

NOTA IMPORTANTE:

La entidad sólo puede hacer uso de esta norma para si misma, por lo que este documento NO puede ser reproducido, ni almacenado, ni transmitido, en forma electrónica, fotocopia, grabación o cualquier otra tecnología, fuera de su propio marco.

ININ/ Oficina Nacional de Normalización

NORMA CUBANA

NC

IEC 60034-16-2: 2007
(Publicada por la IEC en 1991)

**MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS—PARTE 16:
SISTEMAS DE EXCITACIÓN PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS—
CAPÍTULO 2: MODELOS PARA LOS ESTUDIOS DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA
(IEC 60034-16-2:1991, IDT)**

Rotating electrical machines—Part 16: Excitation systems for synchronous machines—Chapter 2: Models for power system studies

La versión oficial en español de la Norma Internacional IEC 60034-16-2:1991 *Rotating electrical machines – Part 16: Excitation systems for synchronous machines – Chapter 2: Models for power system studies* es adoptada como Norma Nacional idéntica con la referencia NC-IEC 60034-16-1:2007.

ICS: 29.180

1. Edición Junio 2007
REPRODUCCIÓN PROHIBIDA

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 Vedado, Ciudad de La Habana. Cuba. Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048; Correo electrónico: nc@ncnorma.cu; Sitio Web: www.nc.cubaindustria.cu



Cuban National Bureau of Standards

Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC), es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba y representa al país ante las organizaciones internacionales y regionales de normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos normativos relacionados se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

Esta Norma Cubana:

- Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 36 de Electroenergética, en el cual están representadas las siguientes entidades:
 - Ministerio de la Industria Básica
 - Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente
 - Ministerio de la Industria Sideromecánica
 - Ministerio de Economía y Planificación
 - Ministerio del Transporte
 - Instituto Nacional de la Vivienda
 - Ministerio de Trabajo y Seguridad Social
 - Oficina Nacional de Normalización
- Es una adopción idéntica de la versión oficial en español de la Norma Internacional IEC 60034-16-2:1991.

© NC, 2007

Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada en alguna forma o por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias, fotografías y microfilmes, sin el permiso escrito previo de:

Oficina Nacional de Normalización (NC)

Calle E No. 261, Vedado, Ciudad de La Habana, Habana 4, Cuba.

Impreso en Cuba.

INFORME TÉCNICO

**CEI
IEC
60034-16-2**

Primera edición
1991-02

Versión oficial en español

Máquinas eléctricas rotativas

Parte 16:

Sistemas de excitación para máquinas síncronas

Capítulo 2: Modelos para los estudios de sistemas eléctricos de potencia

Rotating electrical machines

Part 16:

Excitation systems for synchronous machines

Chapter 2: Models for power system studies

Machines électriques tournantes

Partie 16:

Systèmes d'excitation pour machines synchrones

Chapitre 2: Modèles pour les études de réseaux

© CEI 1991

© AENOR 2001

} Reservados todos los derechos de reproducción

Ninguna parte de esta publicación se puede reproducir ni utilizar de cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia o microfilm, sin el permiso por escrito de los editores.

Secretaría Central de la Comisión Electrotécnica Internacional, 3 rue de Varembe. GINEBRA, Suiza

Sede Central de AENOR, C Génova, 6. 28004 MADRID, España



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

CÓDIGO DE
PRECIO

R

Para información sobre el precio de esta norma, véase catálogo en vigor.

ÍNDICE

| | Página |
|--|---------------|
| ANTECEDENTES | 4 |
| INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN | 7 |
| 2 CATEGORÍAS DE EXCITATRICES. REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y MODELOS MATEMÁTICOS PARA LOS ESTUDIOS DE ESTABILIDAD | 8 |
| 2.1 Excitatriz de corriente continua | 8 |
| 2.2 Excitatriz de corriente alterna | 9 |
| 2.3 Excitatriz estática con fuente de tensión | 11 |
| 2.4 Excitatriz estática compuesta | 13 |
| 2.5 Modelos matemáticos para la función de regulación..... | 16 |
| 3 NOMENCLATURA | 21 |
| 3.1 Parámetros | 21 |
| 3.2 Variables..... | 22 |
| ANEXO A SISTEMA DE VALORES POR UNIDAD (p.u.) | 23 |
| ANEXO B CARACTERÍSTICA DE REGULACIÓN DE UN RECTIFICADOR | 24 |
| ANEXO C FUNCIÓN DE SATURACIÓN | 26 |
| ANEXO D REPRESENTACIÓN DE LOS LIMITES | 27 |
| ANEXO E EJEMPLOS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESPECIALIZADOS | 28 |

COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL

Máquinas eléctricas rotativas

Parte 16: Sistemas de excitación para máquinas síncronas Capítulo 2: Modelos para los estudios de sistemas eléctricos de potencia

ANTECEDENTES

- 1) CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) es una organización mundial para la normalización, que comprende todos los comités electrotécnicos nacionales (Comités Nacionales de CEI). El objetivo de CEI es promover la cooperación internacional sobre todas las cuestiones relativas a la normalización en los campos eléctrico y electrónico. Para este fin y también para otras actividades, CEI publica Normas Internacionales. Su elaboración se confía a los comités técnicos; cualquier Comité Nacional de CEI que esté interesado en el tema objeto de la norma puede participar en su elaboración. Organizaciones internacionales gubernamentales y no gubernamentales relacionadas con CEI también participan en la elaboración. CEI colabora estrechamente con la Organización Internacional de Normalización (ISO), de acuerdo con las condiciones determinadas por acuerdo entre ambas.
- 2) Las decisiones formales o acuerdos de CEI sobre materias técnicas, expresan en la medida de lo posible, un consenso internacional de opinión sobre los temas relativos a cada comité técnico en los que existe representación de todos los Comités Nacionales interesados.
- 3) Los documentos producidos tienen la forma de recomendaciones para uso internacional y se publican en forma de normas, informes técnicos o guías y se aceptan en este sentido por los Comités Nacionales.
- 4) Con el fin de promover la unificación internacional, los Comités Nacionales de CEI se comprometen a aplicar de forma transparente las Normas Internacionales de CEI, en la medida de lo posible en sus normas nacionales y regionales. Cualquier divergencia entre la Norma CEI y la correspondiente norma nacional o regional debe indicarse de forma clara en ésta última.
- 5) CEI no establece ningún procedimiento de marcado para indicar su aprobación y no se le puede hacer responsable de cualquier equipo declarado conforme con una de sus normas.
- 6) Se debe prestar atención a la posibilidad de que algunos de los elementos de esta Norma Internacional puedan ser objeto de derechos de patente. No se podrá hacer responsable a CEI de identificar alguno o todos esos derechos de patente.

Este informe ha sido elaborada por el comité técnico 2 de CEI: Máquinas rotativas.

El texto de este informe se basa en los documentos siguientes:

| Regla de los Seis Meses | Informe de voto |
|-------------------------|-----------------|
| 2(CO)533 | 2(CO)548 |

El informe de voto indicado en la tabla anterior ofrece toda la información sobre la votación para la aprobación de este informe.

Este informe forma el Capítulo 2 de la Parte 16 de una serie de publicaciones sobre las máquinas rotativas, siendo las otras partes:

- Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento, editada como CEI 60034-1.
- Parte 2: Determinación de las pérdidas y rendimiento a partir de los ensayos, editada como CEI 60034-2.
- Parte 2A: Primer complemento: Medida de pérdidas por el método calorímetro, editada como CEI 60034-2A.

- Parte 3: Reglas específicas para las turbomáquinas síncronas, editada como CEI 60034-3 .
- Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de ensayos, editada como CEI 60034-4.
- Parte 5: Clasificación de los grados de protección proporcionados por las envolventes de las máquinas eléctricas rotativas (Código IP), editada como CEI 60034-5.
- Parte 6: Métodos de refrigeración (Código IC), editada como CEI 60034-6.
- Parte 7: Clasificación de los tipos de construcción y de las disposiciones de montaje (Código IM), editada como CEI 60034-7.
- Parte 8: Identificación de los terminales y sentido de rotación de las máquinas rotativas, editada como CEI 60034-8.
- Parte 9: Límites de ruido, editada como CEI 60034-9.
- Parte 10: Convenios relativos a la descripción de las máquinas síncronas, editada como CEI 60034-10.
- Parte 11: Protección térmica incorporada. Capítulo 1: Reglas para la protección de las máquinas eléctricas rotativas, editada como CEI 60034-11.
- Parte 11-2: Protección térmica incorporada. Capítulo 2: Detectores térmicos y unidades de control empleados en los sistemas de protección térmica, editada como CEI 60034-11-2.
- Parte 11-3: Protección térmica incorporada. Capítulo 3: Reglas generales para los detectores térmicos empleados en los sistemas de protección térmica, editada como CEI 60034-11-3.
- Parte 12: Características de arranque de los motores trifásicos de inducción de jaula con una sola velocidad, para tensiones de alimentación iguales o inferiores a 660 V/50 Hz, editada como CEI 60034-12.
- Parte 13: Especificación para los motores auxiliares para laminadores, editada como CEI 60034-13.
- Parte 14: Vibraciones mecánicas de determinadas máquinas con altura de eje igual o superior a 56 mm. Medición, evaluación y límites de la intensidad de vibración, editada como CEI 60034-14.
- Parte 15: Niveles de tensión soportada con impulso de las máquinas rotativas de corriente alterna con bobinas de estator preformadas, editada como CEI 60034-15.
- Parte 16-1: Sistemas de excitación para máquinas síncronas. Capítulo 1: Definiciones, editada como CEI 60034-16-1.

INTRODUCCIÓN

Cuando en los estudios de estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia es necesario simular con precisión el comportamiento de las máquinas síncronas, se deberían modelizar adecuadamente los sistemas de excitación de estas máquinas. Ya que se debe limitar, en la medida de lo posible, el gasto asociado a la adquisición de datos, la programación y el cálculo, es necesario utilizar modelos simplificados que proporcionen una precisión razonable. Los modelos debieran representar correctamente las prestaciones reales de los sistemas de excitación:

- durante las condiciones de régimen permanente anterior a la aparición del fallo estudiado;
- durante el intervalo de tiempo que separa la aplicación y la eliminación del fallo;
- durante las oscilaciones consecutivas a la eliminación del fallo.

La modelización no tiene en cuenta las desviaciones de frecuencia. En los estudios de estabilidad se admite que, en lo que se refiere al sistema de excitación, pueden despreciarse las desviaciones de la frecuencia de hasta $\pm 5\%$ de la frecuencia asignada.

Los modelos de los sistemas de excitación deberían ser válidos para las condiciones de régimen permanente, para las frecuencias naturales de oscilación de las máquinas síncronas y para la gama de frecuencias correspondiente. La gama de frecuencias típica a cubrir será de 0 Hz a 3 Hz.

El análisis del funcionamiento fuera de sincronismo, de la resonancia subsíncrona o de los efectos de torsión sobre el eje está fuera del campo de aplicación de estos modelos.

El funcionamiento de los órganos de protección y del equipo destinado a la descarga o a la supresión del campo, también está fuera del campo de aplicación de estos modelos.

Las guías de utilización de la modelización de los sistemas de excitación, así como los modelos normalizados pueden también ser utilizados para el estudio de otros problemas dinámicos relativos a las máquinas síncronas. Sin embargo, los modelos deberían entonces verificarse para determinar su adecuación para ese propósito.

El esquema funcional general de la figura 1 indica los diferentes componentes del sistema de excitación que deben ser tomados en consideración en los estudios de estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia. Estos componentes incluyen:

- elementos de regulación de la tensión;
- limitadores;
- el bucle de estabilización (si se utiliza);
- el convertidor de potencia de la excitatriz (excitatriz).

