



universidad  
de león



# **Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial**

## **GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

**EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN EN  
MÁQUINAS ROTATIVAS**

**EVOLUTION OF EXCITATION SYSTEMS IN ROTATING  
MACHINES**

(Septiembre, 2022)

Autor: Noelia González Ramos  
Tutor: Natalia Prieto Fernández

<b>UNIVERSIDAD DE LEÓN</b> <b>Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial</b>  <b>GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA</b> <b>Trabajo de Fin de Grado</b>	
<b>ALUMNO:</b> Noelia González Ramos	
<b>TUTOR:</b> Natalia Prieto Fernández	
<b>TÍTULO:</b> Evolución de los sistemas de excitación en máquinas rotativas	
<b>TITLE:</b> Evolution of excitation systems in rotating machines	
<b>CONVOCATORIA:</b> Septiembre, 2022	
<b>RESUMEN:</b> <p>Este trabajo se centra en los sistemas de excitación para máquinas rotativas, en concreto, para generadores síncronos trifásicos. Se comienza exponiendo la historia de estos sistemas a lo largo de los años y se introduce la máquina rotativa. Posteriormente el trabajo se centra en los sistemas de excitación existentes, sus funciones, ventajas y desventajas, así como diferentes configuraciones de los mismos. Entre los tipos de sistemas de excitación existentes se encuentran los sistemas de excitación estática y rotativa, los de corriente continua y los de diodos rotativos, los de corriente alterna, los autoexcitados y los alimentados a través de alimentación auxiliar. A continuación se trata el control automático de la tensión: regulación automática de la tensión y regulación automática de la generación y se exponen los fundamentos de la tecnología de los convertidores: generación de corriente continua a partir de corriente alterna, proceso de conmutación, convertidor de potencia controlado, convertidores de potencia más frecuentes y sus modos de funcionamiento. Finalmente, se expone la secuencia de inicio para poner en marcha el sistema de excitación.</p>	
<b>ABSTRACT:</b> <p>This project focuses on excitation systems for rotating machines, specifically, for three-phase synchronous generators. It begins by exposing the history of these systems over the years and the rotary machine is introduced. Subsequently, the project focuses on the existing excitation systems, their functions, advantages and disadvantages, as well as their different configurations. Existing types of excitation systems include static and rotary excitation systems, direct current and rotating diode excitation systems, alternating current excitation systems, self-excited excitation systems, and those powered by auxiliary power. Next, automatic voltage control is discussed: automatic voltage regulation and automatic generation regulation, and the fundamentals of converter technology are discussed: generation of direct current from alternating current, switching process, converter of controlled power, most frequent power converters and their operating modes. Finally, the startup sequence to start the excitation system is exposed.</p>	
<b>Palabras clave:</b> Excitación, máquinas, rotativas, electrónica.	
<b>Firma de la alumna:</b>	<b>VºBº Tutora:</b>

# Resumen

Este proyecto trata sobre los sistemas de excitación para máquinas rotativas, en particular, para generadores síncronos trifásicos, los cuales deben asegurar el suministro de energía eléctrica de calidad en el preciso momento en el que es demandada, adaptándose a la variación en la demanda y cumpliendo los parámetros de funcionamiento del sistema el valor eficaz de la tensión de suministro y su frecuencia, así como la continuidad del mismo.

Primeramente se hace un recorrido a través de la historia del desarrollo de estos sistemas, los cuales han ido evolucionando a lo largo de los años según ha ido evolucionando la tecnología de la electrónica de potencia, y se entra en materia hablando sobre las máquinas síncronas, para luego centrarse en los sistemas de excitación de las mismas.

Estos sistemas de excitación cumplen una función primordial, consistente en alimentar al devanado del rotor del alternador con corriente continua con las características adecuadas, la cual hace posible el funcionamiento del alternador.

Todos los elementos técnicos que cumplen la función de producir esta corriente de excitación y poder ejercer un control y actuación sobre ella, se denomina sistema de excitación.

A parte de esta labor fundamental, se describen otras funciones muy importantes que realizan los sistemas de excitación.

Anteriormente al desarrollo tecnológico de los semiconductores de potencia, diodos y tiristores, que existe actualmente, se utilizaban generadores de corriente continua para alimentar al rotor del alternador. En este trabajo se estudian los diferentes tipos de sistemas de excitación existentes, sus ventajas e inconvenientes y sus campos de aplicación. Estos sistemas de excitación son los sistemas de excitación directa o con excitatriz estática, los sistemas de excitación indirecta o con excitatriz rotativa, dentro de los cuales se encuentran los de corriente continua y los de diodos rotativos, los sistemas de excitación de corriente alterna, los sistemas autoexcitados y los alimentados a través de

alimentación auxiliar. Además, se ven diferentes tipos de configuraciones de estos sistemas de excitación.

Posteriormente se trata el control automático de la tensión y de la generación de un alternador, donde se explica cómo se realiza el control automático de la tensión y el control automático de la generación.

Consecutivamente se exponen los fundamentos de la tecnología de los convertidores, donde se trata la generación de corriente continua a partir de corriente alterna, el proceso de conmutación, el convertidor de potencia controlado, los convertidores de potencia más frecuentes y sus modos de funcionamiento.

Finalmente se expone la secuencia de inicio de la excitación asegurando un comportamiento muy estable.

# Abstract

This project deals with the excitation systems for rotating machines, in particular, for three-phase synchronous generators, which must ensure the supply of quality electrical energy at the precise moment in which it is demanded, adapting to the variation in demand and complying the operating parameters of the system, the effective value of the supply voltage and its frequency, as well as its continuity.

Firstly, a tour is made through the history of the development of these systems, which have evolved over the years as power electronics technology has evolved, and the matter is discussed by talking about synchronous machines, to then focus on their excitation systems.

These excitation systems fulfill a fundamental function, consisting of feeding the winding of the alternator rotor with direct current with the appropriate characteristics, which makes possible the operation of the alternator.

All the technical elements that fulfill the function of producing this excitation current and being able to exercise control and action on it, is called an excitation system.

Apart from this fundamental task, other very important functions performed by excitation systems are described.

Before the technological development of power semiconductors, diodes and thyristors, which exists today, direct current generators were used to feed the alternator rotor. In this work the different types of existing excitation systems, their advantages and disadvantages and their fields of application are studied. These excitation systems are the direct excitation systems or with static exciter, the indirect excitation systems or with rotating exciter, among which are those of direct current and those of rotating diodes, the alternating current excitation systems, the self-excited systems and those powered by auxiliary power. In addition, different types of configurations of these excitation systems are seen.

Subsequently, the automatic control of the voltage and the generation of an alternator is discussed, where it is explained how the automatic control of the voltage and the automatic control of the generation are carried out.

Consecutively, the fundamentals of converter technology are exposed, where the generation of direct current from alternating current, the switching process, the controlled power converter, the most frequent power converters and their operating modes are discussed.

Finally, the excitation start sequence is exposed, ensuring a very stable behavior.

# Índice de contenidos

Resumen .....	3
Abstract.....	5
Índice de figuras.....	8
Índice de cuadros y tablas .....	10
1. Introducción .....	11
2. Justificación .....	12
3. Objetivos.....	13
4. Memoria .....	14
4.1. HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	14
4.2. MÁQUINAS SÍNCRONAS .....	14
4.3. SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	20
4.4. CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN .....	23
4.4.1. SISTEMAS DE EXCITACIÓN DIRECTA O CON EXCITATRIZ ESTÁTICA.....	23
4.4.2. SISTEMAS DE EXCITACIÓN INDIRECTA O CON EXCITATRIZ ROTATIVA.....	28
4.4.3. EXCITACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA .....	31
4.4.4. SISTEMA AUTOEXCITADO .....	34
4.4.5. SISTEMA DE EXCITACIÓN ALIMENTADO A TRAVÉS DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR .....	35
4.5. CONTROL AUTOMÁTICO DE LA TENSIÓN Y DE LA GENERACIÓN DE UN ALTERNADOR .....	36
4.5.1. REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA TENSIÓN (AVR) .....	36
4.5.2. CONTROL AUTOMÁTICO DE LA GENERACIÓN (AGC) .....	37
4.6. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE CONVERTIDORES .....	40
4.6.1. GENERACIÓN DE CORRIENTE CONTINUA A PARTIR DE CORRIENTE ALTERNA	40
4.6.2. EL PROCESO DE CONMUTACIÓN .....	41
4.6.3. EL CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO.....	43
4.6.4. CONVERTIDORES DE POTENCIA MÁS FRECUENTES .....	46
4.6.5. MODOS DE FUNCIONAMIENTO.....	57
4.7. SECUENCIA DE INICIO DE EXCITACIÓN .....	57
5. Conclusiones .....	59
6. Agradecimientos .....	60
7. Referencias .....	61

# Índice de figuras

Figura 4.1. Circuito equivalente del generador síncrono de rotor cilíndrico .....	17
Figura 4.2. Estator de un alternador [1] .....	18
Figura 4.3. Rotor y polo de rotor de un alternador [2] .....	18
Figura 4.4. Rotor de uno de los alternadores de la Central Hidráulica de Alcántara [1].	19
Figura 4.5. Diagrama de bloques de un sistema de control de excitación tradicional para un generador síncrono [3].....	21
Figura 4.6. Esquema de excitación moderno de la máquina síncrona [4].....	23
Figura 4.7. Sistema de excitación estática o directa [5] .....	24
Figura 4.8. Sistema de fuente de potencial y rectificador controlado [3] .....	25
Figura 4.9. Sistema de fuente compuesta y rectificador [3].....	26
Figura 4.10. Sistema de excitación compuesto controlado [3].....	27
Figura 4.11. Excitatriz de corriente continua [3].....	29
Figura 4.12. Excitatriz de diodos rotativos (1) [5] .....	30
Figura 4.13. Excitatriz de diodos rotativos (2) [6].....	31
Figura 4.14. Diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador para la excitación del sistema [3].....	32
Figura 4.15. Diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador controlado para la excitación del sistema [3].....	33
Figura 4.16. Diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador rotacional para la excitación del sistema [3].....	34
Figura 4.17. Sistema autoexcitado [5].....	35
Figura 4.18. Sistema de excitación alimentado a través de alimentación auxiliar [5].....	35
Figura 4.19. Bucle de regulación AVR sin escobillas [7].....	37
Figura 4.20. Control automático de un alternador síncrono [7] .....	39
Figura 4.21. Circuito y gráfica de la generación de corriente continua a partir de corriente alterna con conexión trifásica (fuente propia) .....	40
Figura 4.22. Proceso de conmutación (fuente propia) .....	42
Figura 4.23. Convertidor de potencia controlado (fuente propia).....	44
Figura 4.24. Cambio en la tensión directa en función del ángulo de control (fuente propia).....	45
Figura 4.25. Característica de control (fuente propia) .....	46



Figura 4.26. Convertidor de potencia trifásico completamente controlado. Circuito puente trifásico (fuente propia).....	47
Figura 4.27. Funcionamiento del circuito puente trifásico totalmente controlado (fuente propia).....	48
Figura 4.28. Convertidor de potencia semi-controlado (fuente propia) .....	50
Figura 4.29. Característica de control (fuente propia) .....	51
Figura 4.30. Convertidor de potencia monofásico totalmente controlado (fuente propia) .....	52
Figura 4.31. Convertido de potencia monofásico semi-controlado simétricamente (fuente propia) .....	54
Figura 4.32. Convertido de potencia monofásico semi-controlado asimétricamente (fuente propia) .....	56
Figura 4.33. Secuencia de inicio de la excitación (fuente propia).....	58

# Índice de cuadros y tablas

Tabla 4.1. Relación entre el número de polos y la velocidad en un alternador (fuente propia)..... 16

# 1. Introducción

La energía eléctrica no puede almacenarse de manera económica ni en cantidades elevadas, lo que hace necesario generar dicha energía eléctrica en el preciso momento en el que es demandada. Esta energía demandada deberá suministrarse a 50 Hz en España y deberá adaptarse a la variación de su demanda en diferentes días y en diferentes instantes del día.

Debido a estas y otras condiciones de funcionamiento del sistema eléctrico, los sistemas de excitación o sistemas de regulación y control de los generadores de las centrales eléctricas deben asegurar el suministro de la potencia eléctrica demandada y de los parámetros de funcionamiento del sistema, el valor eficaz de la tensión de suministro y su frecuencia, así como la continuidad del mismo.

Para poder crear el campo magnético necesario para la operación del generador, el devanado del rotor debe ser alimentado con corriente continua. Esta corriente se denomina corriente de excitación y debe poder variarse de forma rápida y con pocas pérdidas para cumplir las distintas condiciones de operación. El conjunto de todos los elementos técnicos implicados en este fin se designa sistema de excitación.

Previamente a la consecución del desarrollo adecuado de los semiconductores de potencia, diodos y tiristores, solamente se utilizaban generadores de corriente continua. Más adelante se describen los diferentes tipos de sistemas de excitación existentes, sus ventajas e inconvenientes y sus campos de aplicación.

## 2. Justificación

El principal motivo que me ha llevado a la realización de este trabajo es mi experiencia laboral en el terreno de la fabricación de grandes alternadores para centrales hidroeléctricas y el afán por aprender sobre todo lo relacionado con ello, donde los sistemas de excitación de los mismos adquieren un papel fundamental.

Es por ello por lo que he decidido basar mi Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática en uno de los sistemas de este ámbito que, además de Ingeniería Electromecánica, implementan Ingeniería Electrónica.

## 3. Objetivos

Mi principal objetivo para la realización de este Trabajo es ampliar y continuar con mi aprendizaje en este terreno y estudiar cómo se implementa la Ingeniería Electrónica en el ámbito de la generación de energía eléctrica.

Más concretamente, me he propuesto ampliar mis conocimientos en referencia a los sistemas de excitación en generadores síncronos, analizar las diferentes configuraciones de los mismos, sus ventajas e inconvenientes y realizar una comparativa entre ellos.

Asimismo, busco estudiar el funcionamiento de los sistemas de regulación de la tensión y la generación así como los diferentes tipos de convertidores de potencial que implementan los sistemas de excitación.

# 4. Memoria

## 4.1. HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

En un principio, el control de la regulación del voltaje deseado del alternador y la carga de potencia reactiva se realizaba de forma manual.

En el primer momento en el que se realizó la automatización de este sistema, el proceso era muy lento y prácticamente solo cumplía la función de alarma de operación.

A partir de los años 20, se comenzó a mejorar la rapidez de la activación de los reguladores así como la estabilidad transitoria y de pequeña señal.

Más tarde, gracias al progreso de los lazos de control realimentados, estos fueron incorporados a estos sistemas de manera masiva, y posteriormente se introdujo la electrónica de potencia, que aportó rectificadores de gran eficiencia.

Hoy en día, los sistemas de excitación actuales disponen de esquemas de control de excitación muy sofisticados que se componen de gran cantidad de lazos de control y de la electrónica de potencia más avanzada.

## 4.2. MÁQUINAS SÍNCRONAS

Las máquinas síncronas son máquinas de corriente alterna, es decir, su inducido es un devanado de corriente alterna. Por lo tanto, una máquina síncrona trifásica se compone del devanado inductor alimentado por corriente continua, el cual se localiza en el rotor, y del devanado inducido, recorrido por corriente alterna y trifásica, el cual se localiza en el estátor. Tanto el devanado inducido como el inductor han de tener el mismo número de polos.

Según el Teorema de Ferraris, cuando el devanado del inducido sea recorrido por un sistema de corrientes equilibrado, se origina un campo magnético giratorio en el entrehierro, espacio entre el estátor y el rotor, que se mueve a la velocidad de sincronismo. El rotor gira asimismo a la velocidad de sincronismo, por lo que tomando el rotor como punto de referencia, el campo magnético se

percibe estático y por lo tanto el rotor está sometido a un campo magnético constante.

Una máquina síncrona puede actuar como alternador o como motor.

Cuando lo hace como motor, el estátor está recorrido por un sistema de corrientes equilibrado, provocando la aparición de un campo magnético giratorio, que interactuando con el campo magnético inductor hace que el rotor gire a la velocidad de sincronismo, momento en el cual la máquina ejerce par motor.

Cuando la máquina síncrona funciona como un alternador, situación en la que me centraré en este trabajo, un motor externo o sistema de excitación, alimenta con corriente continua el devanado del rotor del alternador y, junto con el giro del propio rotor, se obtiene el giro del campo magnético inductor. De esta manera, el devanado inducido se somete a un campo magnético variable y se inducen fuerzas electromotrices alternas. La velocidad de giro de la máquina es la de sincronismo, de la manera en la que se muestra en la ecuación:

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (4.1)$$

Siendo  $n$  la velocidad de la máquina, que será la velocidad de sincronismo, en rpm,  $f$  la frecuencia industrial, 50 Hz en España, y  $p$  el número de pares de polos.

