a los nodos mas apropiados para una correcta modelación del sistema mecánico. Como se indicó antes en la discusión de la inicialización,

al menos una fuente ajustable tipo 14 debe incluirse y activarse antes de 'cero'. Fuentes TACS u otras fuentes pueden utilizarse, pero no está permitido activarlas antes de 'cero'. Un circuito propuesto y utilizado en este trabajo es como se muestra en la figura 2, donde BUSMG es el nodo interno de acople con la máquina.

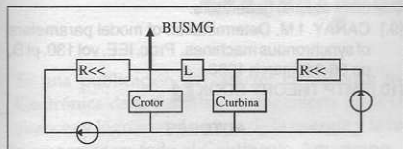


Figura 6. Un análogo eléctrico de un sistema mecánico de dos masas.

4. APLICACIÓN DEL MODELO

Para la aplicación de los modelos obtenidos se utilizó la Central Hidroeléctrica de Anchicayá, ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Los datos de esta central se obtuvieron de la base de datos que se encuentra en el Centro de Control de ISA (Interconexión Eléctrica, S.A.). Para la simulación se realizó un cortocircuito en terminales de la máquina, figura 7, cuyos resultados se presentan en la figura 8.

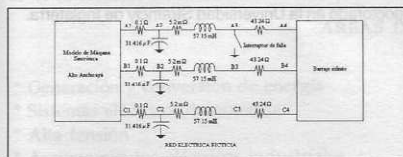


Figura 7. Diagrama equivalente del sistema.

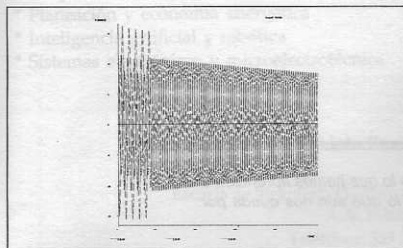


Figura 8. Voltaje en terminales de la máquina para cortocircuito monofásico.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto, ha permitido crear una serie de módulos que permiten analizar el comportamiento de una unidad sincrónica de generación. La modularización se hizo con ayuda de las herramientas TACS para la modelación de sistemas de control y MODELS como lenguaje de propósito general, incluidas con el ATP. En ambos casos se utilizó la fuente tipo 59, Máquina Sincrónica Trifásica, para la modelación de un generador sincrónico trifásico, y la fuente tipo 19, Máquina Universal.

El resultado final es un modelo base con una variedad de posibilidades constituyendo modelos independientes. Cada uno de estos modelos representa una Unidad Sincrónica de Generación (USG) entendida bajo los criterios que este artículo ha referenciado, es decir, el generador más sus controles, incluyendo su primomotor. Con base en estos resultados es posible construir un único módulo que contenga todas las posibilidades y las que se considere convenientes, por ejemplo, modelos con más de una USG en paralelo sobre la misma barra, compartiendo o no los sistemas de control, diferentes USG con diferentes modelos de los sistemas de control, y otros.

Con base en la filosofía del proyecto de investigación, el estudiante cuenta ahora con un simulador del Sistema Electromecánico asociado con una Unidad Sincrónica de Generación.

La simulación de situaciones prácticas, se soluciona en la medida en que se disponga de la información pertinente y especificada en el trabajo.

Los modelos que se presentan son útiles para la simulación de condiciones adversas en la operación de unidades sincrónicas de generación, en el ambiente de planificación de largo plazo, y aunque la herramienta ATP no es propiamente de diseño, sí permite caracterizar el comportamiento de las variables de la máquina frente a las de sus controles y viceversa, de tal manera que sirve de apoyo para la toma de decisiones afines con los equipos comprometidos.

Los resultados de este trabajo pueden utilizarse bajo la opción DATABASE MODULE, como módulos de entrenamiento con la interfase ATPDRAW. Este entrenamiento se concibe como un mecanismo de acercamiento al interior de la Unidad Sincrónica de Generación, para analizar su comportamiento.

Finalmente, se consideran las ventajas del uso de MODELS frente a la opción clásica de modelar en TACS el sistema de control de una Unidad Sincrónica de Generación.

El modelo de un sistema con base en MODELS es versátil y flexible dado que:

- MODELS permite múltiples réplicas independientes de un modelo total variando los submodelos individuales, haciendo clara distinción entre la descripción de un modelo y su uso.

- b. MODELS permite la combinación jerárquica de tres métodos de inicialización que contribuyen a la descripción de la historia pre-simulación de un modelo por una representación directa del valor de pre-simulación de sus entradas y variables como funciones del tiempo.
- c. MODELS permite una modificación dinámicamente controlada de los valores de las entradas y variables de un modelo durante el curso de una simulación.
- d. MODELS permite una modificación dinámicamente controlada de la estructura de un modelo tanto en su composición topológica como en su flujo algorítmico, durante el curso de una simulación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] FAJARDO, R. L.A. Modelo ATP/TACS/MODELS de una unidad sincrónica de generación. Tesis de Maestría, Programa de Posgrado en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de la Computación. Universidad del Valle. Santiago de Cali, 1997.
- [2.] LOZANO, C. CASTRO, F. Diseño de un ambiente amigable para el EMT. Tesis de Grado. Posgrado en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle.
- [3.] RAMEY-SKOOGLUND, Detailed Hydrogovernor representation for system stability studies. IEEE, PAS, January, 1970.
- [4.] ATP, RULE BOOK.
- [5.] ANDERSON - FOUAD, Power System Control and Stability. The IOWA State University Press, Ames, Iowa, USA, 1977.
- [6.] ANSI/IEEE Std 125 - 1988, Equipment specifications

for speed governing of hydraulic turbines intended to drive electric generators.

- [7.] IEC - Publication 308 - 1970, International code for testing of speed governing systems for hydraulic turbines.
- [8.] IEEE Std 125 - 1977, IEEE recommended practice for preparation of equipment specifications for speed-governing of hydraulic turbines intended to drive electric generators.
- [9.] CANAY, I.M, Determination of model parameters of synchronous machines. Proc. IEE, vol 130, pt B, pp 86-94, march 1983.
- [10.] EMT. THEORY BOOK

AUTORES

Carlos A. Lozano M.

Ingeniero Electricista, Universidad del Valle 1992. Magister Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, 1995. Profesor Asistente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

E-Mail: alta@maxwell.univalle.edu.co
carlos.lozano@strath.ac.uk

Luis A. Fajardo.

Ingeniero Electricista, Universidad Nacional. Magister Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, 1997. Profesor Facultad de Minas - Universidad Nacional, Medellín, Colombia. Actualmente cursa estudios de doctorado en la Universidad Strathclyde de Inglaterra.