Normalmente, los limitadores no se representan en los estudios de los sistemas eléctricos de potencia.

Los sistemas de excitación se distinguen principalmente por la manera en la cual se suministra y es convertida la potencia de excitación.

Máquinas eléctricas rotativas

Parte 16: Sistemas de excitación para máquinas síncronas

Capítulo 2: Modelos para los estudios de sistemas eléctricos de potencia

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma recomienda una guía para la modelización y modelos apropiados de sistemas de excitación para su utilización en los estudios de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia y contiene una nomenclatura que define las variables y los parámetros utilizados.

Las definiciones de los términos utilizados se encuentran en la Norma CEI 60034-16-1.

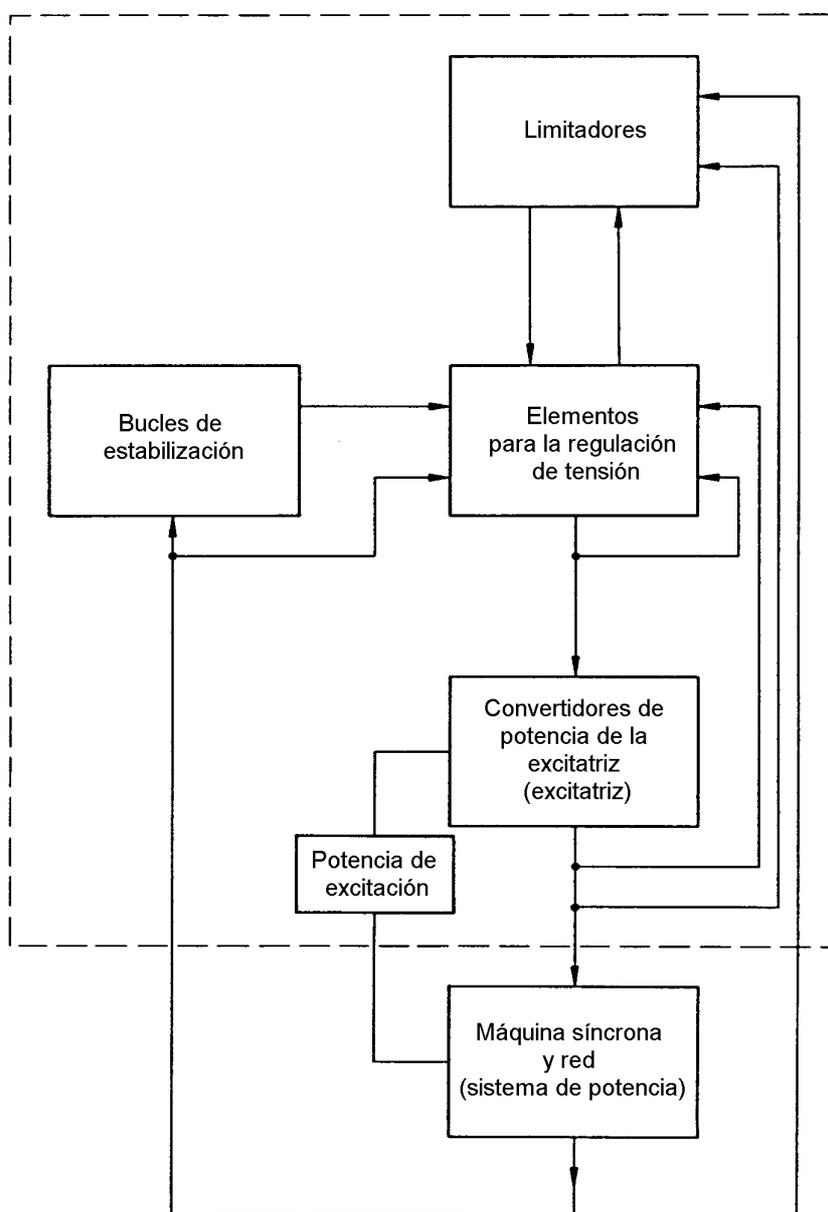


Fig. 1 – Diagrama general de funcionamiento de bloques (delimitado por la línea de puntos) de los sistemas de excitación de máquinas síncronas

2 CATEGORÍAS DE EXCITATRICES. REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y MODELOS MATEMÁTICOS PARA LOS ESTUDIOS DE ESTABILIDAD

2.1 Excitatriz de corriente continua

Aunque se utilizan raramente en las máquinas nuevas, se consideran las excitatrices de corriente continua ya que hay numerosas máquinas síncronas actualmente en servicio que están equipadas con este tipo de excitatriz. La figura 2 muestra una representación gráfica de una excitatriz de excitación independiente y la figura 3 muestra el modelo correspondiente. El término K_E se introduce en el modelo para tener en cuenta la característica de las excitatrices autoexcitadas. Hay que hacer notar que $K_E=1$ en el caso de excitatrices de excitación independiente.

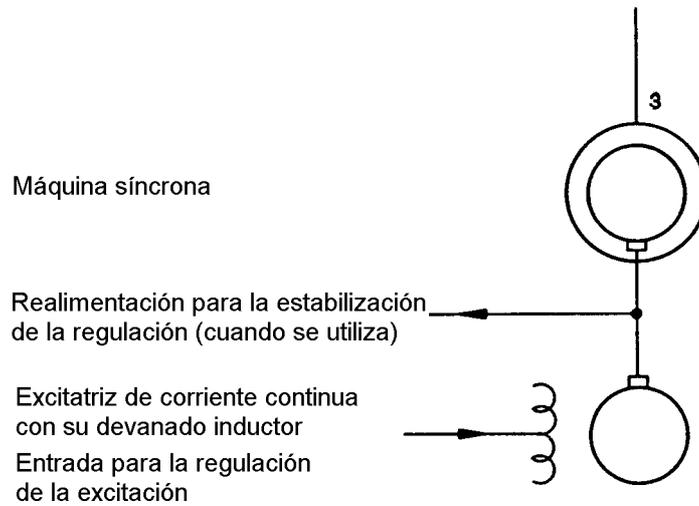


Fig. 2 – Excitatriz de corriente continua con un devanado inductor de excitación independiente

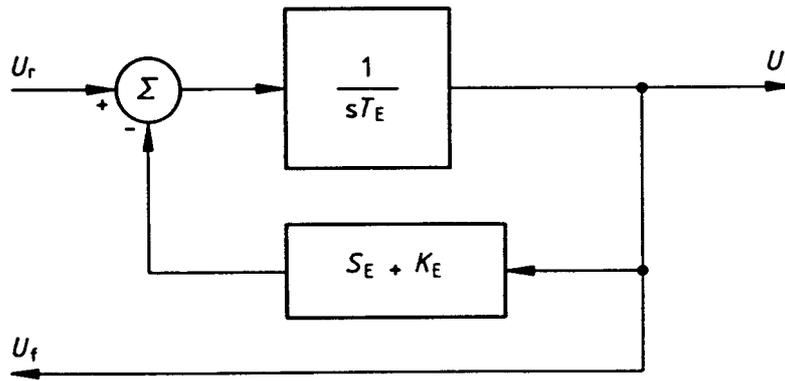


Fig. 3 – Modelo correspondiente a la figura 2

Se utilizan varias formas para la regulación de la excitación:

- reostato accionado electromecánicamente;
- reostato motorizado;

- conexión y puesta en cortocircuito periódicos del circuito inductor en derivación;
- utilización de devanados inductores adicionales de excitación independiente, para acciones de sobreexcitación y de subexcitación;
- utilización de la tensión de bornes de una amplidina en serie con el devanado inductor para acciones de sobreexcitación y de subexcitación.

Considerando la disminución del número y de la importancia de las unidades equipadas de excitatrices de corriente continua, el modelo simple de la figura 3 debería ser adecuado para estos casos.

2.2 Excitatriz de corriente alterna

Las excitatrices de corriente alterna utilizan un alternador asociado a un rectificador estacionario o rotativo para producir la corriente de excitación de la máquina síncrona. Los rectificadores pueden ser controlados o no controlados. En el caso de rectificadores no controlados, la regulación se efectúa actuando sobre uno o varios devanados inductores de la excitatriz de corriente alterna.

Para modelizar la regulación, es esencial conocer la fuente de alimentación de la corriente de excitación de la excitatriz de corriente alterna a través de su equipo de regulación. La fuente puede ser un generador auxiliar, una fuente estática de tensión o una fuente estática compuesta.

La figura 4 muestra la representación gráfica de una excitatriz de corriente alterna que contiene un rectificador estacionario no controlado. El rectificador estacionario está alimentado por el alternador y suministra una corriente continua al devanado inductor de campo de la máquina síncrona por medio de anillos y escobillas. La conexión entre el devanado inductor rotativo de la excitatriz de c.a., y la regulación de la excitación de esta, se realiza también mediante anillos y escobillas.

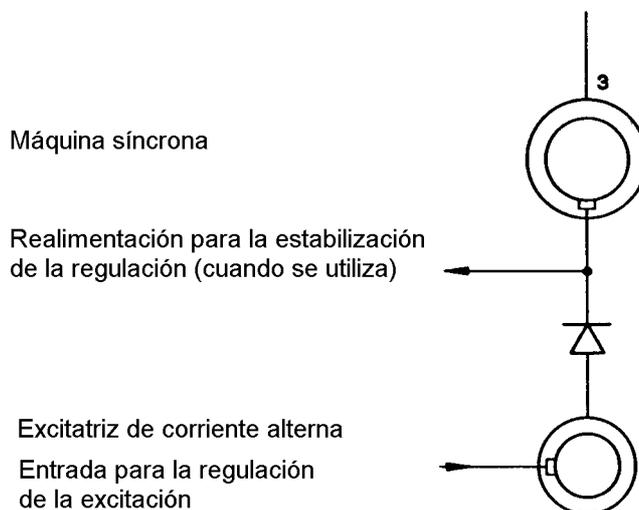


Fig. 4 – Excitatriz de corriente alterna con un rectificador estacionario no controlado

La figura 5 muestra la representación gráfica de una excitatriz de corriente alterna con un rectificador giratorio no controlado (excitatriz sin escobillas), y una excitatriz auxiliar de imanes permanentes para la alimentación del equipo de regulación de la excitación. El rectificador gira sobre el mismo eje que la máquina síncrona y el inducido giratorio de la excitatriz de corriente alterna. La salida del rectificador rotativo está unida directamente al devanado inductor de la máquina síncrona, sin anillos ni escobillas.

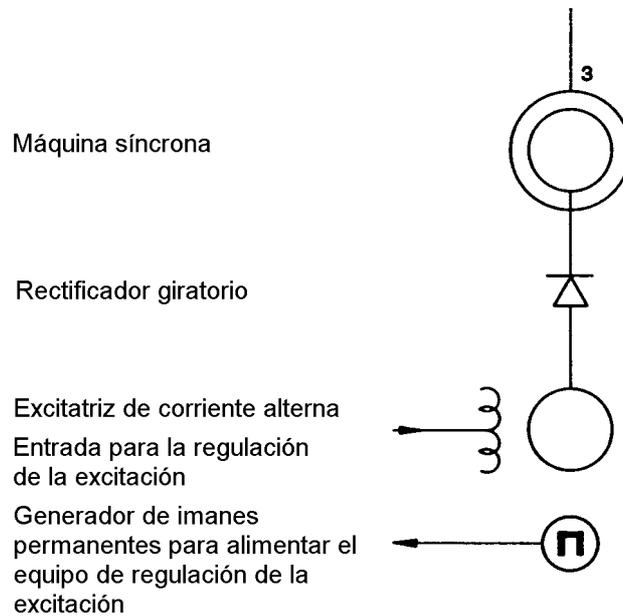


Fig. 5 – Excitatriz de corriente alterna con un rectificador giratorio no controlado (excitatriz sin escobillas)

La excitatriz de corriente alterna puede modelarse conforme a la figura 6, que tiene en cuenta los efectos de la carga de la excitatriz en régimen permanente y en régimen transitorio. (En algunos casos, se puede utilizar un modelo aún más detallado para tener en cuenta los efectos de cargas transitorias.)