En la tabla 4.1 se pueden observar las velocidades de giro de un alternador dependiendo del número de polos y para una frecuencia de 50 Hz, aplicando la ecuación anterior:

Número de polos (2p)	Velocidad en rpm (n)
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
10	600
12	500
16	375
20	300
24	250
28	214
32	188
36	167
40	150
50	120

Tabla 4.1. Relación entre el número de polos y la velocidad en un alternador (fuente propia)

Se puede observar que al ir incrementando el número de polos, va disminuyendo la velocidad de la máquina.

El rotor de una máquina síncrona puede ser de polos salientes o lisos. El rotor de polos salientes dispone de expansiones polares, las cuales provocan que el entrehierro sea variable, mientras que en el rotor de polos lisos el devanado se encuentra embebido en el hierro cilíndrico.

Para conseguir energía eléctrica a la salida, el generador necesita energía mecánica a la entrada. En el caso particular de los generadores de centrales hidroeléctricas, esta energía mecánica se proporciona a través de un eje acoplado al rotor del generador y a la turbina, el cual transmite la rotación producida en la turbina hidráulica debida al paso del agua.

El acoplamiento mecánico entre el sistema de excitación y el generador más eficiente es el acoplamiento directo, en el que tanto sistema de excitación como alternador giran a la misma velocidad, sin tren de engranajes de por medio, situación en la cual se producirían más pérdidas y se incrementaría el ruido y el mantenimiento.



El circuito eléctrico equivalente monofásico de un generador síncrono es el que se muestra en la figura 4.1:

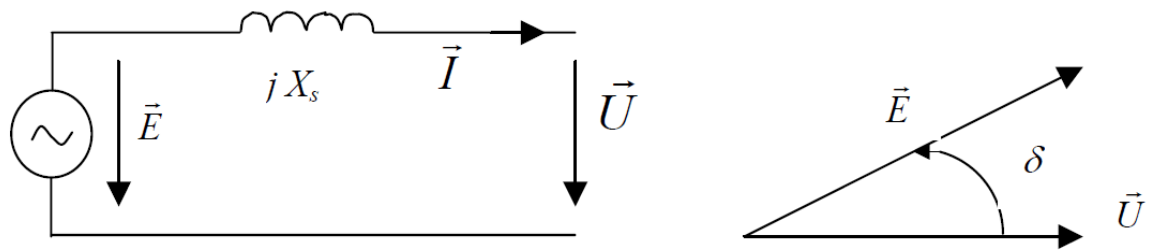


Figura 4.1. Circuito equivalente del generador síncrono de rotor cilíndrico [1]

Siendo:

$E$  la tensión del alternador en vacío

$U$  la tensión en bornes del alternador

$X_s$  la reactancia del alternador

$I$  la intensidad suministrada por el alternador

$\delta$  El ángulo entre la tensión en bornes del alternador y la tensión del alternador en vacío, tomando como en el eje de referencia al vector  $U$ .

En las centrales eléctricas se prefiere utilizar generadores síncronos o alternadores en lugar de asíncronos o de inducción, ya que, a pesar de que estos últimos son más sencillos y baratos, los síncronos permiten realizar un control total sobre la tensión y la energía reactiva que vierten a la red, mientras que los asíncronos no tienen circuito de excitación y por lo tanto necesita una red que suministre la energía necesaria para su funcionamiento.



Figura 4.2. Estator de un alternador [2]

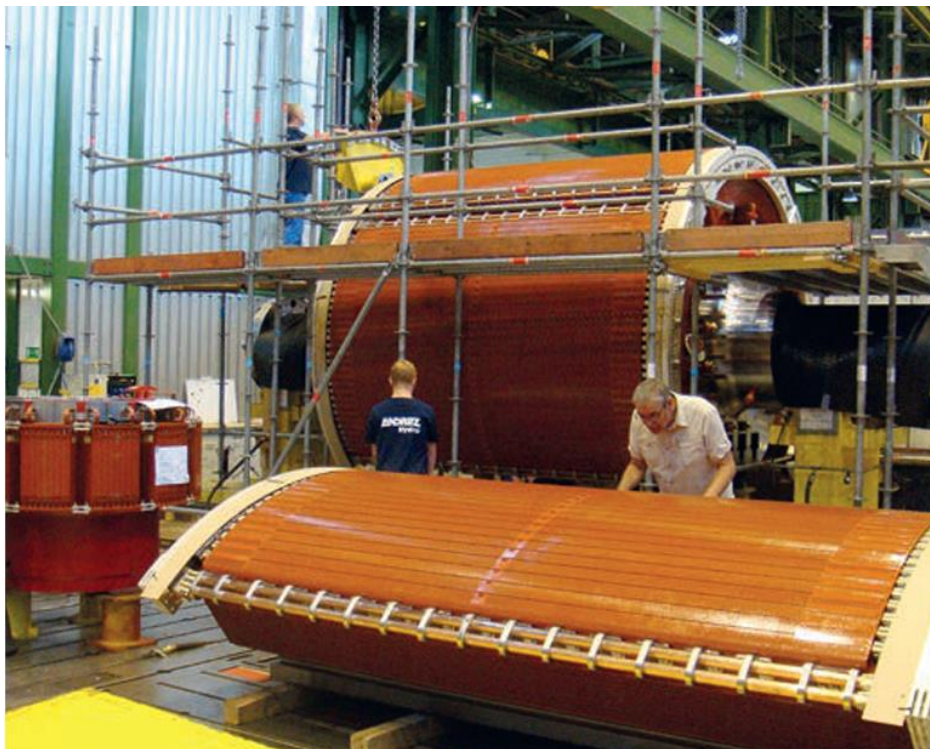


Figura 4.3. Rotor y polo de rotor de un alternador [3]



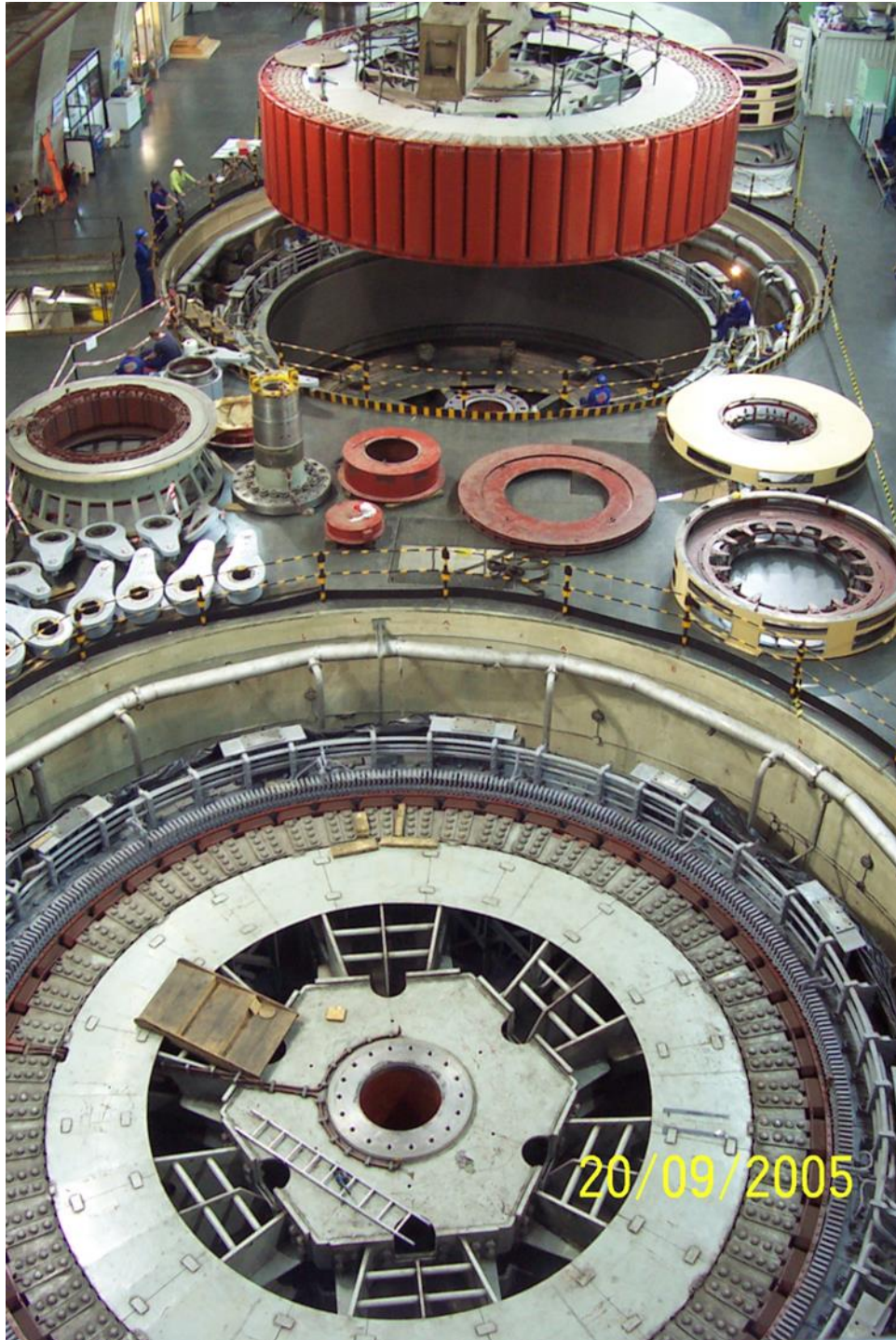


Figura 4.4. Rotor de uno de los alternadores de la Central Hidráulica de Alcántara [2]

### 4.3. SISTEMAS DE EXCITACIÓN

El sistema de excitación es la máquina que alimenta al devanado del rotor del alternador con corriente continua, de acuerdo a las características y necesidades del alternador. Esta alimentación es necesaria para el funcionamiento de la máquina y es la función principal del sistema de excitación.

Asimismo, el sistema de excitación también debe:

- regular la tensión y mantener su estabilidad en régimen permanente y en los cambios de estado.
- poseer una alta disponibilidad, ya que del sistema de excitación depende la continuidad en el funcionamiento del alternador.
- incrementar la capacidad de absorción de potencia reactiva de las máquinas de polos salientes.
- ejecución resistente ante cortocircuitos entre los anillos del rotor
- regular el factor de potencia.
- repartir la potencia reactiva de manera estable entre varios grupos existentes en la propia central eléctrica y entre diferentes centrales eléctricas.
- prevenir inestabilidades y asegurar la actuación del alternador cuando se den perturbaciones para recuperar el sincronismo de la manera más rápida posible.
- favorecer la selectividad del sistema de protección, incluso en pequeñas redes aisladas.
- proporcionar una protección ante posibles sobrevalores en ciertas magnitudes para conservar la vida útil de la máquina así como la seguridad durante el funcionamiento.

Todo ello ha de cumplirse incluso cuando las líneas entre los centros de generación y los núcleos de consumo sean muy largas, cuando se produzcan elevadas variaciones en la demanda de potencia reactiva y cuando se produzcan elevadas variaciones de la frecuencia y la tensión de la red, debidas a su vez a variaciones de carga.

Por tanto, se puede asegurar que el sistema de excitación es muy importante en el suministro constante de energía, en referencia a una transferencia segura de energía activa con las mejores condiciones de estabilidad posibles y sin oscilaciones y manteniendo en todo el sistema el sincronismo, el cual depende directamente de la corriente de excitación.

Asimismo, se instalan protecciones, relés de protección, para que el alternador se mantenga dentro de sus límites de operación, los cuales son: el límite máximo de intensidad tanto en el devanado del estátor como en el del rotor, el límite de la potencia en la turbina, el valor de la intensidad de excitación en el rotor mínima admisible y el ángulo de par inferior al límite dinámico y estático de estabilidad.

En la figura 4.5 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de excitación tradicional para un generador síncrono, los cuales tienen un rápido nivel de respuesta:

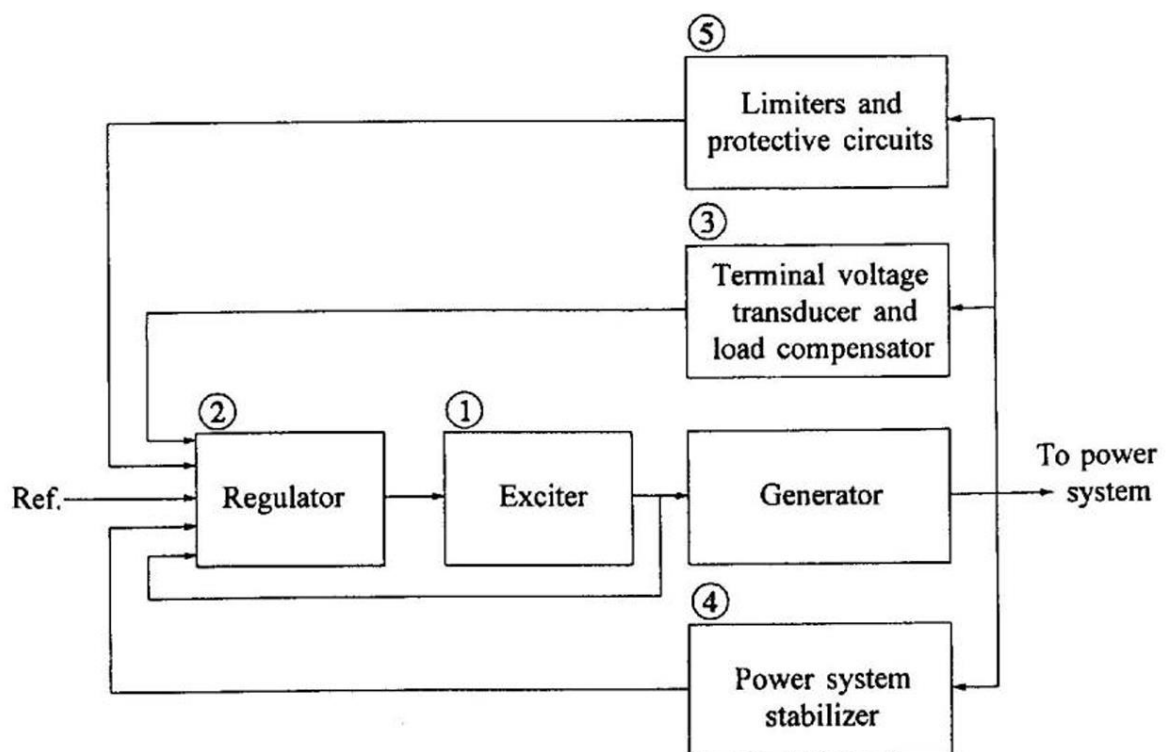


Figura 4.5. Diagrama de bloques de un sistema de control de excitación tradicional para un generador síncrono [4]

Siendo las funciones de cada bloque:

- El bloque del excitador o excitatriz alimenta al campo rotatorio del generador con energía eléctrica.
- El bloque del regulador amplifica y procesa la señal de entrada para que tenga las características adecuadas para el control.
- El bloque del terminal de voltaje transductor y compensador de carga calcula la diferencia de tensión a la salida y a la entrada midiendo la tensión en bornes del generador. Después filtra estos valores y los rectifica al valor equivalente en corriente continua.
- El bloque del estabilizador de potencia del sistema genera una señal adicional a la entrada del regulador cuya función es la amortiguación de las posibles oscilaciones.
- El bloque de los limitadores y circuitos de protección aseguran que los límites de la capacidad del generador y del excitador no se sobrepasen, corriente, tensión y frecuencia.

La función del control de la tensión es conservar el valor de la tensión del generador a través del control de la fuerza electromotriz interna del propio generador, actuando sobre la corriente de excitación.

Para ello, el regulador mide la tensión del generador y rectifica y filtra dicha señal para lograr una señal proporcional en corriente continua. Esta señal es comparada con una señal de referencia, cuya diferencia supone el error de la tensión, el cual tras su amplificación, es usado como la tensión de alimentación de la excitatriz principal y al final como tensión de excitación.

Los sistemas de excitación pueden ser tradicionales, en los cuales un generador de corriente continua o una excitatriz que comparte eje con el alternador y la turbina, producen la corriente continua que alimentará al rotor mediante escobillas y anillos rozantes.