En la figura 7 se muestra un modelo simplificado. Aunque sólo tiene en cuenta los efectos de la carga en el caso de régimen permanente por medio de la curva de saturación en carga, puede ser satisfactorio para la mayoría de los estudios. Se puede igualmente utilizar el modelo simplificado cuando no se dispone de datos completos.

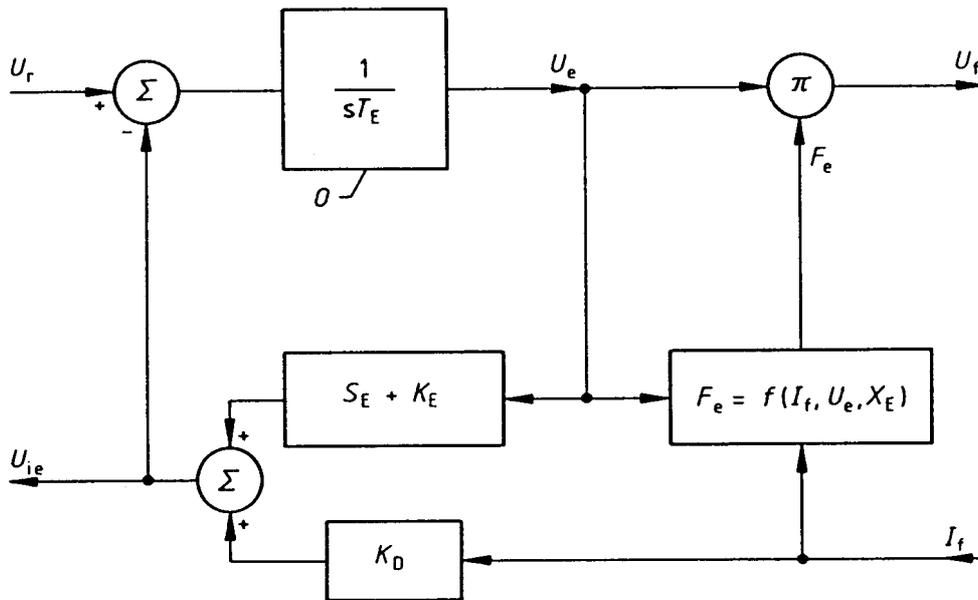


Fig. 6 – Modelo detallado de una excitatriz de corriente alterna

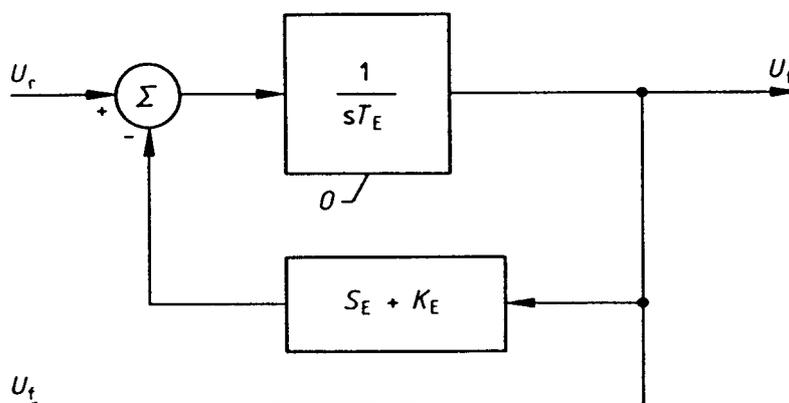


Fig. 7 – Modelo simplificado de una excitatriz de corriente alterna

2.3 Excitatriz estática con fuente de tensión

Las excitatrices estáticas con fuente de tensión están constituidas por transformadores rectificadores, que pueden ser alimentados por un alternador auxiliar montado sobre el mismo eje que la máquina síncrona, por un juego de barras auxiliar que no depende de la tensión del alternador principal, o por la tensión en los bornes de la máquina síncrona. En este último caso, se emplea el término de excitación estática en derivación (o autoexcitación directa), y hay que tener en cuenta las variaciones de tensión de este sistema al determinar las prestaciones y la modelización. La figura 8 muestra la representación gráfica de este sistema.

Se puede utilizar tanto un puente completo de tiristores, o un puente híbrido en el cual la mitad son tiristores, y la otra mitad diodos. Se utiliza frecuentemente el control del ángulo de disparo para limitar el valor de la tensión negativa de techo U_{p-} cuyo valor absoluto puede ser diferente de U_{p+} . El puente mixto no permite la inversión de tensión, y por tanto, el valor de U_{p-} es nulo.

En los equipos más comúnmente utilizados, los puentes con rectificadores controlados permiten únicamente la circulación de valores positivos de la corriente de excitación. Si las perturbaciones en los bornes de la máquina síncrona tienden a hacer circular una corriente de excitación negativa, el modelo matemático de la figura 9 ya no es válido. La tensión en los bornes del devanado inductor de la máquina síncrona ya no estará determinada por el mando del regulador, sino por otras consideraciones que se salen del marco de este norma.

Un equipo que permita la circulación de la corriente de excitación en los dos sentidos solo será necesario en condiciones de funcionamiento no habituales. Para estos sistemas el modelo matemático de la figura 9 es aplicable incluso en estas condiciones.

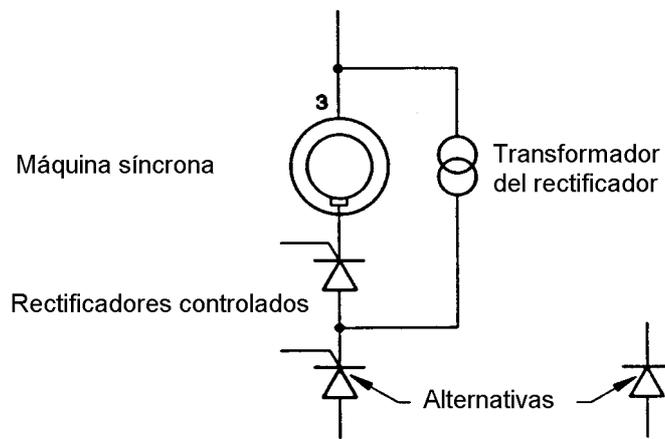
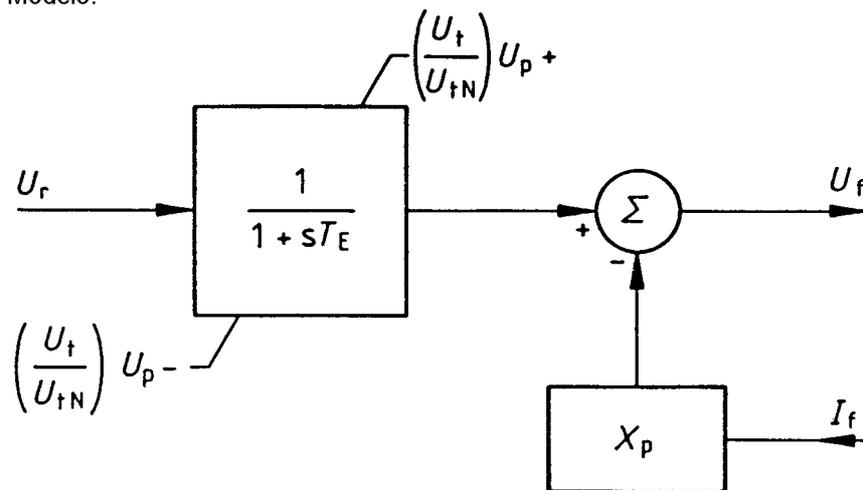


Fig. 8 – Sistema de excitación estática con fuentes de tensión

Modelo:



Representación simbólica:

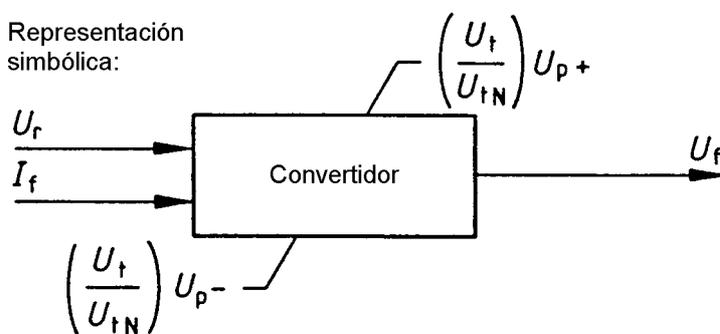


Fig. 9 – Modelo y representación simbólica del sistema de excitación con fuente de tensión

2.4 Excitatriz estática compuesta

Las excitatrices estáticas compuestas utilizan transformadores rectificadores alimentados tanto por una fuente de corriente como por una fuente de tensión, siendo ambas magnitudes de la máquina síncrona. Hay numerosas posibilidades de diseño. A continuación se describen tres de los que se utilizan normalmente.

El primer ejemplo, figura 10, ilustra el concepto de suma de tensiones procedentes de las dos fuentes en serie en el lado de corriente continua de los rectificadores. Los transformadores de intensidad tienen un circuito magnético especial, o están asociados a unas reactancias separadas como se indica en la figura 10, cuyo modelo correspondiente se muestra en la figura 11.

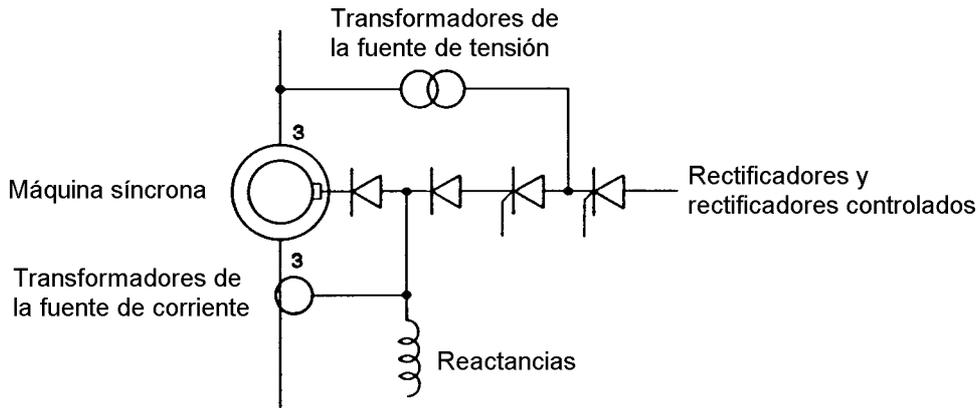


Fig. 10 – Excitatriz estática compuesta, con suma de tensiones en serie en el lado de corriente continua

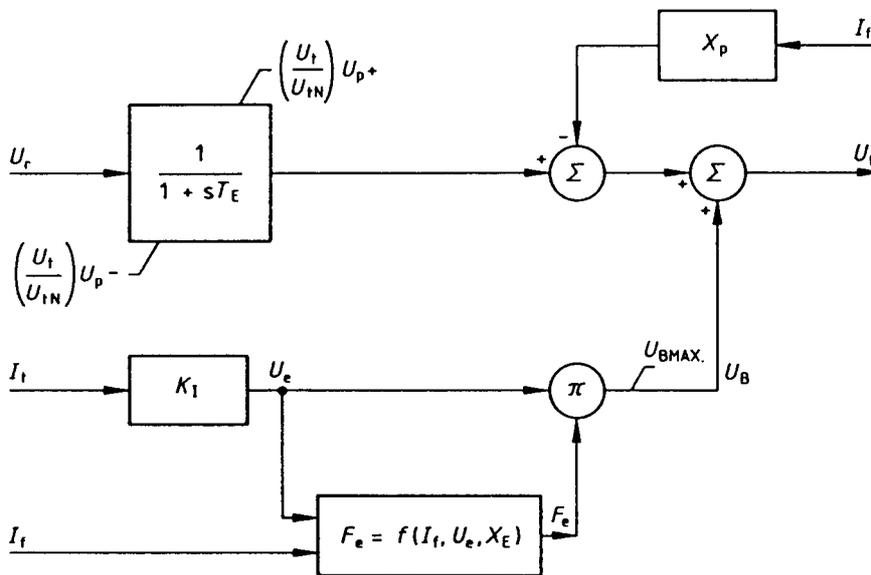


Fig. 11 – Modelo correspondiente a la figura 10

Un segundo ejemplo, figura 12, ilustra el concepto de suma de corrientes procedentes de las dos fuentes en paralelo en el lado de corriente alterna de los rectificadores. Los transformadores de las fuentes de tensión contienen un circuito magnético especial, o están asociados a unas reactancias separadas como se indica en la figura. La regulación se realiza derivando una parte de la suma de las corrientes a través de los rectificadores controlados.