En los sistemas de excitación más modernos se eliminan las escobillas, lo cual se puede observar en la figura 4.6:

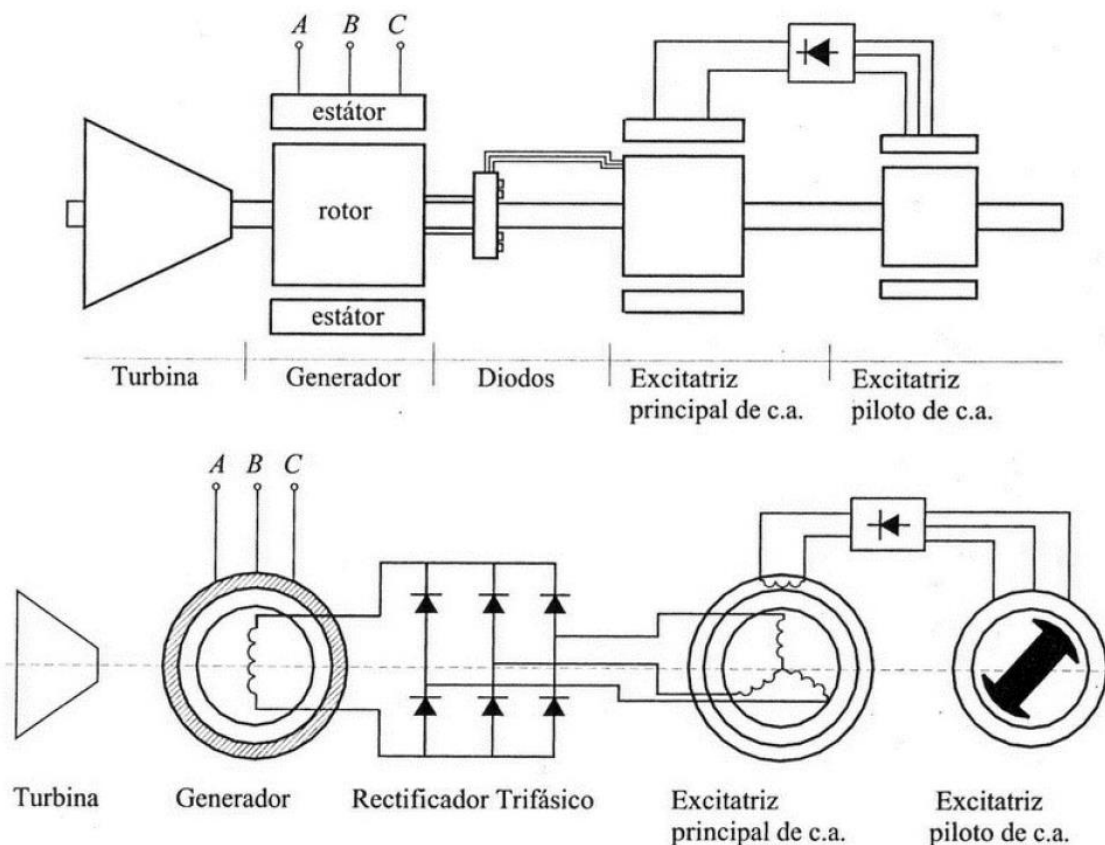


Figura 4.6. Esquema de excitación moderno de la máquina síncrona [5]

#### 4.4. CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN

A lo largo de los años, los sistemas de excitación han ido evolucionado y tomando diversas formas.

Se puede realizar diversas clasificaciones de los sistemas de excitación, dependiendo de si se alimenta directamente o no al devanado del rotor del alternador pueden ser sistemas de excitación directa o indirecta, dependiendo de cómo se alimente al equipo de excitación, pueden ser sistemas autoexcitados o con alimentación auxiliar y dependiendo de si la corriente de alimentación es alterna o continua:

##### 4.4.1. SISTEMAS DE EXCITACIÓN DIRECTA O CON EXCITATRIZ ESTÁTICA

Como su propio nombre indica, todos los dispositivos que conforman este sistema de excitación son estacionarios o estáticos: tanto la fuente de excitación

de corriente continua que alimenta el campo del generador mediante los anillos rozantes como los rectificadores. La alimentación de los rectificadores se lleva a cabo a través del generador mediante un transformador que disminuye su tensión al valor adecuado.

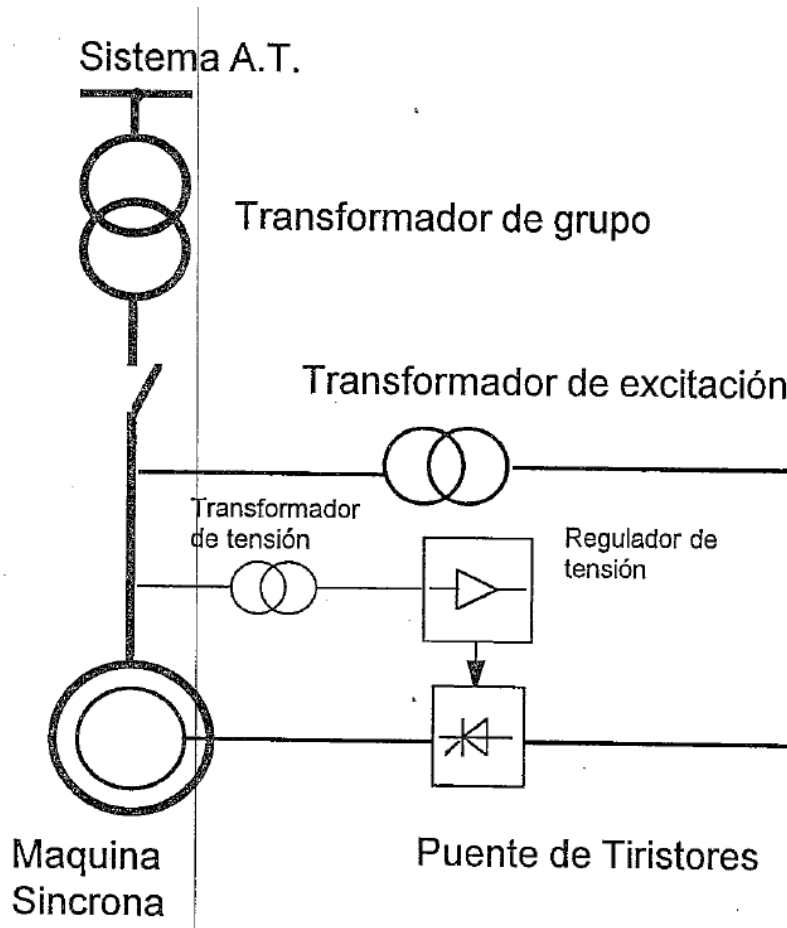


Figura 4.7. Sistema de excitación estática o directa [6]

En comparación con los sistemas de excitación indirecta o rotativa, en los sistemas de excitación estática se implementan anillos rozantes y escobillas, disminuye la longitud del grupo, permite seleccionar su ubicación de forma libre, al no haber elementos giratorios es mayor la disponibilidad del grupo, algo muy importante ya que de la excitación depende la continuidad en la operación del alternador, la velocidad de respuesta es mayor en comparación a los sistemas de excitación por diodos rotativos, se aprovecha al máximo el rotor ya que se puede realizar la medida de la corriente de excitación de forma directa, se puede



realizar la desexcitación de manera rápida y se puede utilizar un interruptor de campo para protección, además de poseer una estructura más simple.

El sistema de excitación estática se utiliza primordialmente en alternadores en los que la velocidad de la respuesta ha de ser alta, debido a las condiciones y características de la red en la cual se encuentra, además de en máquinas de polos salientes y baja velocidad, en turbogeneradores de tamaño medio y grande, como sustitución de excitatrices de corriente continua. También se suelen utilizar para turbogrupos de media potencia y gran potencia, menor de 100 MVA, y para alternadores hidráulicos de velocidades bajas, además de cuando sean adecuados dependiendo de las necesidades del sistema.

A continuación, se describen diversas configuraciones del sistema de excitación estática.

#### 4.4.1.1. SISTEMA DE FUENTE DE POTENCIAL Y RECTIFICADOR CONTROLADO

Como se puede observar en la figura 4.8, la excitatriz es alimentada mediante un transformador que toma la energía del propio generador principal, y a la salida del transformador, la señal es regulada por un rectificador controlado. Por lo tanto, la salida de la excitatriz dependerá de la entrada en corriente alterna.

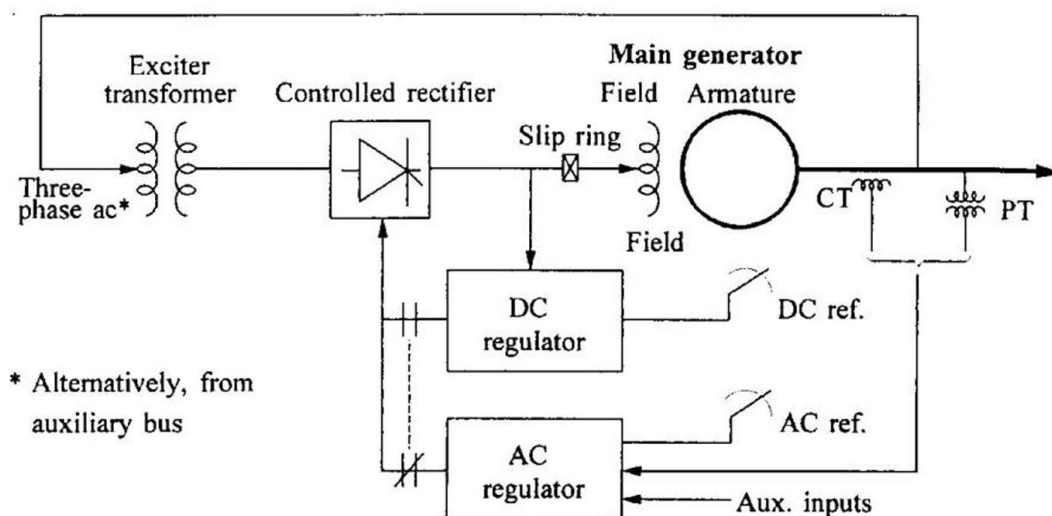


Figura 4.8. Sistema de fuente de potencial y rectificador controlado [4]

Ante situaciones de fallo, en el cual disminuye el potencial en bornes del generador, disminuye la tensión en la excitatriz y por lo tanto, disminuye la capacidad del generador para aumentar su tensión en bornes, actuando el sistema de excitación como una limitación, la cual se equilibra por su capacidad para almacenar campo electromagnético después del fallo.

Este sistema de excitación funciona bien para grandes sistemas de alternadores y son de fácil mantenimiento y económicos.

#### 4.4.1.2. SISTEMA DE FUENTE COMPUESTA Y RECTIFICADOR

La energía para el sistema de excitación se obtiene del alternador principal, a través de un transformador de corriente de núcleo saturable y de un transformador de potencia, los cuales pueden implementarse en un único transformador, como se muestra en la figura 4.9.

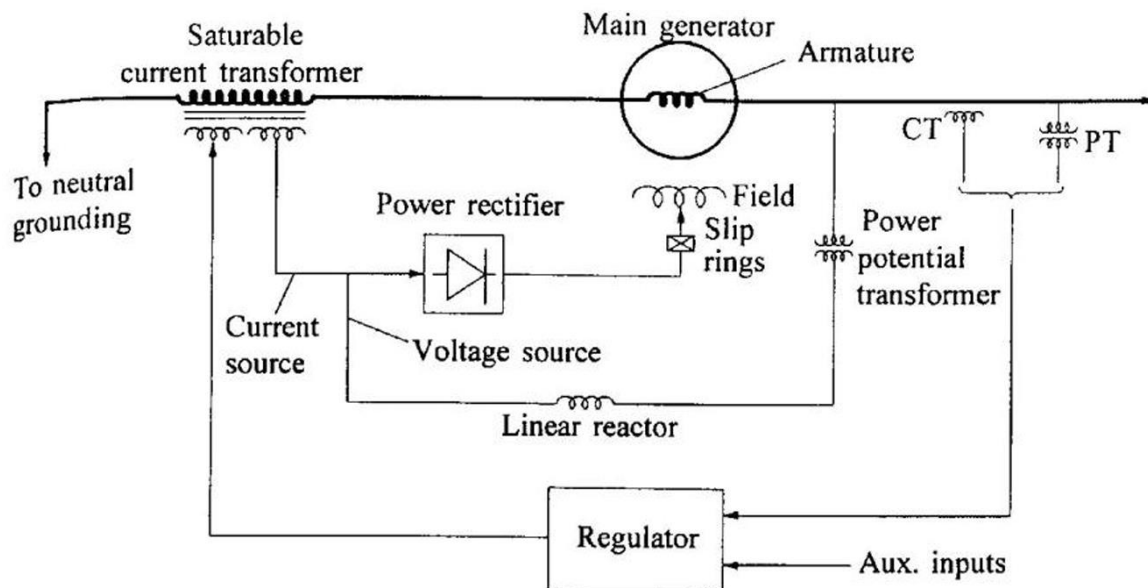


Figura 4.9. Sistema de fuente compuesta y rectificador [4]

El regulador actúa sobre la saturación del transformador de corriente y de esta manera sobre la señal de salida de la excitatriz.

Cuando el alternador se encuentra en vacío, la intensidad que circula por la armadura es nula y la excitatriz es la que recibe toda la alimentación de la

fuente. En situación de carga, una parte de la corriente de la excitatriz se deriva desde la propia corriente del alternador. En situaciones de fallo, caso en el que se produce una importante bajada del potencial en bornes del alternador, la corriente se dirige hacia la excitatriz para habilitarla.

#### 4.4.1.3. SISTEMA DE EXCITACIÓN COMPUESTO CONTROLADO

En este caso, a la salida del excitador se implementa un rectificador controlado con fuentes de intensidad y de tensión en el interior del estátor del alternador, para excitar al mismo.

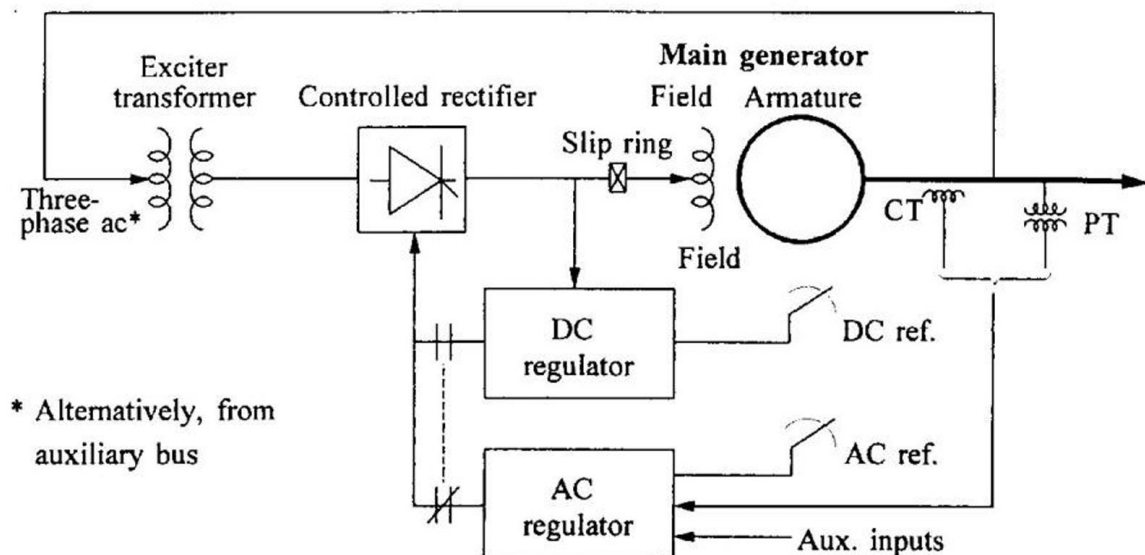


Figura 4.10. Sistema de excitación compuesto controlado [4]

En la figura 4.10 se puede observar este sistema de excitación. La fuente de intensidad se consigue a través de un transformador de intensidad que se encuentra dispuesto en el neutro del estator del alternador. La fuente de tensión está compuesta por tres fases en serie con el reactor y colocadas en ranuras del propio estator del alternador. Tanto la fuente de tensión como la de intensidad se combinan mediante un transformador, cuya salida en corriente alterna se rectifica y cuyo control consta de puente de diodos y rectificadores en paralelo. La regulación de la excitación del campo del alternador se realiza mediante un regulador de tensión mediante su control sobre un circuito de tiristores.

Ante una situación de falla, la intensidad circula por el camino “C” del transformador de la excitación que ofrece fuerza de campo cuando cae la tensión en el alternador.

La función del reactor es contribuir a compensar la característica del sistema de excitación y reducir la corriente de fallo en el sistema de excitación o en el alternador.

#### **4.4.2. SISTEMAS DE EXCITACIÓN INDIRECTA O CON EXCITATRIZ ROTATIVA**

La corriente de excitación que circula por el devanado del rotor se suministra mediante una excitatriz de corriente continua o excitatriz de diodos rotativos y esta corriente de excitación de la propia excitatriz se regula mediante el regulador de tensión.

Estos sistemas de excitación, en comparación con los sistemas de excitación directa o estática, conllevan un aumento de la longitud del conjunto turbina-alternador, lo cual deriva en mayores vibraciones y por ello la posible implementación de un cojinete a mayores, y en una obra civil de mayores dimensiones, ya que la plataforma de soporte y el edificio tienen que ser mayores. Asimismo, el mantenimiento de la máquina es más complicado ya que hay más elementos rotativos y hay una constante de tiempo adicional debido a que la regulación de la tensión se lleva a cabo en el devanado de excitación de la propia excitatriz, lo cual condiciona la respuesta del sistema.