Otra variante del esquema (no representada) utiliza devanados independientes internos de la máquina síncrona como fuentes de tensión, con o sin la suma de la corriente en los bornes de la máquina como segunda fuente.

El modelo matemático, figura 13, es suficientemente general para permitir la adaptación de todos los parámetros de diseño de ambos sistemas.

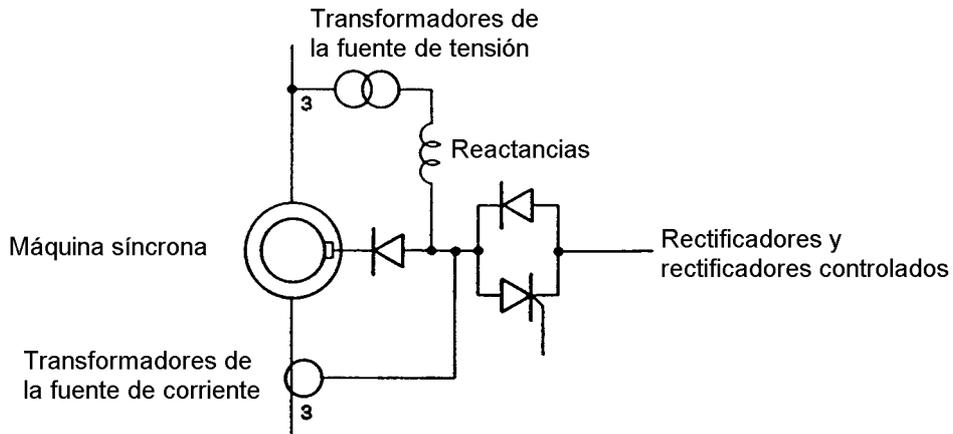


Fig. 12 – Excitatriz estática con fuente compuesta, con suma de corrientes de las dos fuentes del lado de corriente alterna

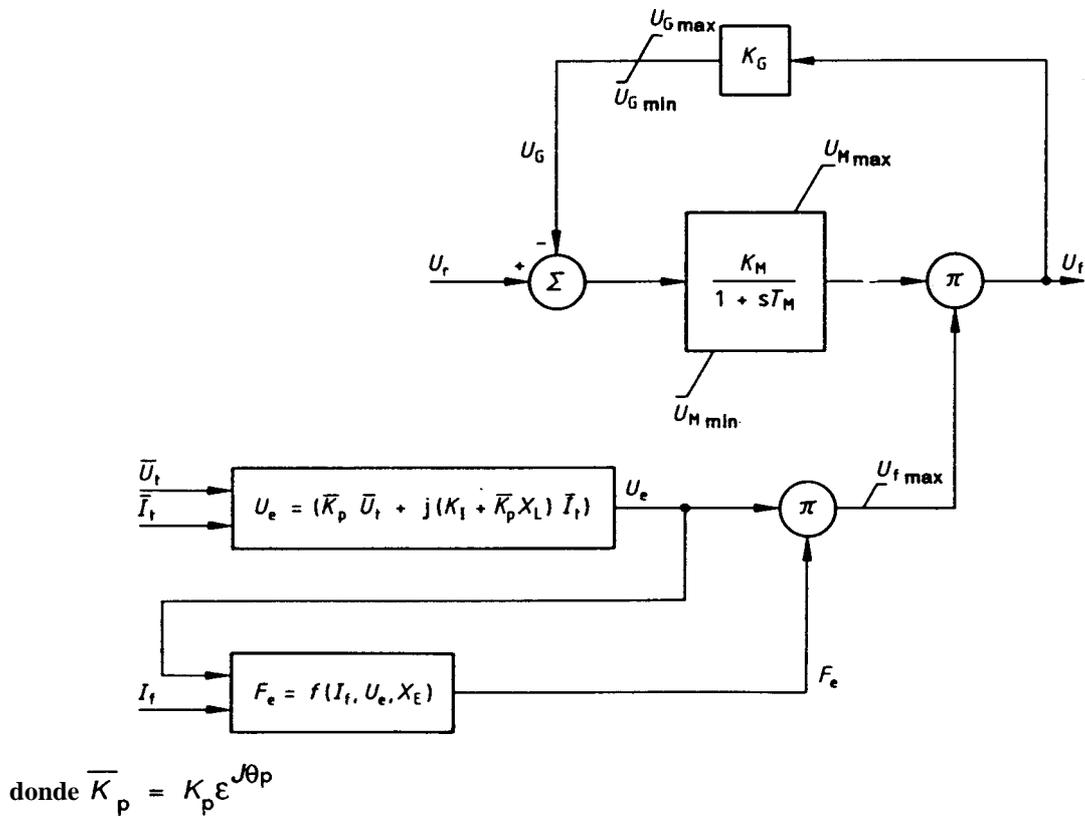


Fig. 13 – Modelo general para excitatriz estática con fuente compuesta

Una variante suplementaria de este sistema utiliza, para la regulación de la tensión de salida de la excitatriz, la saturación de los transformadores de la fuente de corriente. Este sistema está ilustrado en la figura 14, y el modelo matemático en la figura 15.

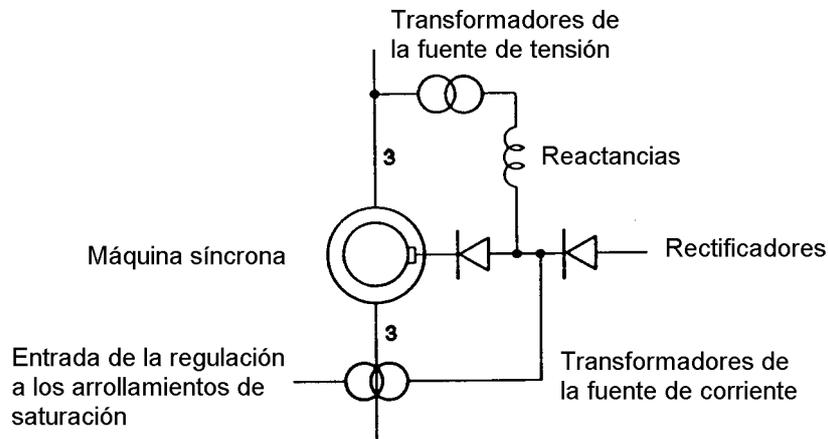


Fig. 14 – Excitatriz estática con fuente compuesta, con suma de las corrientes de las dos fuentes en el lado de corriente alterna

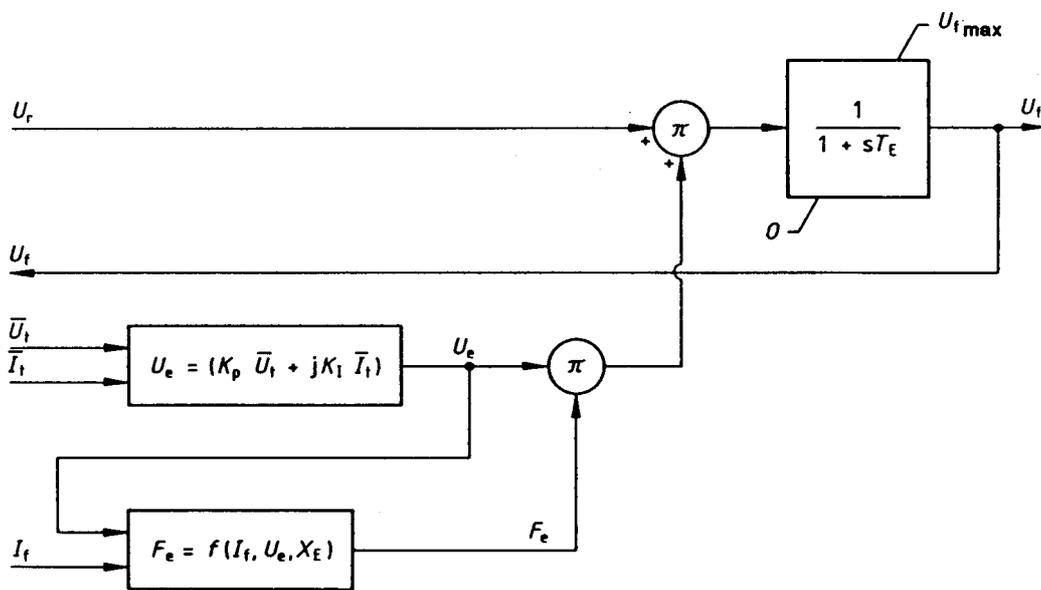


Fig. 15 – Modelo correspondiente a la figura 14

Algunas configuraciones de las excitatrices compuestas no utilizan transformadores separados de dos arrollamientos para la fuente de tensión y para la fuente de corriente. Estos diseños utilizan transformadores de tres arrollamientos, obteniendo la combinación de las fuentes magnéticamente. Las relaciones matemáticas y los esquemas de las figuras 13 y 15 son aplicables a tales sistemas.

2.5 Modelos matemáticos para la función de regulación

Una parte considerable del esfuerzo necesario para preparar los estudios de estabilidad a gran escala, reside en la búsqueda y la evaluación de los datos necesarios para la descripción matemática de los sistemas de excitación correspondientes. La utilización de modelos matemáticos simplificados, con objeto de reducir este esfuerzo, puede restringirse cuando el estudio se extienda más allá de la primera oscilación angular del rotor. La determinación de la estabilidad de las redes modernas de potencia interconectadas exige a menudo proseguir la simulación durante varios segundos y varias oscilaciones angulares. En este caso, se debe renunciar a veces a las simplificaciones.

Los equipos de diversos fabricantes tienen en común las funciones básicas de la regulación de la excitación, que pueden ser descritas matemáticamente por una regulación PID generalizada. Esto permite la representación de las partes esenciales de la regulación de la excitación en una forma normalizada.

En la regulación PID de la figura 16, el primer bloque con las constantes de tiempo T_{C2} , T_{B2} representa la función de derivación (D), los otros bloques con las constantes de tiempo T_{C1} , T_{B1} y la ganancia K_R , la función PI. Las limitaciones de las salidas $U_{r \text{ máx.}}$, $U_{r \text{ mín.}}$ son, por su efecto, del tipo con antisaturación, es decir, que impiden que el término de integración supere estos límites. La comparación entre los límites con antisaturación y sin antisaturación está incluida en el anexo D. Un operador lógico sirve de selector de señal cuando se tienen que representar estos límites.