##### **4.4.2.1. EXCITATRIZ DE CORRIENTE CONTINUA**

Utilizada en gran parte de las centrales ya existentes, sin embargo, ya no se suele utilizar en instalaciones nuevas.

En esta categoría, se utilizan generadores de corriente continua para alimentar al rotor del alternador. La excitatriz tiene dos maneras de obtener la energía: por el propio eje del alternador o mediante un motor.

Este sistema fue el más utilizado durante los años 20 a los años 60, cuando a mediados de década son relevados por los sistemas de excitación de corriente

alterna. Actualmente los sistemas de excitación de corriente continua están en vías de desaparición siendo sustituidos por los sistemas de excitación de corriente alterna y por los sistemas de excitación estática y en algunos casos, los sistemas de regulación de tensión están siendo sustituidos por aparatos electrónicos.

En figura 4.11 se muestra un sistema típico de excitación de corriente continua:

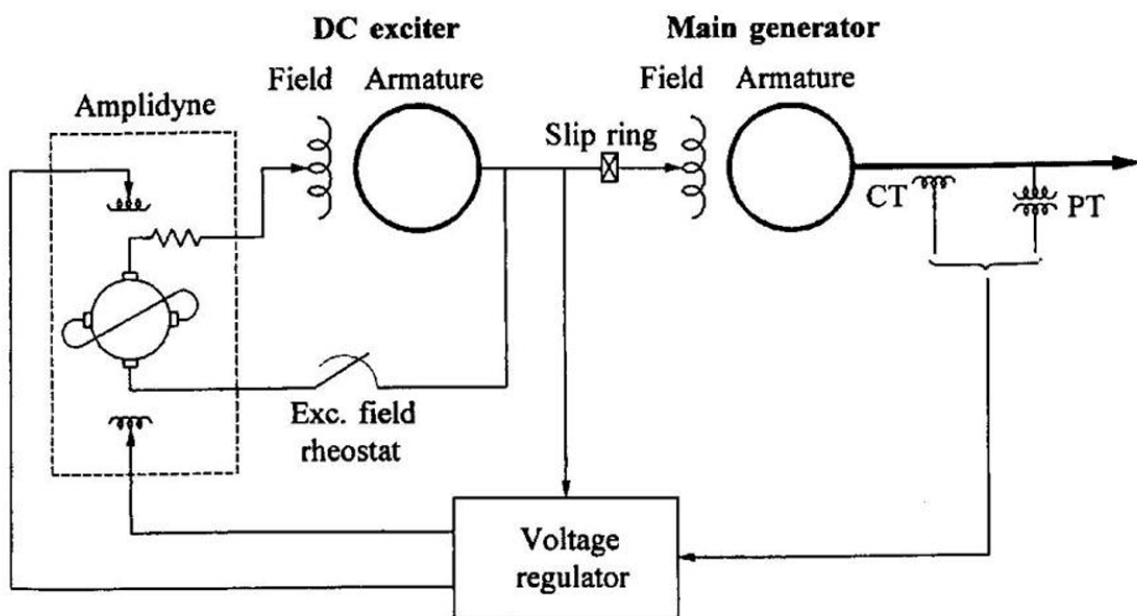


Figura 4.11. Excitatriz de corriente continua [4]

Este sistema dispone de un conmutador, que es el que proporciona cc al campo del generador. El excitador se controla con un amplidyne, que es una máquina de corriente continua que consta de varias escobillas las cuales están separadas 90 grados eléctricos. La carga de compensación de giro genera un flujo opuesto y de igual magnitud al de la intensidad de armadura.

#### 4.4.2.2. EXCITATRIZ DE DIODOS ROTATIVOS

En el caso particular de la excitatriz de diodos rotativos, este supone una gran ventaja ya que elimina la presencia de anillos rozantes y escobillas, lo cual es una característica importante para centrales industriales, y asimismo, se

reducen los costes en los grupos sin características especiales que tengan una potencia menor a 50 MVA.

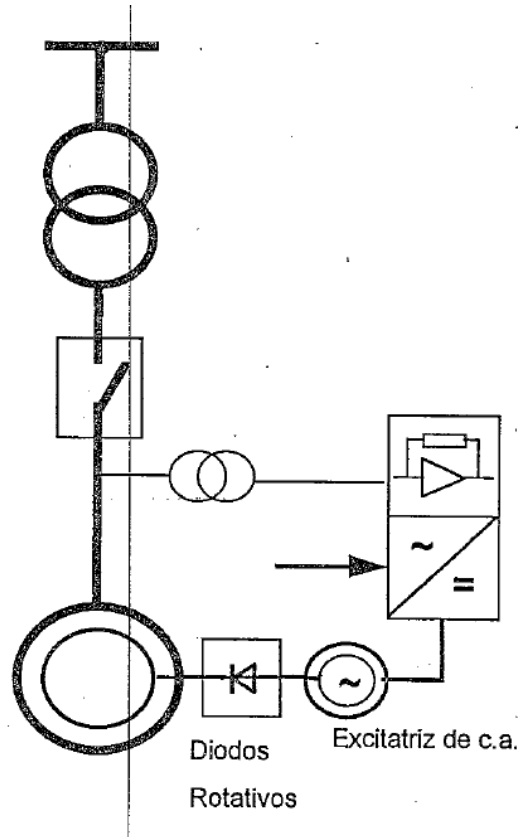


Figura 4.12. Excitatriz de diodos rotativos (1) [6]

Sin embargo, otras características son la imposibilidad de realizar la medida de forma directa de la intensidad del devanado del rotor, lo cual impide el aprovechamiento total del mismo, la imposibilidad de implementar un interruptor de campo como protección y la imposibilidad de desexcitación rápida a no ser que se usen tiristores rotativos y que se lleve a cabo una coordinación perfecta entre la electrónica de encendido y de regulación de los mismos.

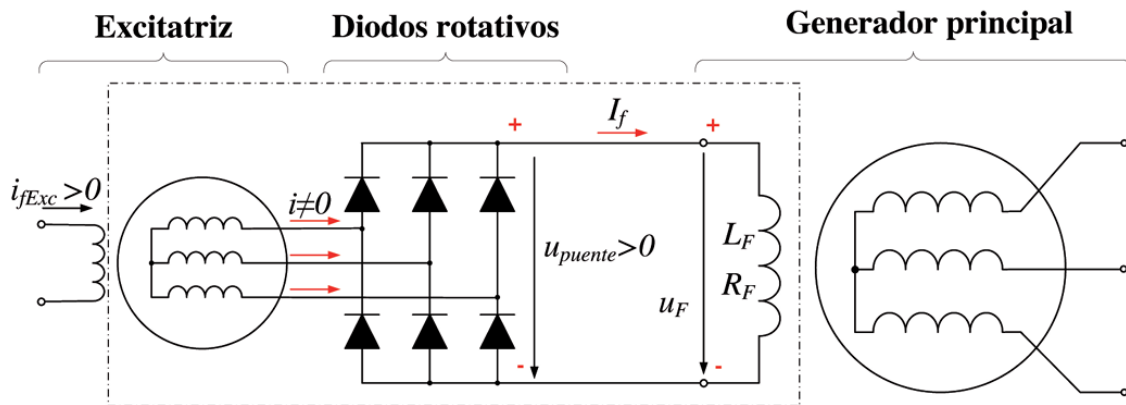


Figura 4.13. Excitatriz de diodos rotativos (2) [7]

Este sistema se impone en los casos en los que las exigencias en regulación son elevadas y cuando se trata de atmosferas contaminadas o con gases explosivos, ya que elimina totalmente el riesgo de que aparezcan chispas y además, su mantenimiento es casi nulo. Se utilizan en centrales industriales, es decir, en condiciones locales que requieran sistemas sin escobillas, en generadores conectados a la red sin exigencias especiales, en grupos generadores de alta velocidad,  $n = 1500$  rpm, prácticamente para todos los grupos de turbina de vapor y gas de aproximadamente 50 a 100 MVA.

Este sistema ha sustituido en gran parte a las excitatrices de corriente continua.

#### 4.4.3. EXCITACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA

Normalmente, el generador y la excitatriz comparten el eje de la propia turbina. En esta categoría, se utiliza un alternador para alimentar a la excitación. A la salida de la excitatriz, al principio, se disponían como reguladores un conjunto de amplificadores rotacionales y magnéticos, hoy en día se disponen unos rectificadores que convierten la corriente alterna de salida en corriente continua, que es la que genera el campo. Estos rectificadores pueden ser o no controlados y pueden ser rotacionales o estacionarios.

#### 4.4.3.1. RECTIFICADORES ESTACIONARIOS

En este caso, la excitatriz aporta la corriente continua que general el campo principal mediante los anillos rozantes, la rectificación ocurre externamente al generador.

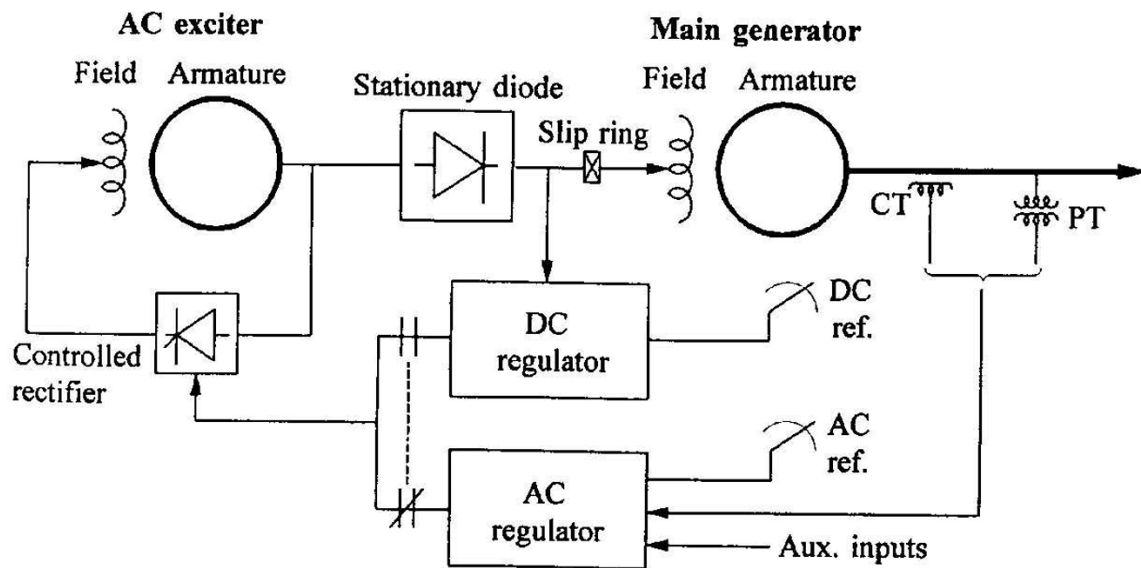


Figura 4.14. Diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador para la excitación del sistema [4]

El excitador de la figura 4.14 funciona como excitador autoexcitado, es decir, la energía la toma de los bornes del mismo excitador, obteniendo el campo mediante el rectificador con tiristores. Por lo tanto, el rectificador es el que toma el control del alternador del excitador, pudiendo modificar la tensión del alternador excitador y por lo tanto el valor de la tensión en corriente continua que alimenta el campo del alternador principal. Con rectificadores controlados, se puede controlar de manera directa la tensión de salida de corriente continua del excitador, lo cual se muestra en la figura 4.15. La función de los diodos es únicamente rectificar la señal, sin disponer de control.



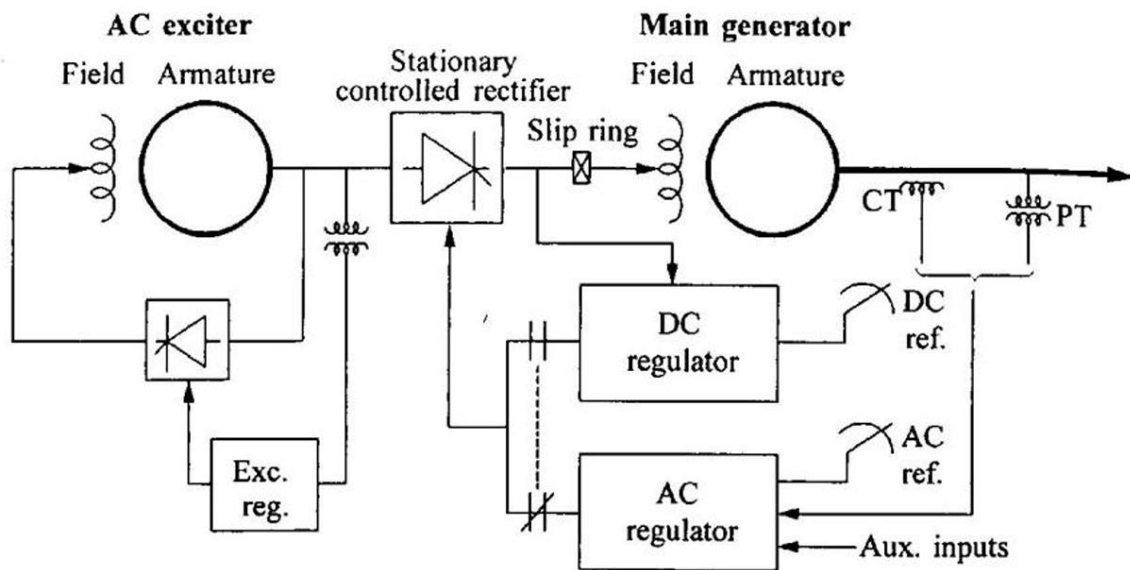


Figura 4.15. Diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador controlado para la excitación del sistema [4]

En el caso de regulador controlado, el alternador del excitador se autoexcita y para mantener la tensión de salida utiliza un regulador estático de tensión independiente. El regulador de tensión es el que controla el encendido de los tiristores, y ya que estos se controlan de forma directa a la salida del excitador, se obtiene una respuesta rápida en este sistema.

Por lo tanto, existen dos maneras de regular: uno en corriente alterna el cual conserva el nivel de tensión del estátor a la tensión de referencia y la regula de manera automática y otro regulador en corriente continua el cual conserva la tensión del campo del generador según la referencia.

#### 4.4.3.2. RECTIFICADORES ROTACIONALES

En este modelo de rectificadores, se suprimen las escobillas y los anillos rozantes y es la propia salida de corriente continua la que alimenta de forma directa al campo del generador. En este caso, junto con el campo del generador también rota tanto la armadura del excitador de corriente alterna como el rectificador de diodos. Junto con el campo del generador rotan igualmente la armadura del excitador de corriente alterna y el rectificador de diodos. Asimismo, junto con el rectificador de diodos y la armadura rota el excitador piloto de

corriente alterna. El regulador de tensión es el que realiza el control del campo del excitador de corriente alterna, el cual a su vez, controla el giro del campo del generador.

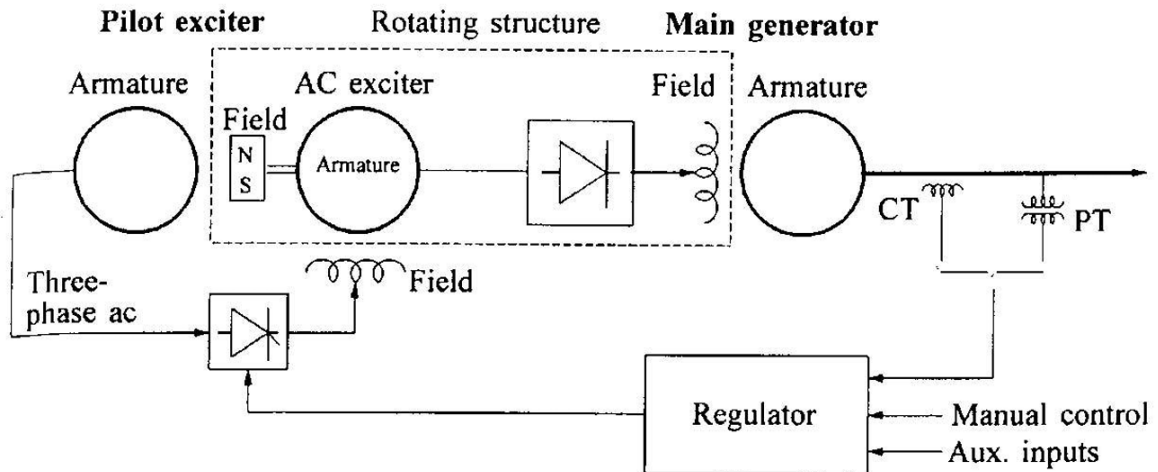


Figura 4.16. Diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador rotacional para la excitación del sistema [4]

Con este sistema se evitan los problemas derivados del uso de las escobillas, aunque como contrapartida, no se puede medir la corriente de campo o la tensión del generador directamente.

#### 4.4.4. SISTEMA AUTOEXCITADO

Este sistema se alimenta a través de los bornes del alternador, por lo que depende de la tensión que haya en bornes del alternador, a pesar de ello este sistema se utiliza mucho.

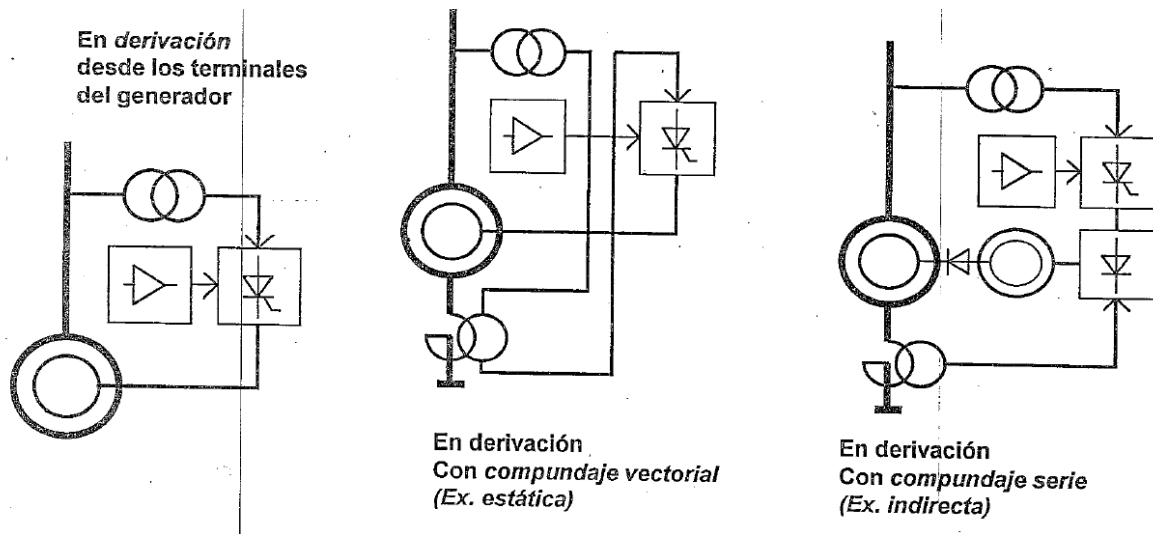


Figura 4.17. Sistema autoexcitado [6]

#### 4.4.5. SISTEMA DE EXCITACIÓN ALIMENTADO A TRAVÉS DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR

Esta alimentación puede ser con una excitatriz o mediante servicios auxiliares de la central eléctrica. La principal ventaja de este sistema de alimentación es la posibilidad de proporcionar corriente de excitación independientemente de la red.

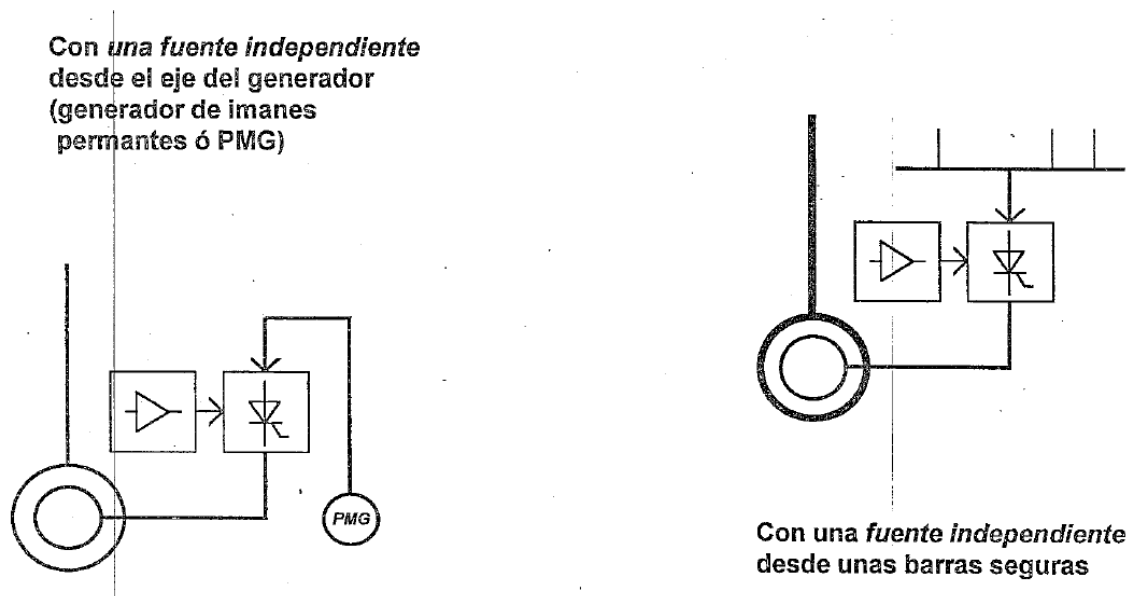


Figura 4.18. Sistema de excitación alimentado a través de alimentación auxiliar [6]

## 4.5. CONTROL AUTOMÁTICO DE LA TENSIÓN Y DE LA GENERACIÓN DE UN ALTERNADOR

Ambos sistemas de regulación, el de la tensión y el de la generación, pueden considerarse como desacoplados, por lo que se tratan de forma separada.

### 4.5.1. REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA TENSIÓN (AVR)

La regulación de la tensión tiene como fundamento mantener en los niveles aceptables el valor de la tensión en bornes del alternador, de acuerdo a unos valores de referencia y dentro de tolerancias, a pesar de que la carga que esté conectada al alternador sea variable dependiendo de las condiciones de demanda de electricidad respecto al tiempo. Esto permite el control de la tensión en los diferentes nudos que componen el sistema eléctrico, conservando el valor de la tensión constante.

A través del control de su fuerza electromotriz interna se controla la tensión en bornes del alternador, y para llevar a cabo este control se ha de actuar sobre la corriente de excitación del alternador.

El elemento fundamental de la regulación automática de la tensión es la excitatriz, la cual suministra la corriente continua que genera el campo magnético del alternador.

El AVR mide el valor del voltaje en bornes del alternador, posteriormente se rectifica y se filtra para conseguir una señal en corriente continua proporcional a la señal inicial en su valor eficaz. La señal de tensión obtenida de continua es comparada con una señal de referencia, originándose el error en tensión mediante la diferencia de ambas señales, y tras ser amplificada es utilizada como fuente de alimentación de la excitatriz principal del alternador, convirtiéndose al final en el voltaje de excitación del alternador.

Todo este proceso de regulación automática de la tensión es de respuesta bastante rápida, del orden de segundos, siendo esta mucho más rápida que el control automático de la generación.

En la figura 4.19 se puede observar un esquema típico de regulación automática de la tensión con excitatriz moderna que se compone de un alternador síncrono coligado a un rectificador trifásico giratorio.

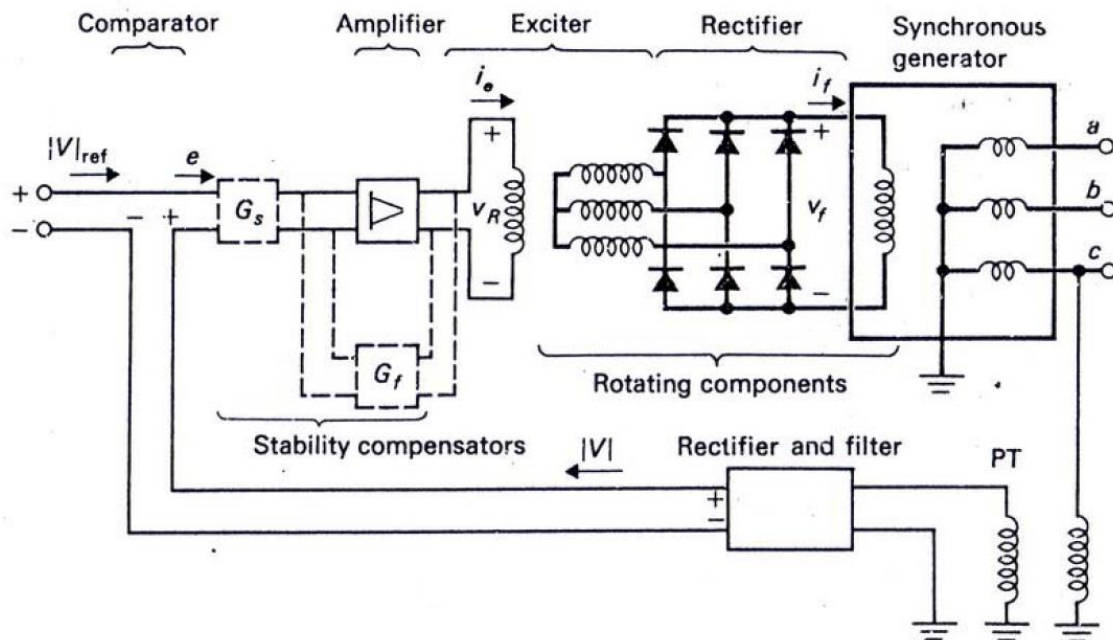


Figura 4.19. Bucle de regulación AVR sin escobillas [8]

El alternador gira de manera solidaria al propio eje de la turbina. En el estator se dispone el devanado que se alimenta en corriente continua y en el rotor se disponen tres devanados que son independientes y dan lugar a un sistema de tensiones trifásico que se rectifica a través de un puente de diodos, y esta corriente continua de salida del puente de diodos es la que alimenta a la excitatriz del alternador síncrono, que se localiza en el rotor. De esta manera se prescinde del uso de anillos rozantes y escobillas.

#### 4.5.2. CONTROL AUTOMÁTICO DE LA GENERACIÓN (AGC)

El control automático de la generación o AGC, debe controlar y mantener los valores establecidos del intercambio de potencia con otras zonas del sistema eléctrico, según el despacho económico, la potencia activa debe concordar con

los valores del mismo y debe controlar que la frecuencia se mantenga en su valor de 50 Hz.

Por lo tanto, se puede ver que el sistema de control automático de generación es más complicado que el sistema de regulación automática de tensión, y estará formado por tres lazos de control, de los cuales dos se localizan en el propio alternador, igual que el AVG, y el otro concierne al control del área, lo cual es normalmente una compañía eléctrica, aunque también puede ser un grupo de varias centrales.

La energía eléctrica que se genera debe coincidir con la energía eléctrica que se demanda sumándole las pérdidas. Si esto no se cumple, el balance de potencia se desequilibra, aumenta o disminuye, que depende de la energía cinética del alternador, lo cual se traduce en la desviación de la velocidad del alternador y por tanto de la frecuencia.

Es decir, ante un aumento en la potencia de generación por encima de sus valores convenientes, aumentará asimismo la frecuencia. Se deduce la relación entre la frecuencia del sistema y los flujos de potencia activa entre los alternadores y las cargas.

En la figura 4.20 se aprecia un esquema del regulador automático de tensión o AVG y de dos de los lazos del control automático de la generación o AGC para un alternador síncrono.

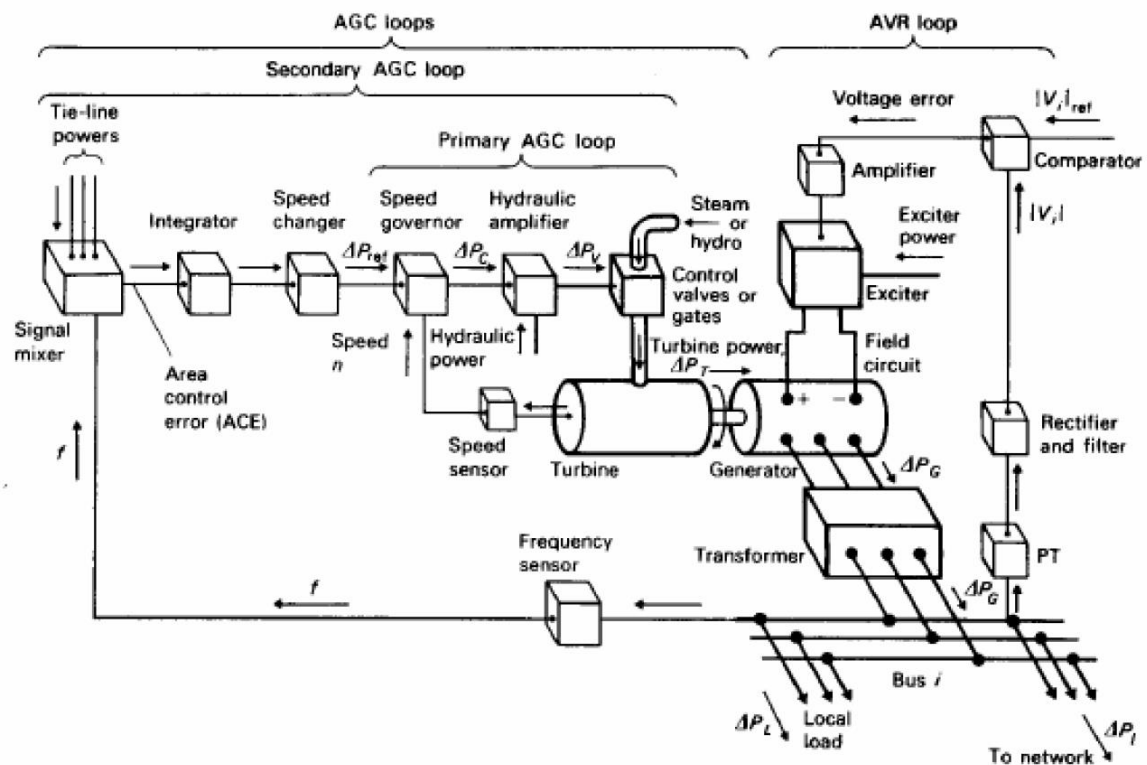


Figura 4.20. Control automático de un alternador síncrono [8]

Como se puede observar en la figura 4.20 y analizándola desde el régimen permanente, el lazo de control primario del AGC trabaja sobre la turbina con el objetivo de mantener la potencia activa que se genera al nivel de la potencia activa que se demanda, lo cual se relaciona con la velocidad del alternador, la frecuencia.

El lazo de control secundario del AGC debe mantener el intercambio de potencia establecido con otras áreas, para asegurar que cada área se ocupa de sus propias diferencias de carga, lo cual se realiza a través del error de control de área o ACE, y mediante este lazo también se debe conservar el valor de la frecuencia nominal. Este lazo tiene una respuesta del orden de pocos minutos.

La consigna de potencia que cada uno de los generadores debe generar es enviada desde el centro de control del área correspondiente, y se realiza mediante el tercer lazo de control y su respuesta es de aproximadamente 10 minutos.

## 4.6. FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE CONVERTIDORES

### 4.6.1. GENERACIÓN DE CORRIENTE CONTINUA A PARTIR DE CORRIENTE ALTERNA

Utilizando diodos, los cuales son componentes no controlados, solamente el elemento que está a mayor tensión con respecto al punto S de la estrella es el que permite el paso de la corriente. En la figura 4.21 se pueden ver las tensiones de fase y se puede observar que la corriente  $I_d$  se mantiene constante con una alta conductancia,  $L$ , en el circuito de carga.

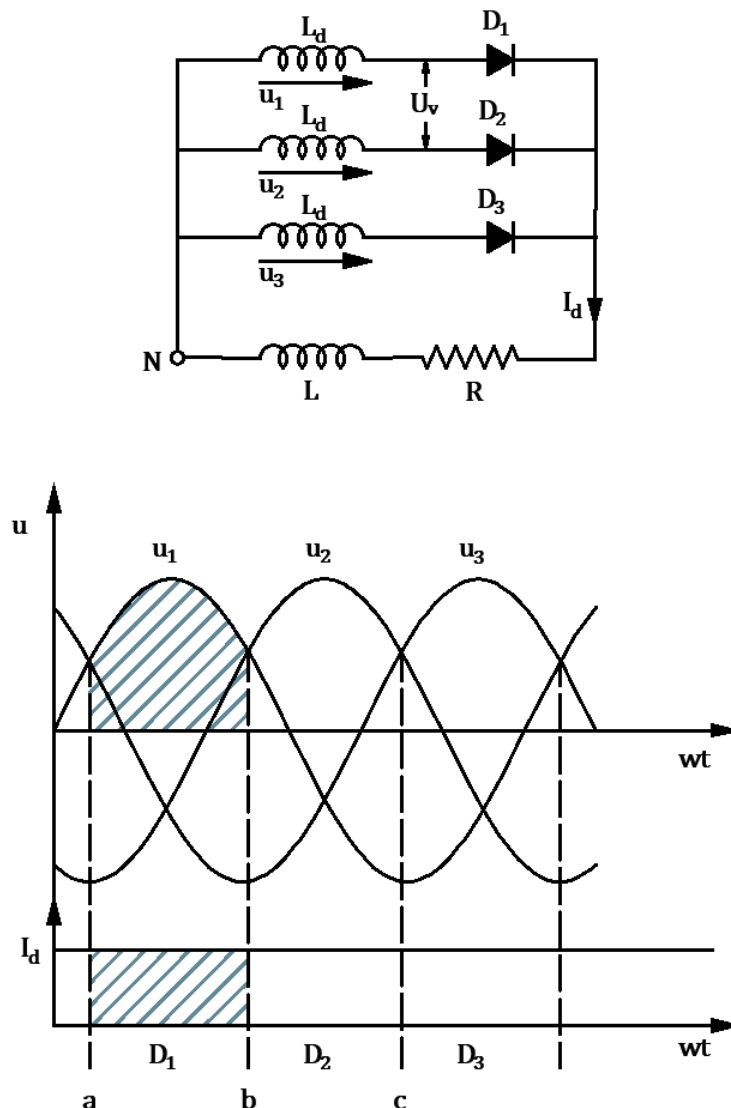


Figura 4.21. Circuito y gráfica de la generación de corriente continua a partir de corriente alterna con conexión trifásica (fuente propia)



La tensión  $U_1$  aplicada al diodo 1 desde el instante de tiempo “a” hasta el instante de tiempo “b” contribuye a la tensión aplicada al circuito de carga en lo que concierne la superficie sombreada en la figura, tensión continua. En el momento en el que la tensión  $U_2$  se hace mayor que la tensión  $U_1$ , comienza a conducir el diodo 2 y la tensión  $U_2$  aplicada al circuito de carga entre los instantes “b” y “c” es la superficie que representa la tensión análoga a la mencionada anteriormente. Así sucesivamente.