Los términos que no son ni aplicables ni exigidos para aplicación específica del modelo normalizado se fijan a 1 ó 0 respectivamente. En función de la solución técnica, es necesario a veces dar al menos un valor mínimo de la constante de tiempo de retraso, coordinada con la duración del paso de cálculo digital, para evitar la inestabilidad numérica del cálculo.

La función proporcional-integral se estructura a veces como se muestra en la figura 17, con una limitación con antisaturación suministrada por amplificadores proporcionales en un elemento de realimentación. La figura 17 da igualmente la relación algebraica para expresar esta estructura en los términos de la figura 16. Cuando se debe representar el límite con antisaturación, puede ser necesaria la estructura de la figura 16 para evitar problemas en el cálculo numérico, debido a la ganancia elevada de los amplificadores en la realimentación.

La figura 18 muestra un modelo básico de tipo PID, que es uno de los primeros que se han introducido y es muy frecuentemente utilizado, cuyo comportamiento es similar al de la figura 16, pero introduciendo un retraso en el bloque de realimentación, en vez de una función de adelanto en la cadena directa. Este modelo se plantea como una opción, ya que no es posible la equivalencia con la estructura de la figura 16.

La modelización de la detección de tensión en los bornes de la máquina síncrona es común a todos los reguladores de tensión. La figura 19 muestra la detección de tensión combinada con la compensación de la intensidad de carga en el lado de corriente alterna. En este caso, las magnitudes de entrada (tensión y corriente de la máquina síncrona) son introducidas en forma fasorial, y la señal resultante se rectifica. La compensación de la intensidad de carga se utiliza normalmente en una de las siguientes formas:

- cuando los alternadores están conectados en paralelo sin impedancia entre ellos, la compensación de corriente se utiliza para crear una impedancia de acoplamiento artificial, de modo que los alternadores se reparten correctamente la potencia reactiva. En este caso, se da a X_C un valor positivo;
- cuando un único alternador está unido al sistema eléctrico de potencia a través de una impedancia no despreciable, o cuando dos o varios alternadores están conectados por medio de transformadores individuales, puede ser deseable regular la tensión en un punto situado más allá de los bornes de la máquina. Por ejemplo, puede ser deseable compensar una parte de la impedancia del transformador. En este caso, R_C y X_C toman valores negativos.

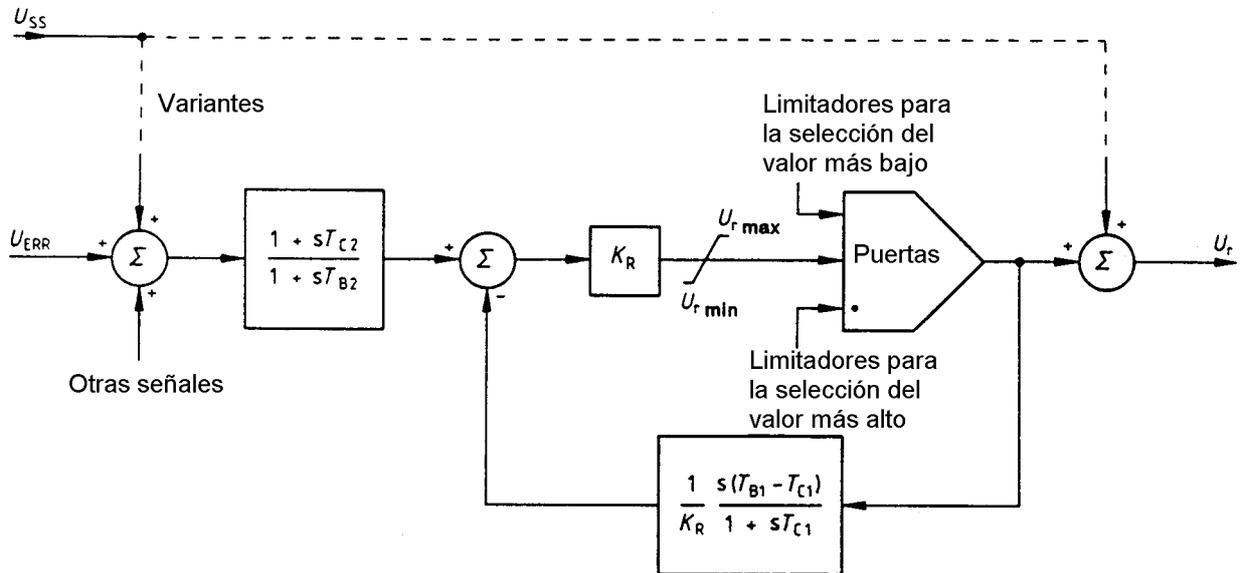
En la mayoría de los casos de compensación de la intensidad de carga, la componente R_C es despreciable y sólo es necesario un valor para X_C . En este caso, es suficiente reducir la influencia de la componente reactiva de la intensidad y esta función restringida se denomina “compensación de corriente reactiva”. La influencia de la corriente reactiva puede añadirse además, bajo la forma de una señal de corriente continua filtrada, a la señal filtrada de la señal de tensión en los bornes, de acuerdo con la figura 20.

Cuando no se hace uso de la compensación, en las figuras 19 y 20 sólo permanece el filtro para la tensión en los bornes rectificada. Mientras que el filtrado puede ser complejo por sí mismo, para la modelización se puede habitualmente reducir a la única constante de tiempo indicada. En numerosos sistemas, esta constante de tiempo es bastante pequeña y se debería prever el poder ajustarla a cero.

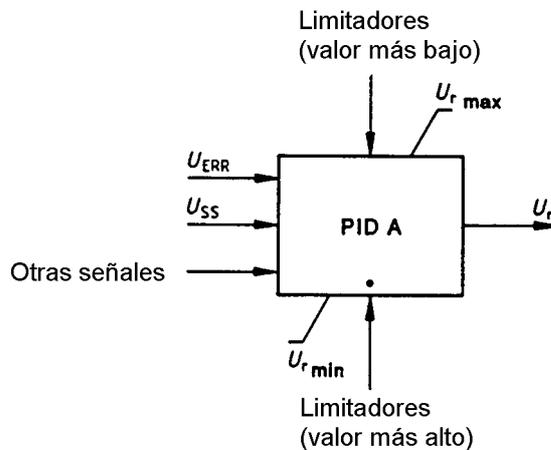
Algunos compensadores pueden utilizar las potencias activa y reactiva como variables de compensación. Las señales correspondientes pueden tener filtros diferentes del que se utiliza para la tensión en los bornes. La figura 21 representa un compensador de este tipo.

La tensión en los bornes, después de añadir la influencia del compensador de carga y del filtrado, se compara con una referencia que representa el valor deseado de la tensión en los bornes. La señal de referencia equivalente del regulador de tensión, U_{REF} , se elige de forma que satisfaga las condiciones iniciales de funcionamiento.

Hay que hacer notar que cuando se utiliza la compensación, ésta provoca un amortiguamiento positivo o negativo en caso de oscilaciones de potencia.

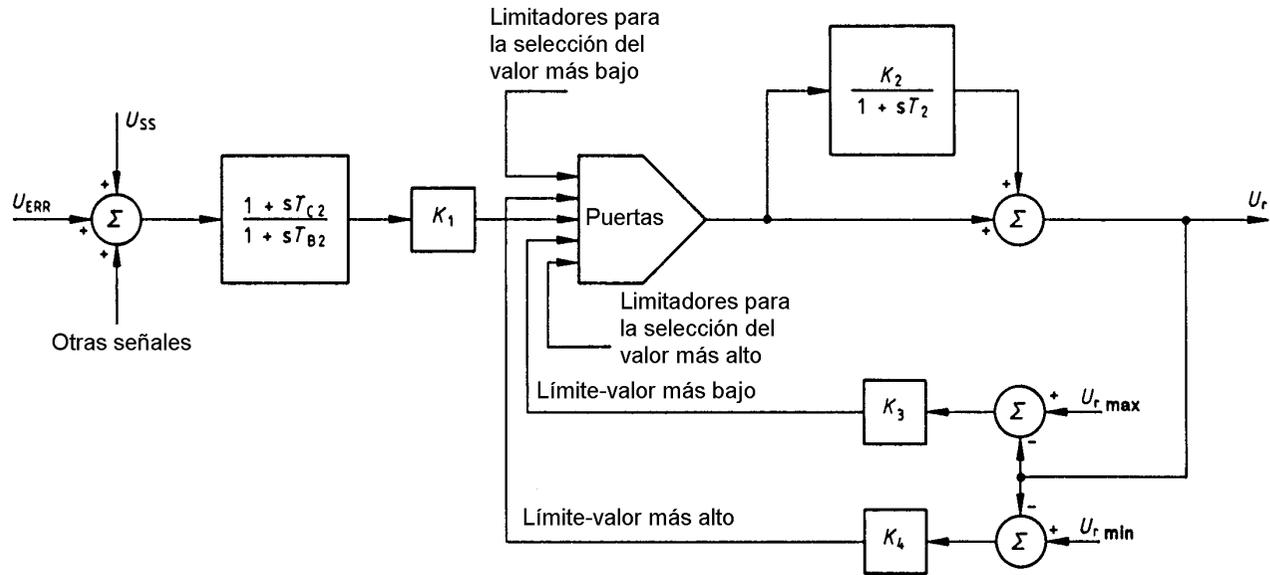


Símbolo:



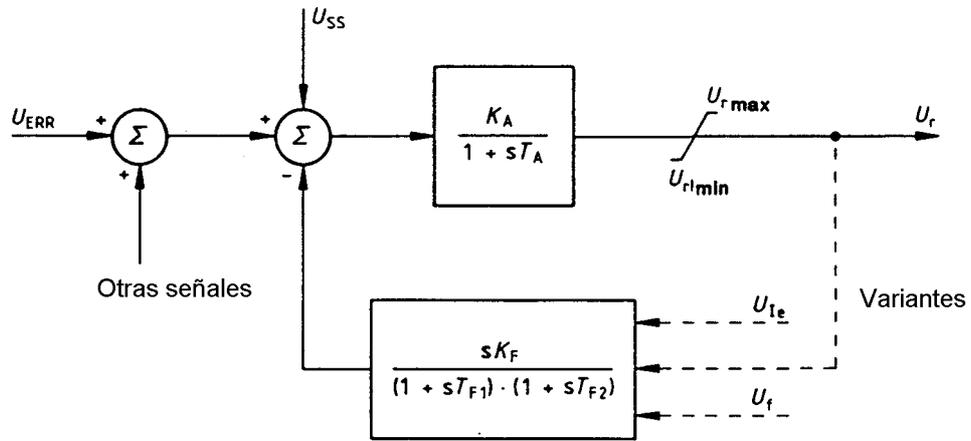
NOTA - • Indica la prioridad entre limitadores.