Por lo tanto, en cada periodo de la onda de tensión continua se dan tres máximos de tensión. En estos sistemas, la tensión continua se considera como un valor medio, el cual es la altura de un rectángulo con área la rayada.

Dicho valor medio  $U_{di}$  difiere para cada uno de los distintos convertidores y en la práctica se refiere a la tensión entre fases de la fuente de alimentación en corriente alterna.

En la ecuación se muestra la relación entre las tensiones para una configuración referencia común:

$$U_{di} = 0,675 U_V \quad (4.2)$$

#### 4.6.2. EL PROCESO DE CONMUTACIÓN

En el instante de tiempo “b” el diodo 1 detiene la conducción de corriente y comienza el diodo 2. Como la energía magnética almacenada en la autoinducción de dispersión no puede cambiar bruscamente, la corriente no puede variar ni ser transferida de manera instantánea, por lo tanto, durante un breve periodo de tiempo, los dos diodos se encuentran conduciendo corriente, hecho que supone que la fuente alimentación se encuentre prácticamente cortocircuitada.

La diferencia de potencial entre la tensión del diodo 2,  $U_2$ , y la tensión del diodo 1,  $U_1$ , provoca que se incremente el paso de corriente a través del diodo 2 y que disminuya la corriente que pasa a través del diodo 1, hasta que toda la corriente acaba pasando por el diodo 2 y se extingue totalmente la que circula por el diodo 1. En el caso de los diodos, la circulación inversa de corriente no es posible.

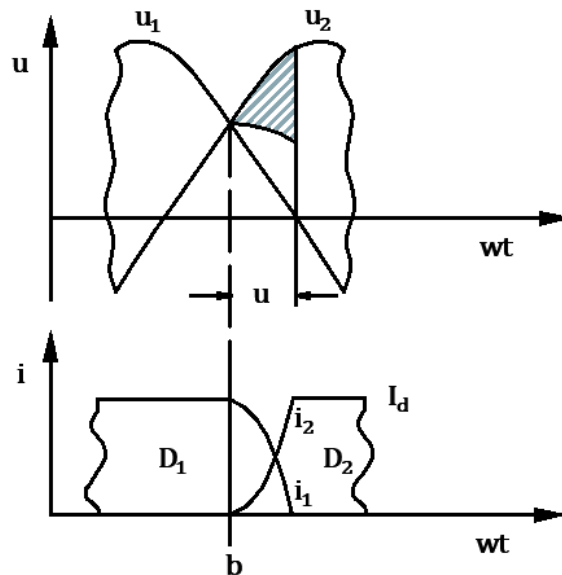
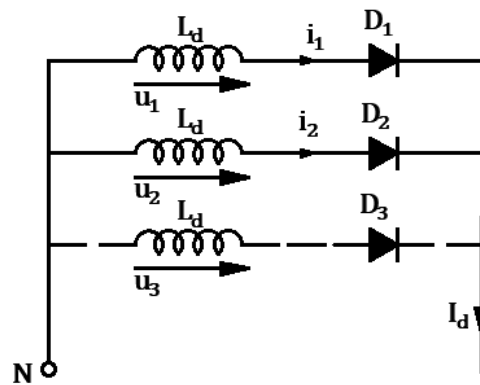


Figura 4.22. Proceso de conmutación (fuente propia)

La corriente continua se mantiene constante durante el periodo de conmutación cuando  $L \rightarrow \infty$

El tiempo de conmutación depende de varias magnitudes: el valor de la corriente continua que se conmuta, la diferencia de potencial entre las fases a conmutar y el valor de las inductancias de dispersión, las cuales limitan la corriente de cortocircuito que se produce en el circuito de conmutación.

$$U = \frac{I_d L_d}{U_k} \quad (4.3)$$

Siendo:

$U$  el tiempo de conmutación,  $I_d$  la magnitud de la corriente continua a conmutar,  $U_k$  la tensión de conmutación y  $L_d$  el valor de las inductancias de dispersión.

Durante el tiempo de conmutación, debido a que las tensiones en el diodo 2 y en el diodo 1 están relacionadas a través de los diodos, la tensión continua no llega al nivel de la tensión  $U_2$ , sino que se mantiene en la mitad de la tensión por fase. La tensión continua que resulta presenta una reducción denominada “Caída Inductiva de Tensión Continua”.

Por lo tanto, el proceso de conmutación implica que dos diodos conducen a la vez durante el tiempo de conmutación, que la fuente de alimentación se cortocircuita durante el tiempo de conmutación y que se produce una caída inductiva de tensión.

#### 4.6.3. EL CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO

En este caso, en lugar de usar diodos se utilizan tiristores, los cuales son dispositivos que pueden ser controlados.

En un inicio, el tiristor se encuentra bloqueado impidiendo el paso de corriente en ninguno de los dos sentidos.

En un primer momento, un tiristor se encuentra en conducción de corriente hasta que el siguiente tiristor recibe una señal de control para que comience a conducir en sentido directo. Este impulso de control puede desplazarse a un momento de tiempo conveniente, que no tiene por qué ser en los instantes de tiempo “a”, “b” o “c”. Para que se origine la transferencia de corriente, es necesario que la tensión de fase del tiristor a conducir sea mayor que la tensión de fase del tiristor que se encuentra todavía en conducción.

El rango de tiempo para realizar el control según las tensiones de fase se muestra en la figura 4.23:

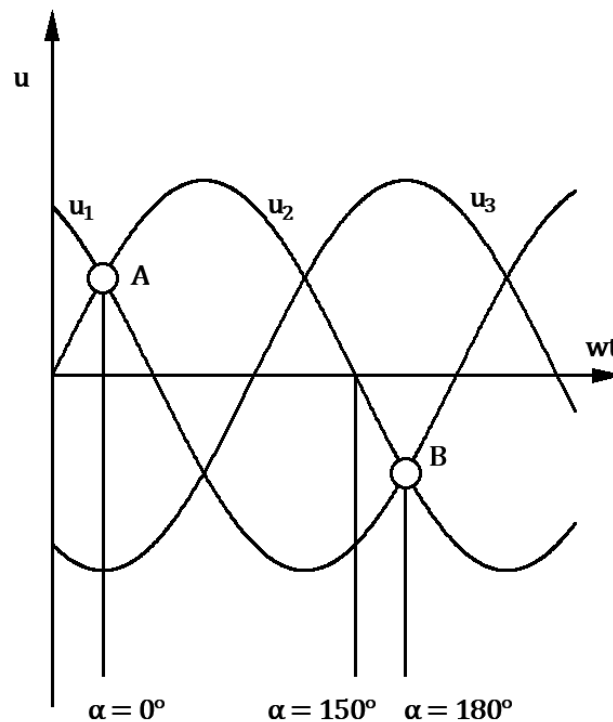


Figura 4.23. Convertidor de potencia controlado (fuente propia)

El ángulo de control o encendido se toma a partir del instante en el que el diodo transferiría su corriente, punto natural de conmutación.

Por encima de un grado de control  $\alpha=180^\circ$ , a partir del cual la tensión  $U_2$  se hace inferior a la tensión  $U_1$ , no es posible realizar la conmutación.

En el ángulo  $\alpha=180^\circ$  debe estar garantizado que el tiristor 1 ha dejado de conducir por completo y que está bloqueado en el sentido directo de la corriente. Por lo tanto, el ángulo de control debe ser menor a los  $180^\circ$  para que sea posible realizar la conmutación completa antes de llegar al punto B, así, el intervalo de control es de aproximadamente  $150^\circ$  eléctricos.

El valor medio de la tensión de salida depende del ángulo de control. A medida que se va incrementando el valor del ángulo de control, va aumentando el valor medio de la tensión, el cual llega a su máximo negativo para  $\alpha=150^\circ$  y se hace cero para  $\alpha=90^\circ$  eléctricos, como se puede observar en la figura 4.24:

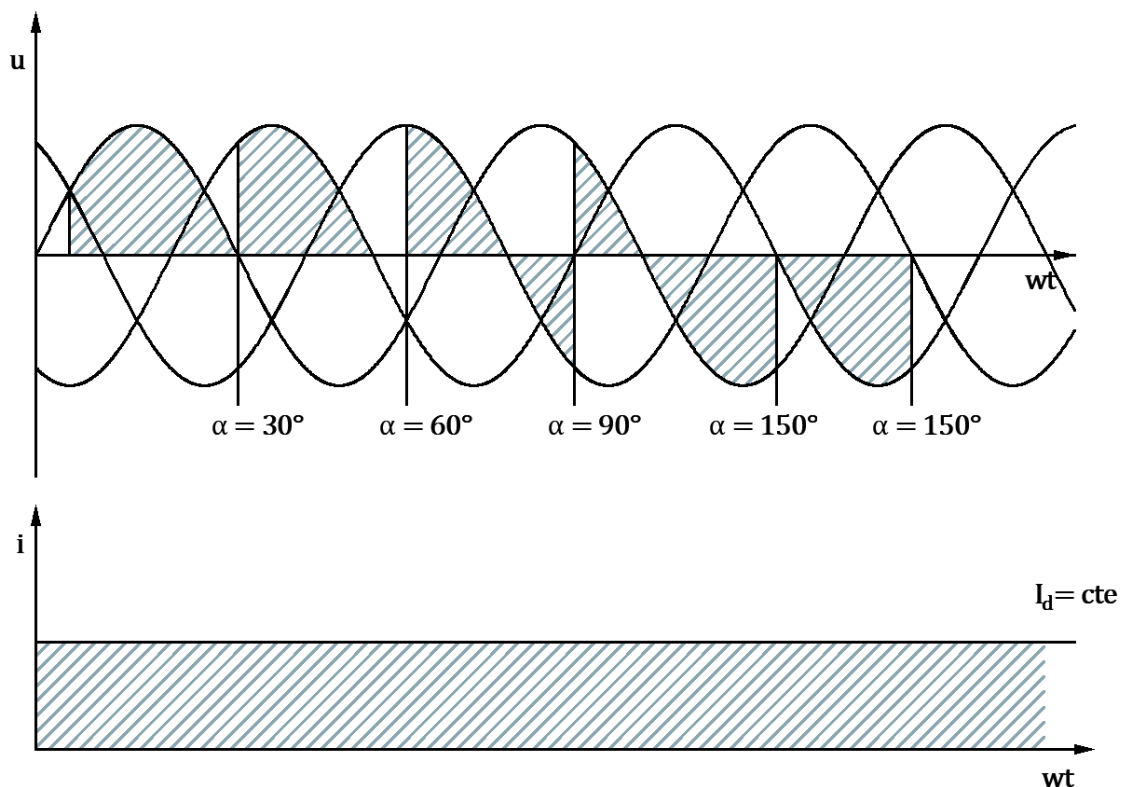


Figura 4.24. Cambio en la tensión directa en función del ángulo de control (fuente propia)

La corriente  $I_d$  ha de circular de manera continua para que se pueda realizar de forma correcta la operación del convertidor, lo cual no sería posible con una circulación discontinua de la corriente.

Las superficies rayadas de la imagen que representan la tensión, son iguales para un ángulo  $\alpha=90^\circ$ , mientras que para un ángulo  $\alpha>90^\circ$ , la superficie negativa de la tensión es mayor que la superficie positiva, por lo que a la salida, la tensión será negativa, lo cual se denomina “servicio ondulator”. Como en este momento la tensión de salida es negativa, ha cambiado su polaridad y se mantiene constante el sentido de la circulación de la corriente, la energía fluye en sentido contrario y por lo tanto el convertidor de potencia transfiere energía a la fuente de alimentación.

En función del ángulo de control o encendido varía la tensión continua de la manera en la que se muestra en la ecuación:

$$U_{di\alpha} = U_{dio} \cos \alpha \quad (4.4)$$

Para  $L \rightarrow \infty$

La “característica de control”, figura 4.25, no puede ser plenamente aprovechada ya que los tiristores necesitan tiempo para poder bloquear, tiempo de conmutación. El intervalo teórico de control corresponde a  $\alpha=180^\circ$  pero en la práctica el impulso de control no debe producirse para un  $\alpha > 150^\circ$ . El ángulo de control  $\alpha=150^\circ$  es denominado “ángulo límite de servicio ondulator”.

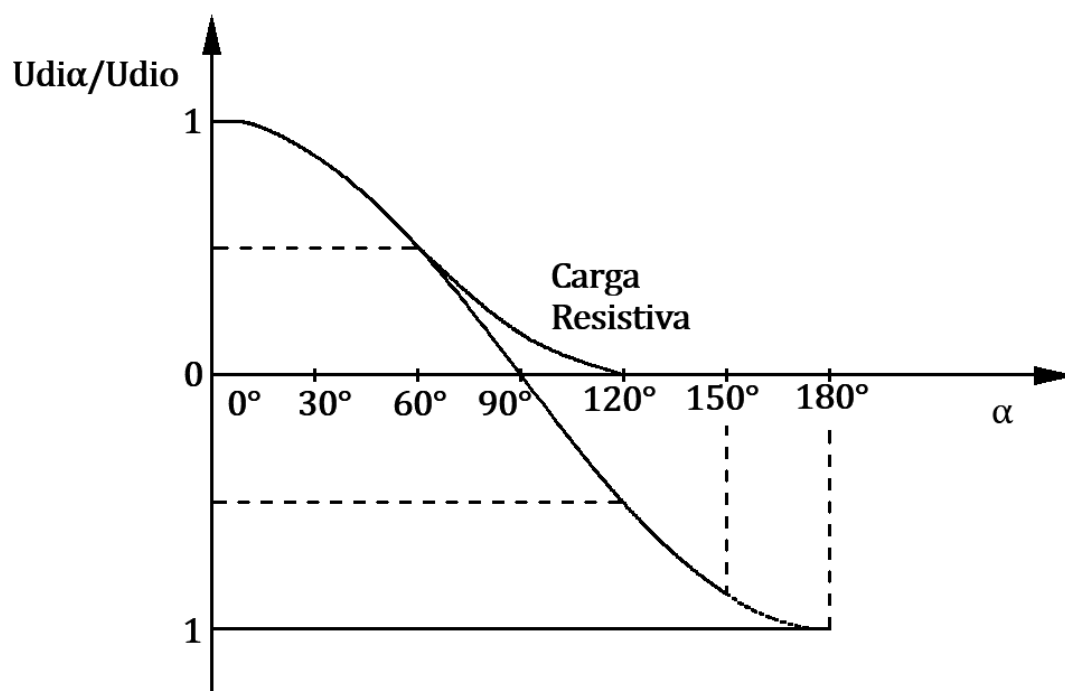


Figura 4.25. Característica de control (fuente propia)

#### 4.6.4. CONVERTIDORES DE POTENCIA MÁS FRECUENTES

##### 4.6.4.1. CONVERTIDOR DE POTENCIA TRIFÁSICO COMPLETAMENTE CONTROLADO

El convertidor de Potencia Trifásico Completamente Controlado se compone de dos configuraciones trifásicas de referencia común conectadas en serie. Una de las configuraciones trifásicas se encuentra encendida y rectifica las

tensiones positivas, mientras que la otra establece una tensión continua a partir de las tensiones negativas. Esto se muestra en las figuras 4.26 y 4.27.

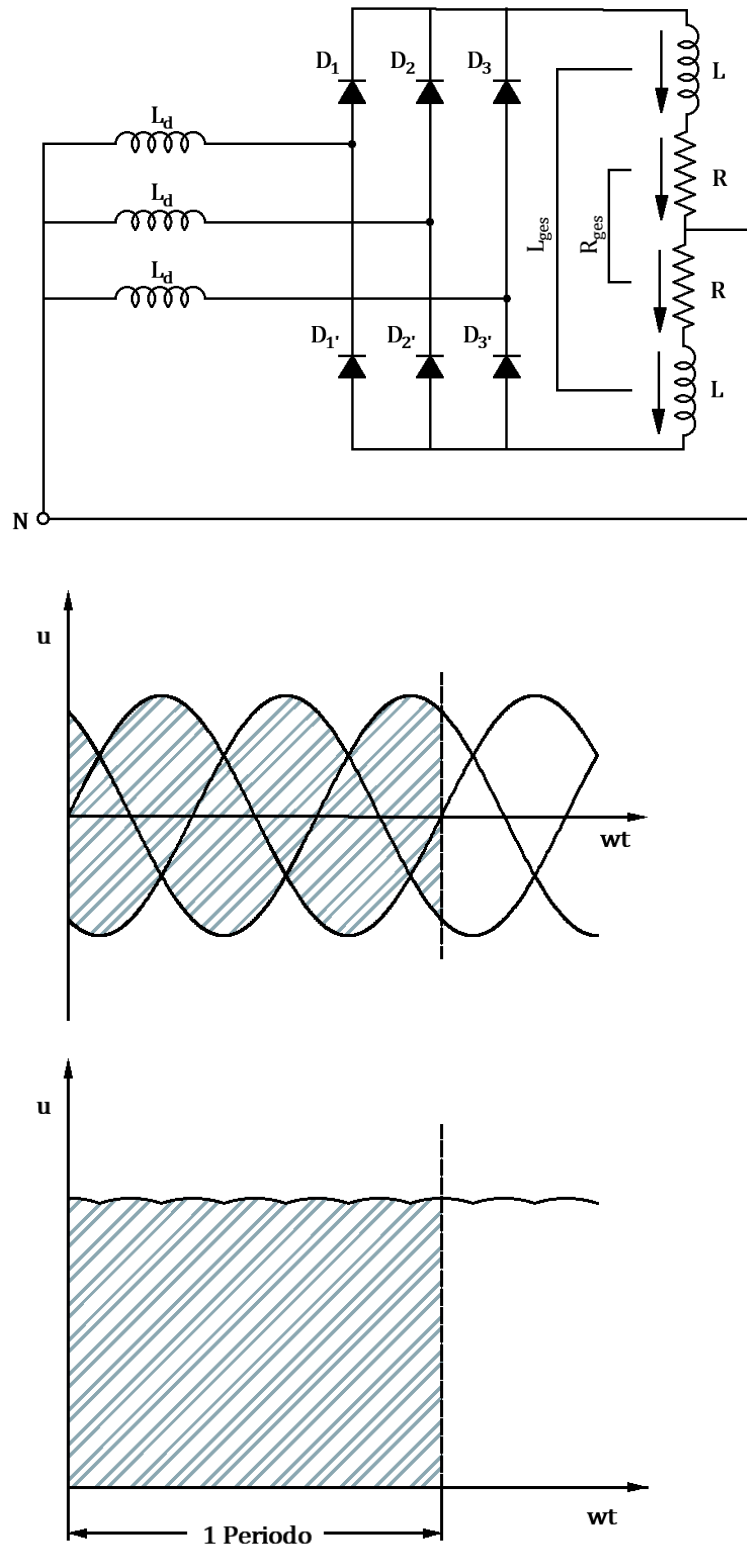


Figura 4.26. Convertidor de potencia trifásico completamente controlado. Circuito puente trifásico (fuente propia)

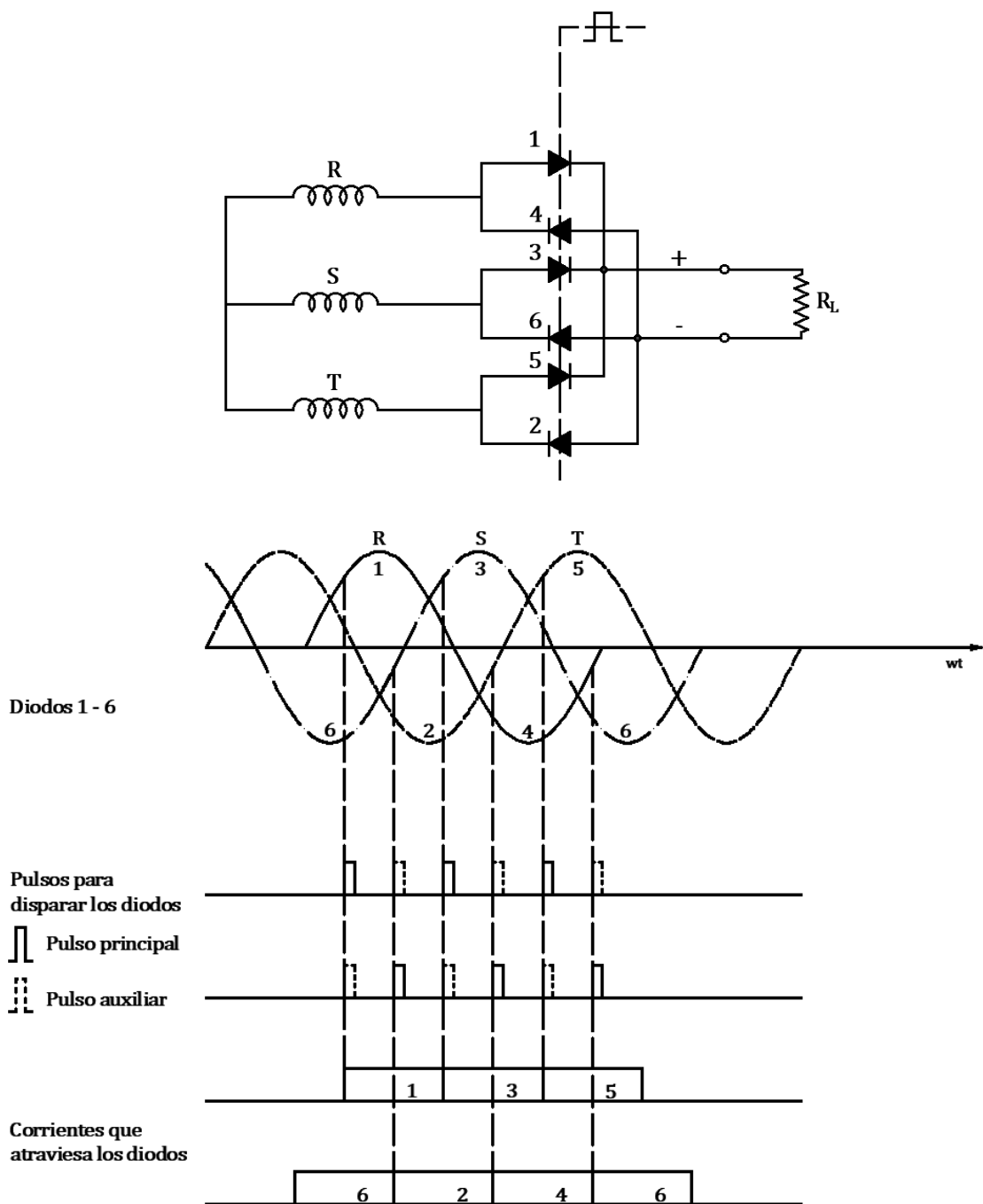


Figura 4.27. Funcionamiento del circuito puente trifásico totalmente controlado (fuente propia)

Estas dos tensiones continuas resultantes son de igual magnitud ya que el sistema es simétrico y se suman dando lugar a la tensión continua total, la cual es dos veces la tensión continua resultante de cada configuración trifásica.

En este caso, la resultante de las corrientes con respecto al punto de la estrella es siempre cero.



Este convertidor suministra una tensión de salida de 6 impulsos ya que ambas configuraciones son controladas siempre de manera simétrica.

Respecto a la onda de tensión resultante de 3 impulsos, en esta de 6 no hay tanto rizado en la onda de tensión, lo cual es una ventaja.

Asimismo, este convertidor permite que se utilice mejor el transformador de excitación porque a través de sus devanados pasa corriente en los dos sentidos.

Otra diferencia positiva es que se reduce el tiempo de operación, siendo cada 3,3 ms mientras que en el de 3 impulsos se hace doble.

#### **4.6.4.2. CONVERTIDOR DE POTENCIA SEMI-CONTROLADO**

En este convertidor, una de las dos configuraciones trifásicas que lo forman es controlada y la otra no. Esto implica la ventaja de que se pueden utilizar diodos en la mitad no controlada, los cuales son más baratos que los tiristores, y solamente se precisa una única unidad de control de 3 impulsos. Además, dispone de una demanda de potencia reactiva más favorable, lo cual es importante si se precisan ángulos de control muy elevados.

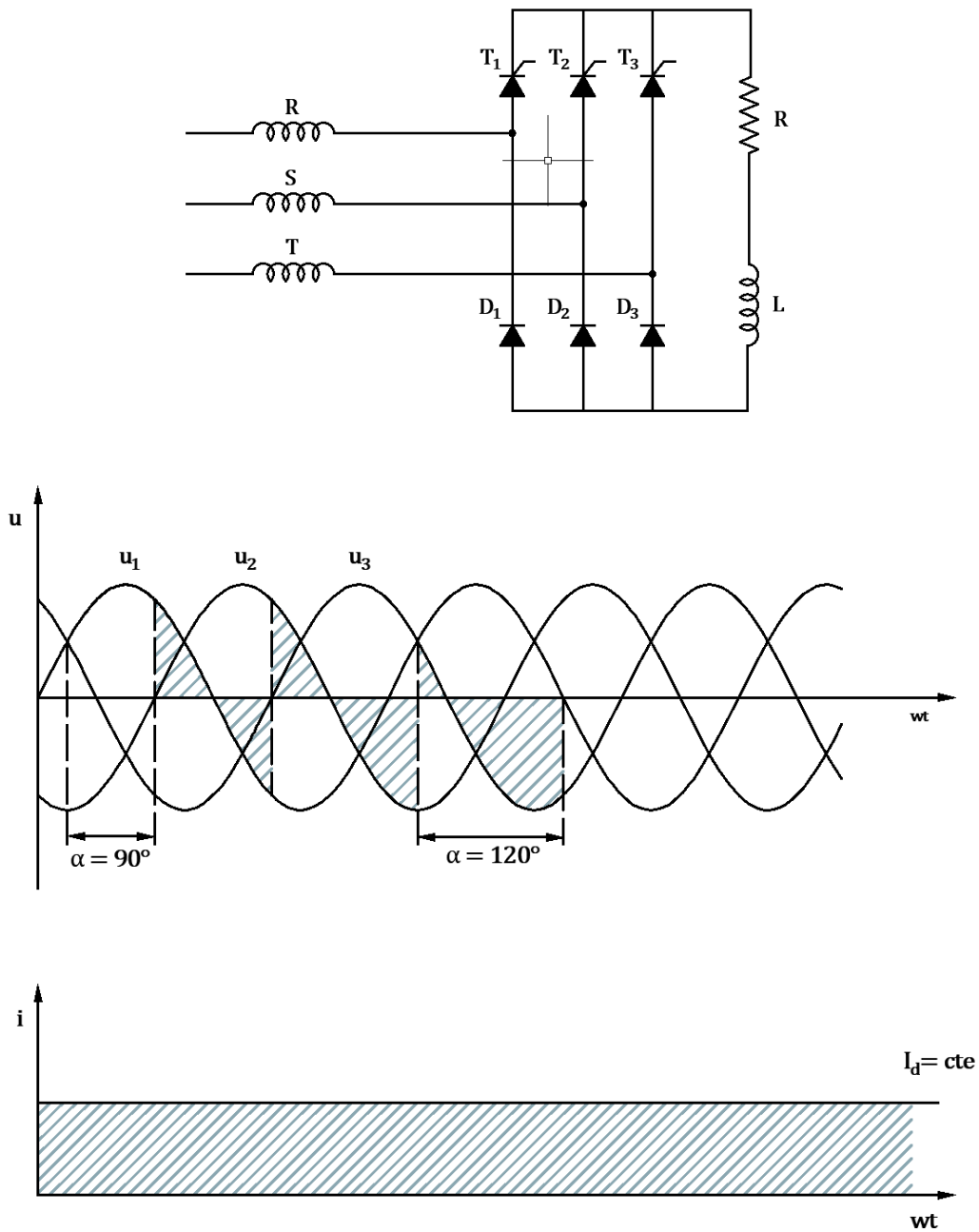


Figura 4.28. Convertidor de potencia semi-controlado (fuente propia)

La tensión final resultante se compone de la tensión constante de la configuración que no está controlada y la tensión variable de la configuración que sí está controlada.

No es posible que funcione en servicio ondulatorio ya que no se puede invertir el sentido de la corriente.

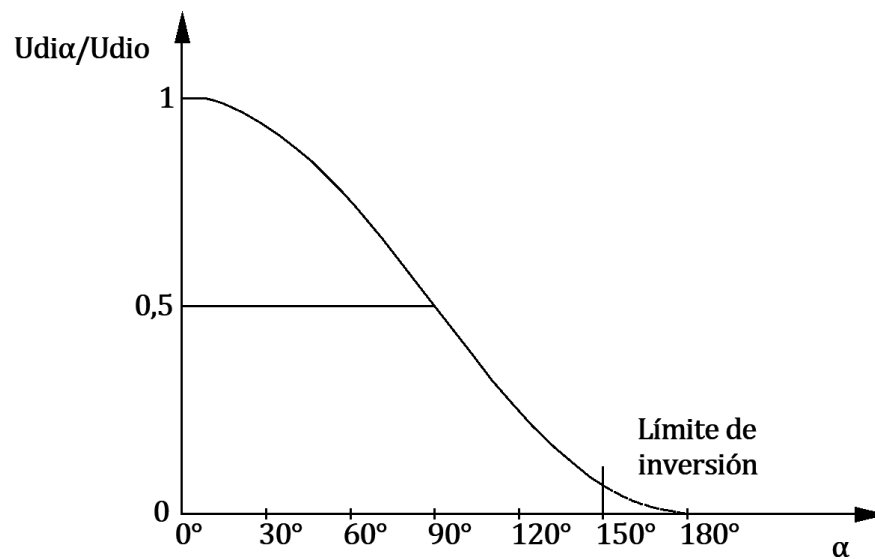


Figura 4.29. Característica de control (fuente propia)

Cuando el ángulo de control  $\alpha=60^\circ$ , el funcionamiento del convertidor es el basado en 3 impulsos, que como se ha comentado antes, produce un mayor rizado de la onda de tensión resultante y por lo tanto, se hará necesario implementar los dispositivos convenientes para suavizarlo.

Debido a ser suficientemente económico y a las ventajas técnicas que presenta, el convertidor de potencia trifásico plenamente controlado constituye la mejor opción.

#### 4.6.4.3. CONVERTIDOR DE POTENCIA MONOFÁSICO

Este convertidor se utiliza para potencias bajas, hasta alrededor de 70 KW.

Puede ser semi-controlado o totalmente controlado y puede estar formado por dos configuraciones monofásicas de referencia común en serie.

##### 4.6.4.3.1. CONVERTIDOR MONOFÁSICO COMPLETAMENTE CONTROLADO

En este caso se cumple la característica de control de la figura 4.25 y se reduce en intervalo del ángulo de control.