Fig. 16 – Regulador PID generalizado con limitadores. Estructura y modelo matemático



Equivalencia con la figura 16:
$$F_{(s)} = \frac{1 + s T_{C2}}{1 + s T_{B2}} K_1 (1 + K_2) \frac{1 + s \frac{T_2}{1 + K_2}}{1 + s T_2} = \frac{1 + s T_{C2}}{1 + s T_{B2}} K_R \frac{1 + s T_{C1}}{1 + s T_{B1}}$$

Fig. 17 – Variante de regulador PID-Estructura y equivalencia con la figura 16



Símbolo:

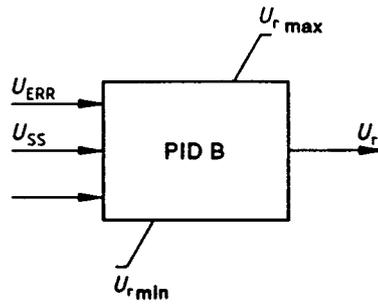


Fig. 18 – Regulador de avance-retraso sin limitadores

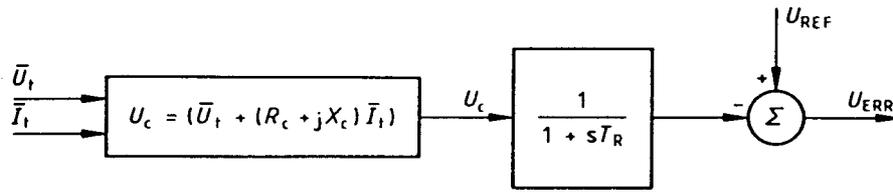


Fig. 19 – Detección de la tensión en los bornes y compensación de la intensidad de carga

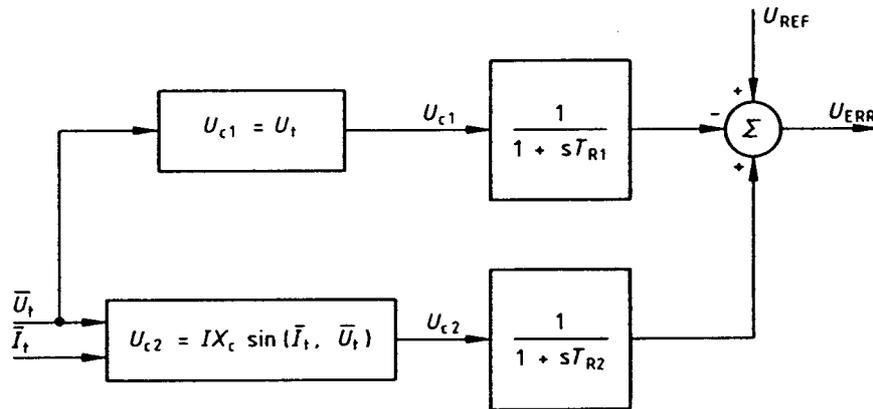
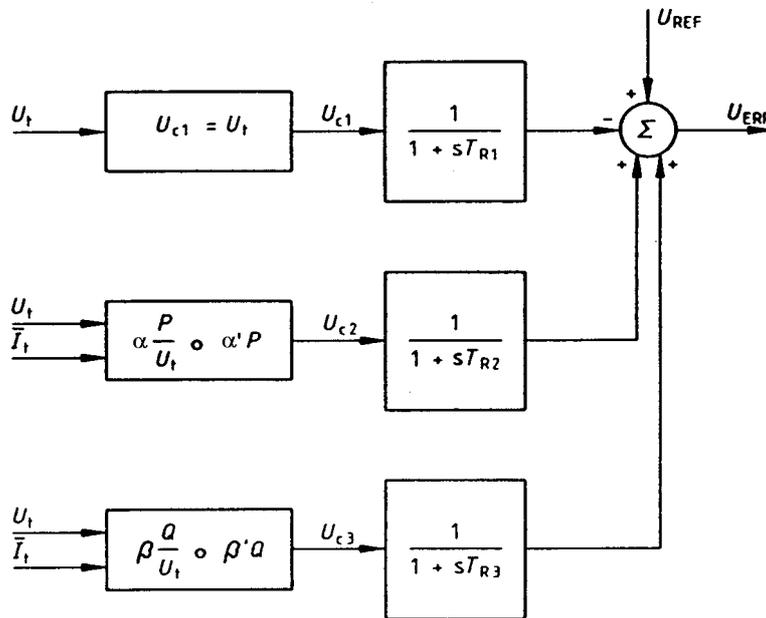


Fig. 20 – Detección de la tensión de bornes y compensación de la corriente reactiva en la unión de referencia



donde
 $\alpha, \alpha', \beta, \beta'$ son números complejos
 P, Q son las potencias activa y reactiva en los bornes del alternador

Fig. 21 – Detección de la tensión de bornes y compensación de la potencia activa y reactiva en la unión de referencia

3 NOMENCLATURA

3.1 Parámetros

| | |
|--|--|
| T_E | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Constante de tiempo asociada a las excitatrices rotativas de corriente alterna y de corriente continua.} \\ \text{Constante de tiempo asociada al arrollamiento de saturación de las excitatrices estáticas.} \\ \text{Constante de tiempo asociada al control del puente de tiristores.} \end{array} \right.$ |
| S_E | Función de saturación asociada a las excitatrices rotativas de corriente alterna y de corriente continua. |
| K_E | Constante asociada a la parte auto-excitada la autoexcitación de las excitatrices rotativas de corriente alterna y de corriente continua. Para las excitatrices de excitación independiente, $K_E = 1$. |
| K_M | Ganancia de la cadena directa del bucle interno del regulador de excitación de las excitatrices estáticas compuestas. |
| K_D | Coefficiente desmagnetizante, función de las reactancias de las excitatrices de corriente alterna. |
| X_E | Factor de carga del rectificador, proporcional a la reactancia de conmutación de la fuente de tensión, de la fuente de corriente o de la fuente equivalente combinada de tensión y de corriente. |
| T_M | Constante de tiempo equivalente del bucle interno del regulador de excitación en las excitatrices estáticas compuestas. |
| F_e | Factor de caída de tensión debida a la conmutación, véase el anexo B. |
| K_I | Constante asociada al circuito de entrada de corriente. |
| K_p | Constante asociada al circuito de entrada de tensión. |
| X_L | Coefficiente asociado al cálculo de la tensión interna del devanado del generador, proporcional a la reactancia de dispersión del estator del generador. |
| $U_{f \text{ máx.}}$ | Tensión de salida máxima, correspondiente al nivel de saturación, para una excitatriz compuesta. |
| $U_{r \text{ máx.}}$ $U_{r \text{ mín.}}$ | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Valores máximo y mínimo de la tensión de salida del regulador.} \end{array} \right.$ |
| $U_{B \text{ máx.}}$ | Tensión máxima correspondiente al nivel de saturación de la fuente de corriente para una excitatriz compuesta. |
| U_{p+} U_{p-} | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Tensiones de salida máxima y mínima, de vacío, de la excitatriz estática con fuente de tensión cuando el} \\ \text{alternador proporciona su tensión asignada.} \end{array} \right.$ |
| K_G | Ganancia de la realimentación del bucle interno del regulador de campo. |
| $U_{G \text{ máx.}}$ $U_{G \text{ mín.}}$ | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Límites máximo y mínimo de la realimentación del bucle interno del regulador de campo.} \end{array} \right.$ |

| | |
|--|--|
| $T_R, T_{R1}, T_{R2}, T_{R3}$ | Constantes de tiempo asociadas al transductor de tensión en los bornes y al compensador de la intensidad de carga. |
| X_p | Factor de carga del rectificador para los convertidores de fuente de tensión. |
| K_R, K_A, K_F K_1, K_2, K_3, K_4 | } Constantes de ganancias asociadas al regulador de tensión. |
| $T_{B1}, T_{B2}, T_{C1}, T_{C2}$ T_A, T_2, T_{F1}, T_{F2} | |
| $X_c, R_c, \alpha, \alpha', \beta, \beta'$ | Constantes de ganancia asociadas a los compensadores de carga. |

3.2 Variables

| | |
|------------------|---|
| U_r | Salida del regulador. |
| U_f | Tensión de excitación del alternador, salida del sistema de excitación (en valor por unidad con relación a la tensión de excitación de entrehierro del generador). |
| I_f | Intensidad de excitación del alternador (en valor por unidad con relación a la intensidad de excitación de entrehierro del generador). |
| \bar{U}_t, U_t | Valores fasorial y escalar de la tensión en los bornes del alternador (en valor por unidad en relación al valor asignado). |
| \bar{I}_t, I_t | Valores fasorial y escalar de la corriente en los bornes del alternador (en un valor por unidad de valor asignado). |
| U_e | Tensión de la excitatriz detrás de la reactancia de conmutación (en valor por unidad con relación al valor correspondiente a la tensión de excitación de entrehierro del alternador). |
| U_{REF} | Tensión de referencia del regulador (determinada para satisfacer las condiciones iniciales). |
| U_B | Tensión de salida de la fuente de corriente de una excitatriz compuesta. |
| U_{SS} | Salida de los bucles de estabilización. |
| U_{ERR} | Señal de error del circuito de regulación de tensión. |
| U_{ie} | Caída de tensión en la resistencia del devanado de excitación de la excitatriz. |

ANEXO A

SISTEMA DE VALORES POR UNIDAD (p.u.)

En los estudios de redes eléctricas las corrientes y las tensiones de un alternador están expresadas en valores por unidad. Estos valores se obtienen generalmente utilizando el sistema por unidad, en el cual el valor de base:

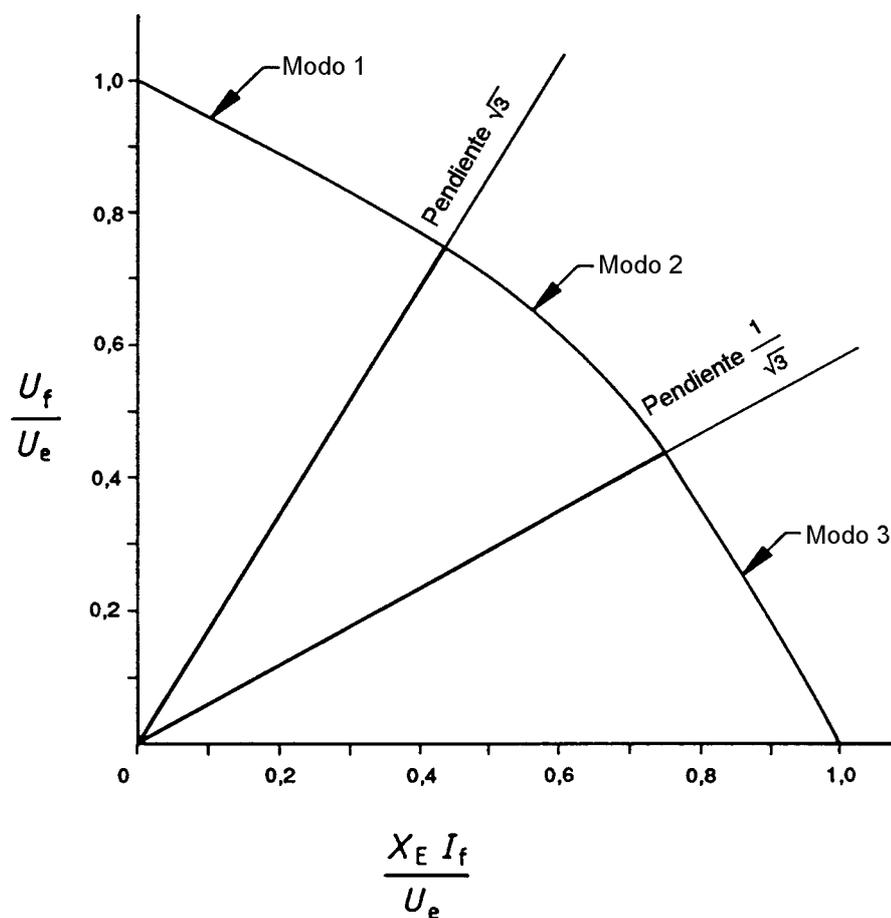
- de la tensión en los bornes del alternador es la tensión nominal;
- de la corriente del estator es la intensidad nominal;
- de la corriente de excitación del alternador, es la intensidad de excitación necesaria para generar la tensión nominal del alternador sobre la recta del entrehierro;
- de la tensión de excitación del alternador es la tensión de excitación correspondiente.

Los modelos de los sistemas de excitación deberían integrarse con los modelos de los alternadores en los bornes del estator y del devanado de excitación. Las señales que deben sumarse a la tensión por unidad en los bornes del alternador a la entrada del regulador de tensión, deberían ser en valores por unidad compatibles. La corriente suministrada por la excitatriz debería expresarse en valor por unidad en la misma base que la intensidad de excitación del alternador, y la tensión proporcionada por la excitatriz debería expresarse en la misma base que la tensión de excitación del alternador.