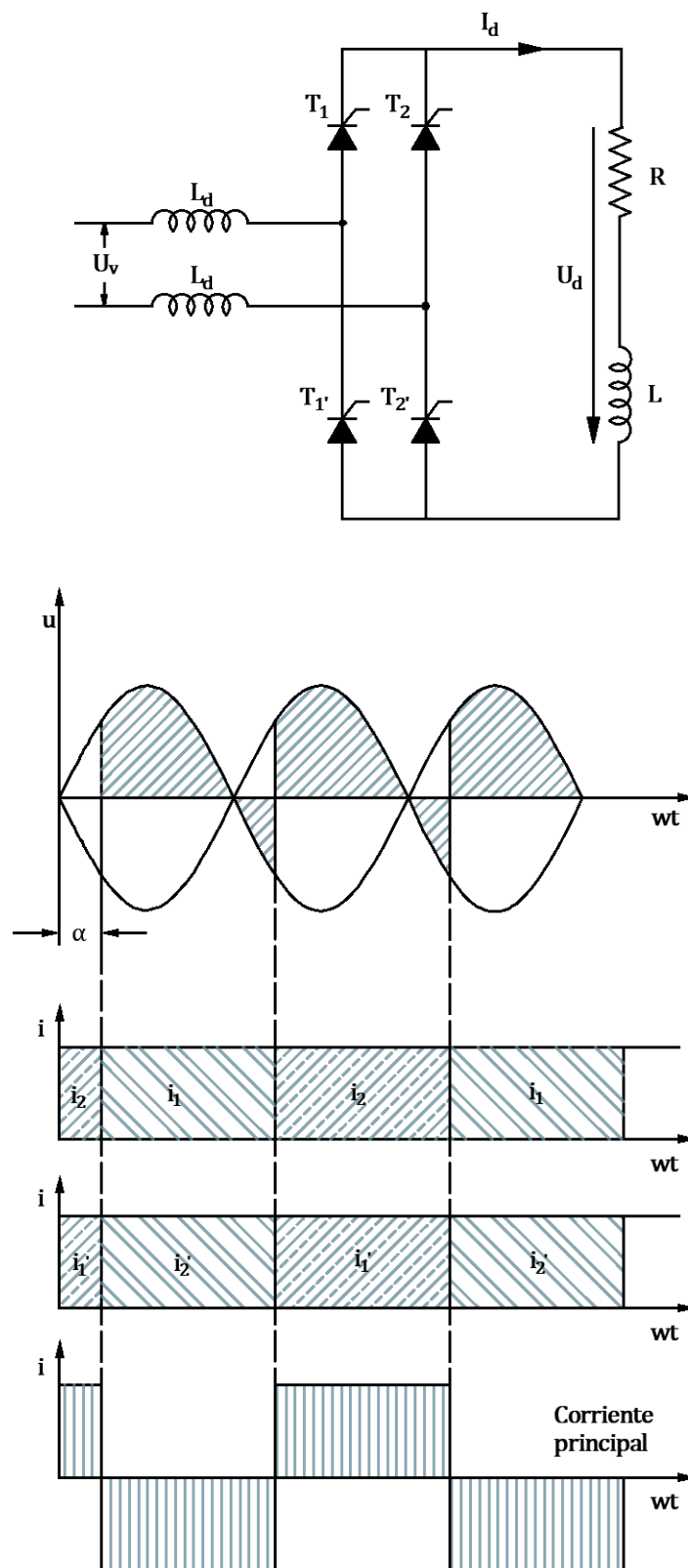


Figura 4.30. Convertidor de potencia monofásico totalmente controlado (fuente propia)

#### 4.6.4.3.2. CONVERTIDOR MONOFÁSICO SEMI-CONTROLADO SIMÉTRICAMENTE

En este convertidor, la circulación de la corriente se produce en sentido directo en los diodos y en los tiristores, lo cual se produce durante  $180^\circ$  eléctricos y en el bloqueo de corriente en los tiristores puede variarse respecto al bloqueo de corriente en los diodos.

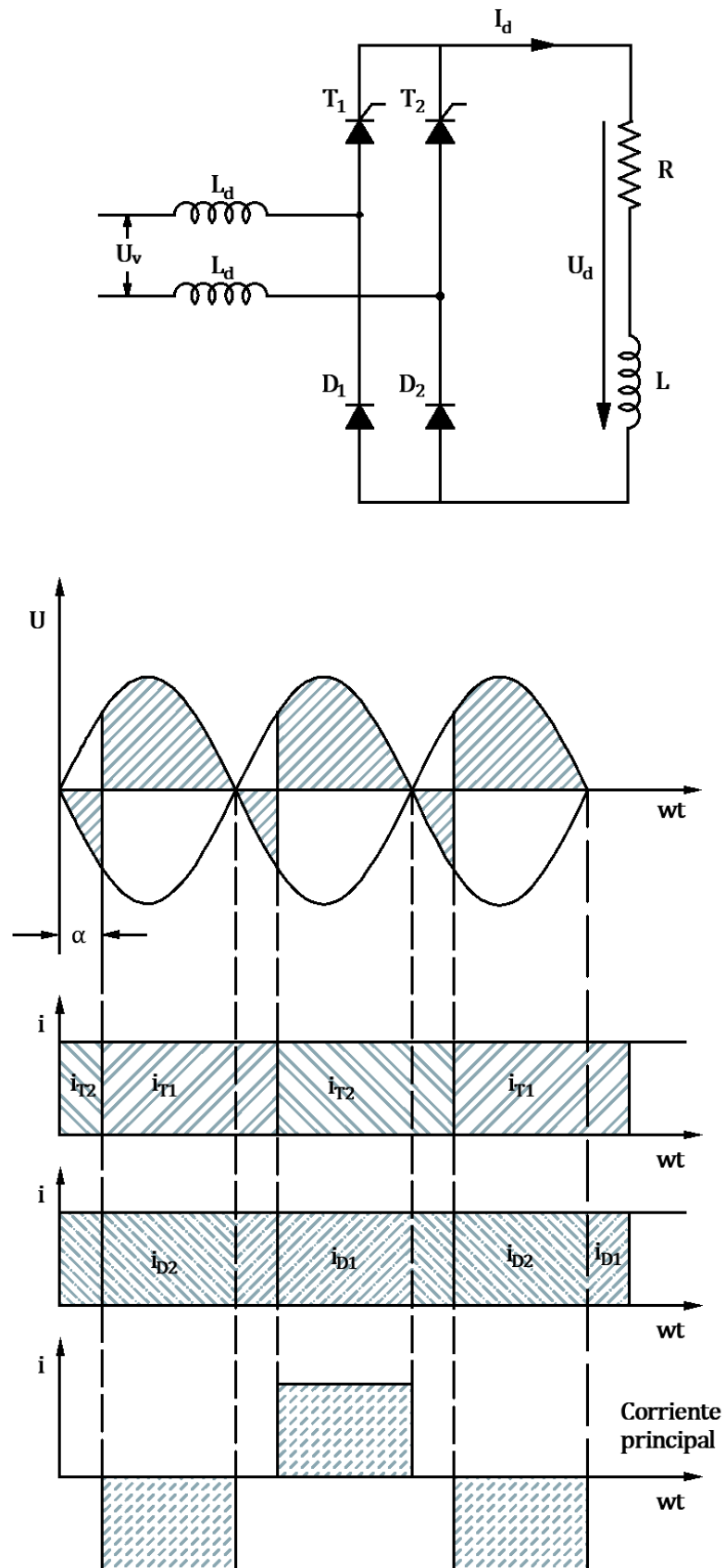


Figura 4.31. Convertido de potencia monofásico semi-controlado simétricamente (fuente propia)

#### 4.6.4.3.3. CONVERTIDOR MONOFÁSICO SEMI-CONTROLADO ASIMÉTRICAMENTE

Tiene las mismas particularidades que el simétricamente semi-controlado sin tener que depender del ángulo límite de servicio ondulatorio. El intervalo de control en su totalidad puede ser usado, además, el ángulo de control o encendido en los tiristores para conducir corriente en sentido directo es menor.

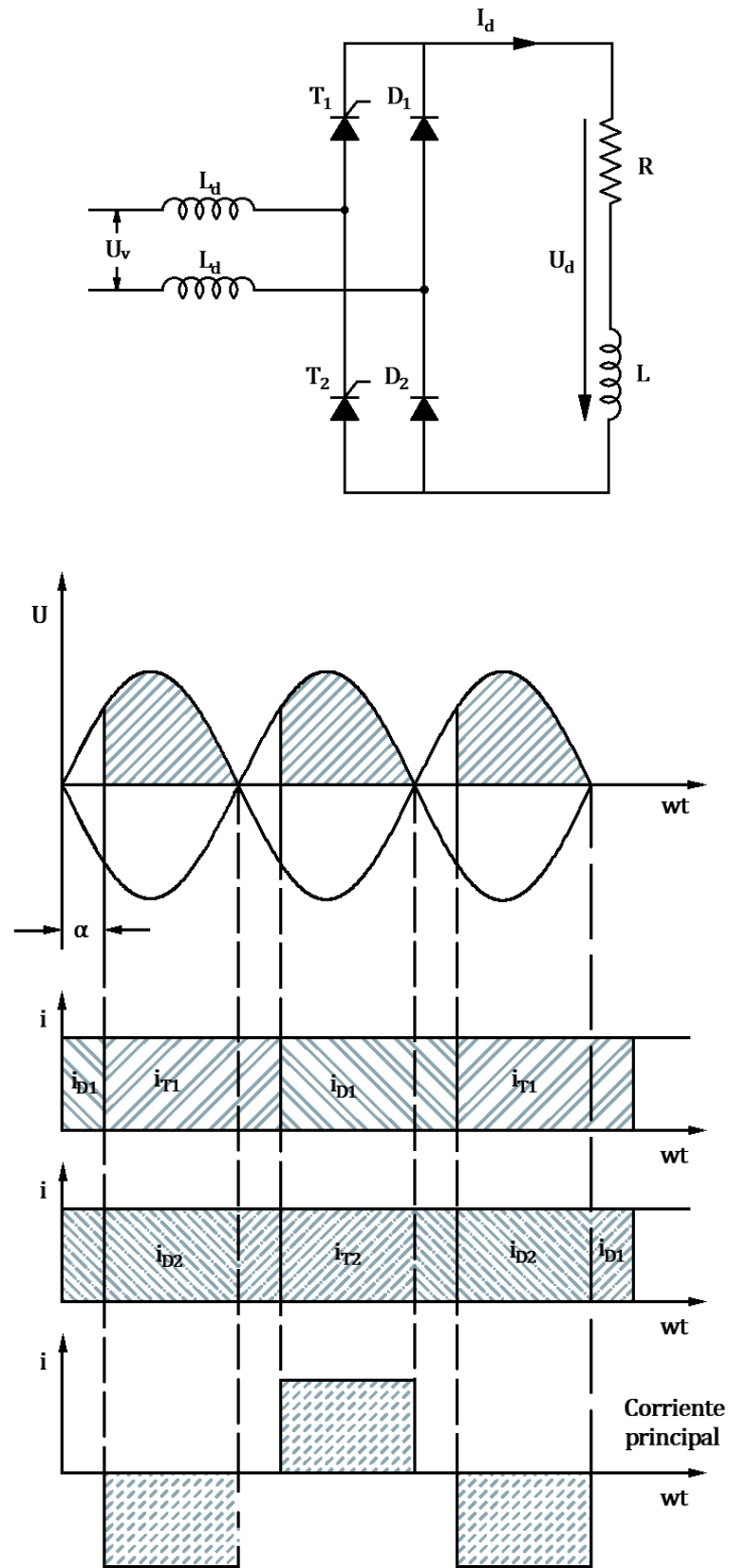


Figura 4.32. Convertido de potencia monofásico semi-controlado asimétricamente (fuente propia)



#### 4.6.5. MODOS DE FUNCIONAMIENTO

Por todo lo descrito en el apartado anterior, se puede manifestar que los convertidores semi-controlados suministran corriente y tensión continua en un solo sentido y positiva, por lo que toda la energía es transmitida a la carga.

En el caso de convertidores controlados completamente, estos suministran tensión continua de ambas polaridades, positiva y negativa, y corriente circula en un único sentido, por lo que se hace posible suministrar energía al sistema desde la carga, lo cual se utiliza en sistemas de desexcitación.

Frecuentemente, se hace necesario que la fuente de alimentación suministre tanto tensión continua positiva como tensión continua negativa y asimismo, corriente que circule en ambos sentidos, positivo y negativo. En este caso, un convertido no puede realizar dicha función.

Para ello, hay que conectar a la carga el convertidor de potencia completamente controlado adecuadamente a través de un contactor de selección o por otro lado, conectar dos convertidores de potencia de polaridad inversa en paralelo controlándose de forma apropiada.

#### 4.7. SECUENCIA DE INICIO DE EXCITACIÓN

Cuando se produce una perturbación grave, el generador suministra solamente un porcentaje pequeño de la tensión nominal, mientras que el valor de se encuentra en el 100% de la tensión nominal. Si el convertidor se alimenta directamente a través de las bornas del generador, no puede iniciarse la excitación; incluso aunque disponga de una fuente de alimentación independiente, la corriente de mantenimiento no se sostiene debido a que la tensión residual es muy baja. Por este motivo se utiliza un circuito especial denominado circuito de cebado, el cual es alimentado mediante la tensión residual o por una fuente de alimentación independiente, caso más común, a través de los diodos.

Cuando se ha conseguido alcanzar el nivel de tensión necesario para el correcto funcionamiento, un relé de tensión libera el circuito de encendido y

desconecta el circuito de cebado. Así, después del arranque del sistema de excitación, es el regulador de tensión automático el que se pone al mando.

Se considera que la sobreoscilación de tensión no debe ser superior al 5%. El regulador de tensión automático dispone de un circuito de diferenciación a la entrada, y llevando una señal proporcional al índice de aumento de la tensión al punto suma del amplificador de control, se puede conseguir un comportamiento muy estable.

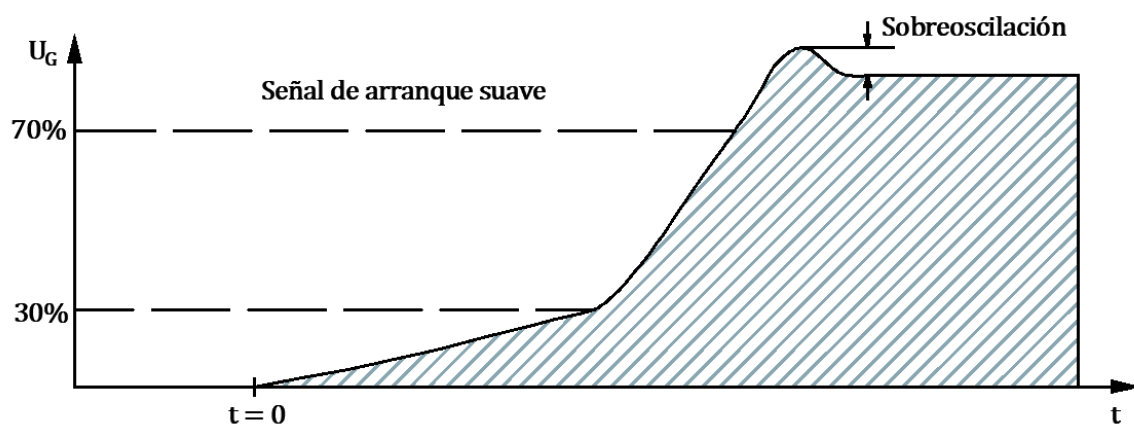


Figura 4.33. Secuencia de inicio de la excitación (fuente propia)

## 5. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha hecho un recorrido a través de la evolución en la tecnología de los elementos de la electrónica de potencia y como consecuencia se han ido perfeccionado los sistemas de excitación de alternadores.

Se ha puesto de manifiesto la gran importancia de la electrónica de potencia en unos sistemas que inicialmente funcionaban con generadores de corriente continua y hoy en día están compuesto en su mayor parte por electrónica.

Se han expuesto los diferentes tipos de sistemas de excitación, cuya selección depende de numerosas variables, tales como la potencia y velocidad del alternador, el mantenimiento, el presupuesto, el tipo de ambiente, etc.

Se han tratado los elementos que componen cada uno de los sistemas de excitación, sus ventajas y desventajas, además de la regulación automática de la tensión y la generación.

Finalmente, se ha mostrado cómo se llevaría a cabo la puesta en marcha de estos sistemas.

Por lo tanto, se puede concluir que los sistemas de excitación son sistemas que se encuentran continuamente en evolución, y que su selección adecuada dependerá mucho del tipo de alternador, red y ambiente en el que se encuentren.

Se hace necesario el estudio minucioso de estos sistemas en el entorno de las centrales eléctricas, debido a que suponen una parte muy importante de las mismas ya que son esenciales para el correcto suministro de energía eléctrica de calidad.

## 6. Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que han hecho posible esta carrera universitaria y este trabajo.

A mi tutora, por sus orientaciones siempre acertadas.

A mi pareja, que me ha acompañado durante la realización de este trabajo, brindándome apoyo y motivación.

Y por último, a todas las profesoras y profesores que han contribuido a mi formación como ingeniera.

## 7. Referencias

- [1] M. Á. Rodríguez Pozueta, «Máquinas Eléctricas I,» 2015.
- [2] Milsa Trillo Galicia, S.A..
- [3] Andritz, *HYDRONEWS*, nº 28, p. 32, Diciembre 2015.
- [4] L. Vargas, «Sistemas de excitación de máquinas síncronas,» 2010.
- [5] UNED, «Regulación, control y protección de los alternadores,» 2008.
- [6] Brown Boveri de España, S.A., «Formación en Sistemas de Excitación».
- [7] E. Rebollo-López, F. R. Blánquez-Delgado, C. A. Platero-Gaona, F. Blázquez-García, J. Á. Martínez-Rueda y I. Aretxederra-Galarza, «Nuevo “sistema de desexcitación rápida para máquinas síncronas con excitación brushless” (HSBDS) en un generador de 15 MVA,» 2014.
- [8] O. I. Elgerd, *Electric Systems Theory*.
- [9] Red Eléctrica Española, «REE,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion>.
- [10] Andritz, *HYDRONEWS*, nº 29, p. 36, Junio 2016.
- [11] ABB Generacion, S.A..
- [12] F. Barrero, *Sistemas de energía eléctrica*.