ANEXO B**CARACTERÍSTICA DE REGULACIÓN DE UN RECTIFICADOR**

Todas las fuentes de corriente alterna que alimentan los circuitos de los rectificadores tienen una impedancia interna predominantemente inductiva. El efecto de esta impedancia altera el proceso de conmutación y provoca una disminución de la tensión media rectificadora al aumentar la intensidad de carga, según una ley extremadamente no lineal. Los rectificadores trifásicos de onda completa, comúnmente utilizados, tienen tres modos de funcionamiento distintos. Las ecuaciones que caracterizan estos tres modos están determinadas por la corriente suministrada por el rectificador.

La figura B.1 muestra la característica de la tensión en función de la intensidad suministrada y las ecuaciones correspondientes. Para los valores de X_E bajos, no se necesita modelizar más que el modo 1, como se puede apreciar en el modelo de la figura 9.



Si $\frac{X_E I_f}{U_e} < 0,433$ entonces $F_e = 1 - 0,577 \left(\frac{X_E I_f}{U_e} \right)$

Si $0,433 < \frac{X_E I_f}{U_e} < 0,75$ entonces $F_e = \sqrt{0,75 - \left(\frac{X_E I_f}{U_e} \right)^2}$

Si $\frac{X_E I_f}{U_e} > 0,75$ entonces $F_e = 1,732 \left(1 - \frac{X_E I_f}{U_e} \right)$

Fig. B.1 – Característica externa del rectificador y ecuaciones correspondientes

ANEXO C

FUNCIÓN DE SATURACIÓN

La función de saturación S_E de la excitatriz representa el aumento de las necesidades de excitación de la excitatriz por efecto de la saturación. Para un valor dado de la tensión de salida de la excitatriz, las magnitudes A, B, C se definen como la excitación de la excitatriz necesaria para producir esta tensión, respectivamente en la curva de saturación con resistencia de carga constante, sobre la recta del entrehierro y sobre la curva de saturación en vacío (figura C.1).

Para las excitatrices de corriente alterna, cuando la influencia de la carga no se modeliza separadamente (modelo figura 7) y para las excitatrices de corriente continua de colector:

$$S_E = \frac{A - B}{B}$$

Para las excitatrices de corriente alterna, cuando se modelizan separadamente los efectos sobre la carga de la reactancia síncrona y de la reactancia de conmutación (figura 6):

$$S_E = \frac{C - B}{B}$$

En general, la función de saturación puede estar definida suficientemente por dos puntos, elegidos normalmente a 1,0 y 0,75 veces el valor de techo de la tensión de salida de la excitatriz.

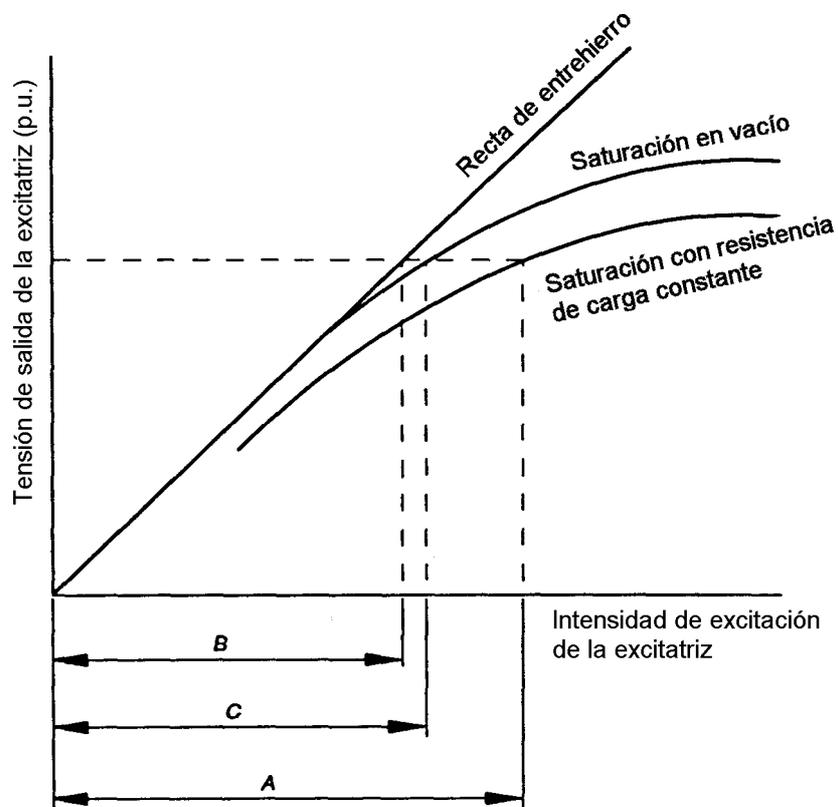


Fig. C.1 – Característica de saturación de la excitatriz

ANEXO D

REPRESENTACIÓN DE LOS LÍMITES

En los circuitos de control y en la modelización de las excitatrices se deben considerar dos tipos de límites. La limitación “sin antisaturación” permite a la magnitud de salida y superar los límites, pero la magnitud x tiene que variar solamente entre los límites (figura D.1). La limitación “con antisaturación” (figura D.2) no permite a la magnitud y superar los límites, lo que puede exigir, para la realización práctica, alguna forma de realimentación. La descripción matemática de la limitación con antisaturación, dada en la figura D.2, no se aplica a la función de retraso que se muestra.

Si la limitación con antisaturación se aplica a funciones más complejas, la representación completa no simplificada depende de la función. El regulador PI de la figura 16, por ejemplo, tiene en efecto una limitación con antisaturación, como muestra el símbolo del regulador en la misma figura. En el modelo detallado, la limitación con antisaturación resulta de una limitación sin antisaturación en la parte proporcional de la trayectoria directa con la ganancia K_R y de una realimentación en torno a esta componente.

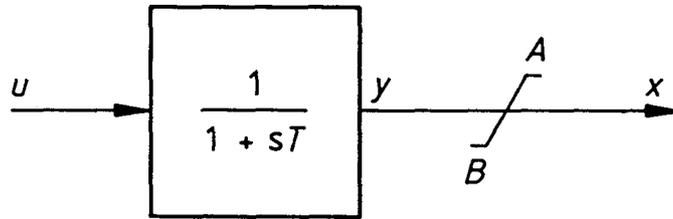


Fig. D.1 – Limitador sin antisaturación

Ecuaciones del sistema: $dy / dt = (u - y) / T$

- Si $B \leq y \leq A$, entonces $x = y$
- Si $y > A$, entonces $x = A$
- Si $y < B$, entonces $x = B$

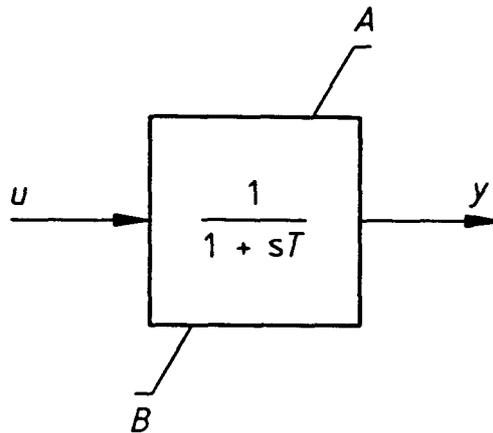


Fig. D.2 – Limitador con antisaturación

Ecuaciones del sistema: $f = (u - y) T$

- Si $y = A$ y $f > 0$, entonces dy / dt se mantiene igual a 0
- Si $y = B$ y $f < 0$, entonces dy / dt se mantiene igual a 0
- Si no $dy / dt = f$
- $B \leq y \leq A$

ANEXO E

**EJEMPLOS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS
PARA SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESPECIALIZADOS**

- Figura E.1: Ejemplo de excitatriz estática con regulación PID de la tensión de los bornes de la máquina síncrona, sin utilización de limitadores.
- Figura E.2: Ejemplo de aplicación de un limitador de corriente de excitación en una excitatriz estática con regulación PID de la tensión en los bornes de la máquina síncrona.
- El límite de la intensidad de excitación, $I_{f \text{ ref}}$, puede ser una constante o ser modificado en funcionamiento según la aplicación considerada.
- Figura E.3: Ejemplo de excitatriz estática con regulación PID de la tensión de los bornes de la máquina síncrona y con regulación de la intensidad de excitación en un bucle interno.
- Figura E.4: Ejemplo de excitatriz de corriente alterna con regulación PID de la tensión en los bornes de la máquina síncrona y con control en paralelo de la corriente de excitación. El amplificador intermedio es un convertidor de tiristores alimentado por una fuente de tensión constante tal como un alternador de imanes permanentes.
- Figura E.5: Ejemplo de una excitatriz de corriente alterna con regulación PID de la tensión en los bornes de la máquina síncrona, y un bucle secundario de regulación para la corriente de excitación de la excitatriz. El amplificador intermedio es un convertidor de tiristores alimentador por la tensión en los bornes.

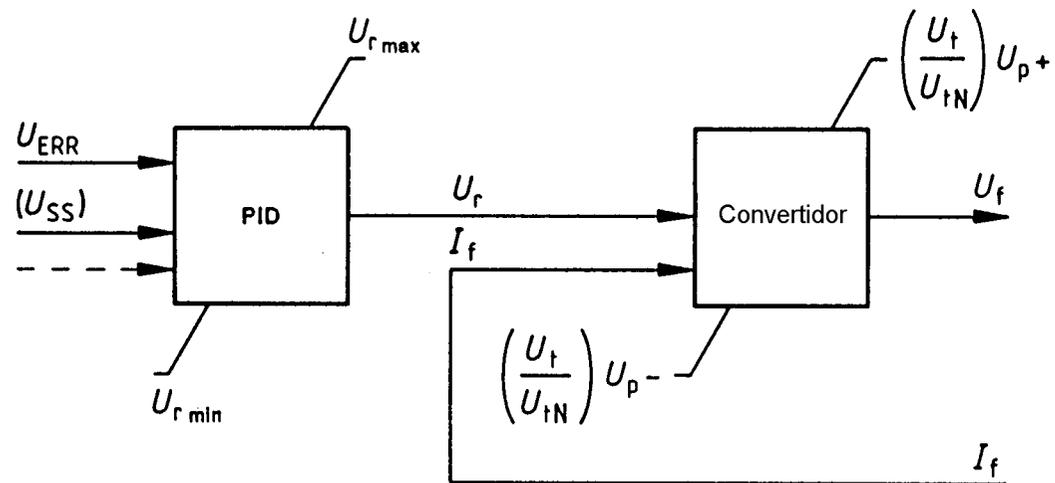


Fig. E.1 – Ejemplo de aplicación: excitatriz estática sin limitadores

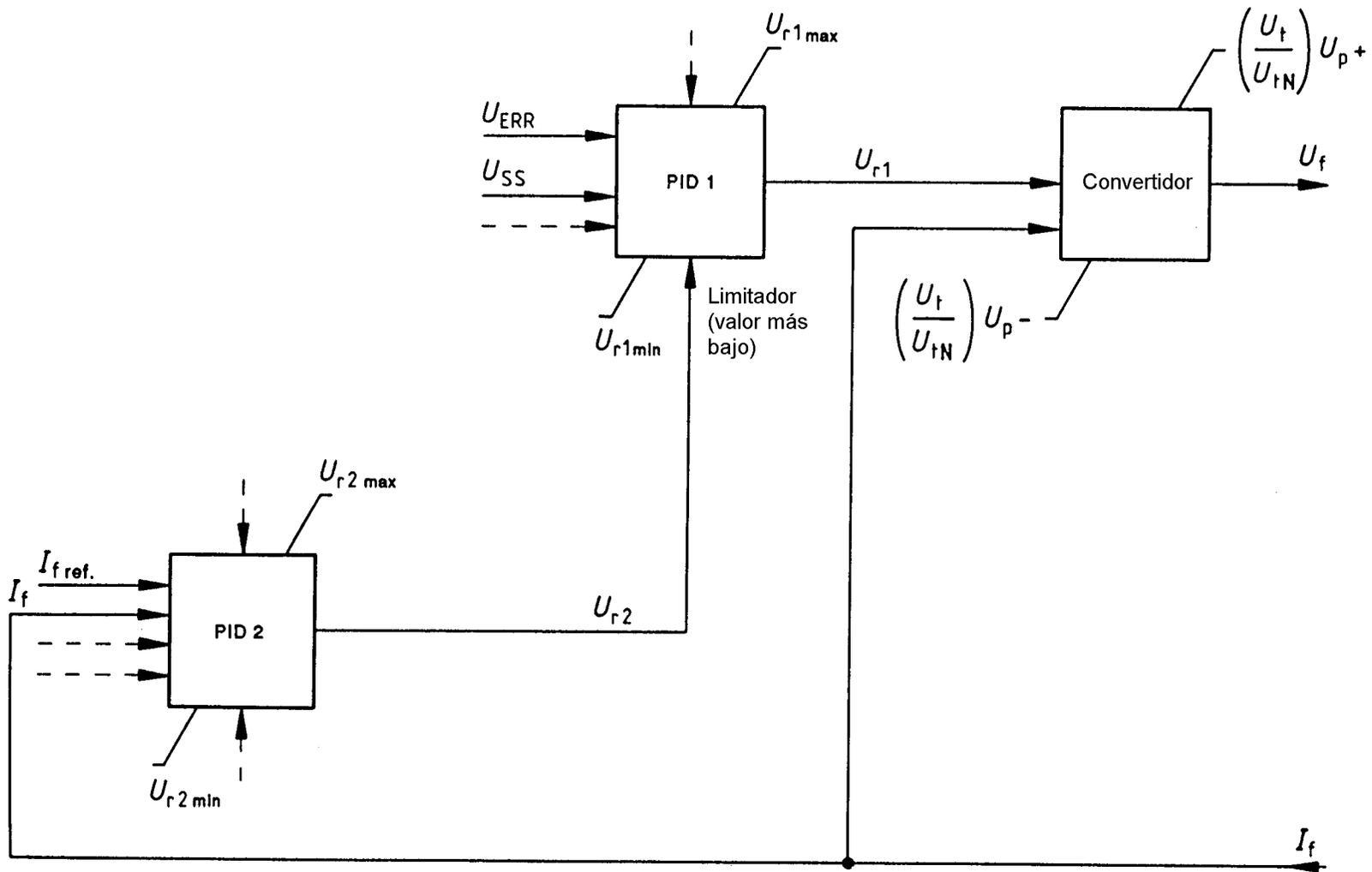


Fig. E.2 – Ejemplo de aplicación: limitador de la corriente de excitación de una excitatriz estática por medio de una puerta de valor más bajo

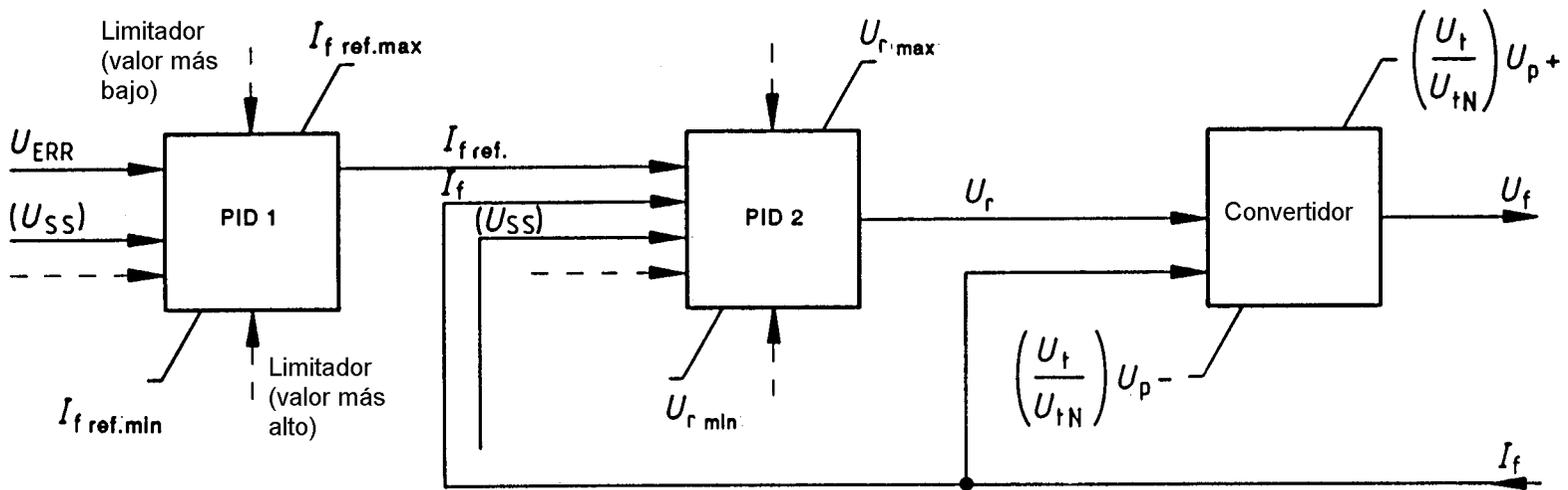


Fig. E.3 – Ejemplo de aplicación: excitatriz estática con regulador de corriente de excitación en un bucle interno

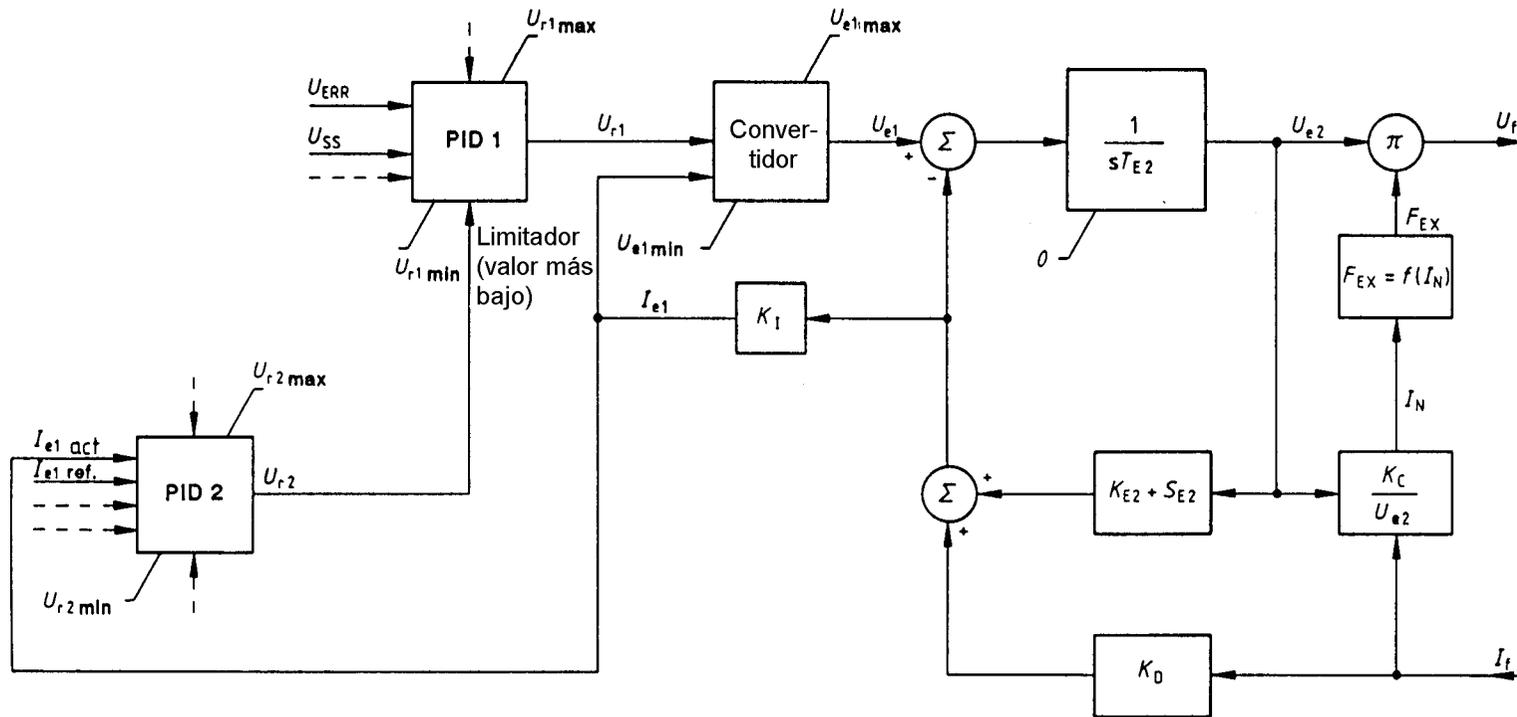


Fig. E.4 –Ejemplo de aplicación: excitatriz de corriente alterna con diodos- corriente de excitación de la excitatriz alimentada por un puente de tiristores (fuente de tensión constante).
Regulador de tensión con un limitador de la corriente de excitación de la excitatriz por medio de una puerta de valor más bajo.

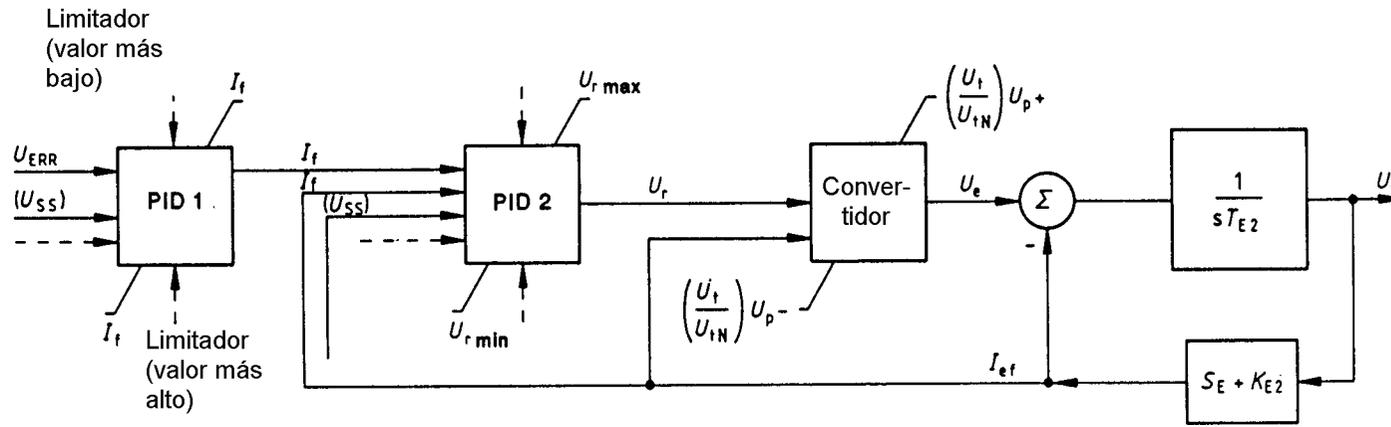


Fig. E.5 – Ejemplo de aplicación: excitatriz rotativa con regulador de la corriente de excitación en un bucle interno

