

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO GRUPO MOTOR
GENERADOR SÍNCRONO PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA



LUIS FRANCISCO CÁCERES TARAZONA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELECTRÓNICA, SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2017

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO GRUPO MOTOR
GENERADOR SÍNCRONO PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

LUIS FRANCISCO CÁCERES TARAZONA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al
título de: **Ingeniero Eléctrico**

Director

MSc. Luis David Pabón Fernández

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Pamplona, 15 de junio de 2017.

DEDICATORIA

A Dios por brindarme salud y licencia durante el recorrido en busca de mis metas.

A mis padres Ana Tarazona y Daniel Cáceres por ser ejemplos de trabajo, perseverancia, portadores de buenos principios y brindarme su apoyo en todo momento,

A mi hija Ana Sofía que desde su llegada a este mundo ha sido mi motivación para seguir siempre adelante sin importar las dificultades.

A mis demás familiares por brindarme su apoyo cuando más los necesite y ser ejemplo de superación.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

- Todos los docentes de la Universidad de Pamplona que hicieron parte de mi formación académica, por todos los conocimientos que me inculcaron e impartieron en mi proceso universitario, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este mismo proyecto y los cuales me permitirán el desarrollo como profesional.
- A mis padres Ana Tarazona y Daniel Cáceres por su formación personal impartida desde el hogar y el apoyo incondicional en todo momento.
- A mi hermano Juan Cáceres por ser un ejemplo a seguir y por todos los conocimientos de enseñanza que me ha compartido.

TABLA DE CONTENIDO

1.	TABLA DE FIGURAS	7
2.	INTRODUCCIÓN	10
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
4.	JUSTIFICACIÓN	12
5.	OBJETIVOS	13
6.	CAPÍTULO 1	
	Marco teórico	14
7.	CAPÍTULO II	
	Diseño de la estructura mecánica y los circuitos electrónicos para el grupo motor generador	36
8.	CAPITULO III	
	Diseño del sistema de control de las excitatrices de las máquinas	53
9.	CAPITULO IV	
	Implementación del módulo con la estructura mecánica y los circuitos electrónicos diseñados	57
10.	CAPITULO V	
	Resultados y validación de funcionamiento del grupo motor generador sincrónico	61
	CONCLUSIONES	66
	ANEXOS	67
	Guías de prácticas de laboratorio	67
	Manual de funcionamiento del módulo	88
	BIBLIOGRAFÍA	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Máquina eléctrica como convertidor de energía [2]	13
Figura 3. Rotor de seis polos salientes [1]	14
Figura 2. Rotor de dos polos no salientes [1].....	14
Figura 5. Curva de magnetización de generador síncrono. [1].....	15
Figura 4. Flujo contra corriente de campo de un generador síncrono. [1]	15
Figura 6. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico [1].....	16
Figura 8. Circuito equivalente de un generador síncrono conectado en Δ [1].....	17
Figura 7. Circuito equivalente de un generador síncrono conectado en Y [1]	17
Figura 9. Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia unitario. [1]	17
Figura 9. Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia unitario. [1]	17
Figura 10. Diagrama fasorial de un generador síncrono factor de potencia en atraso. [1]	17
Figura 11. Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia en adelanto. [1].....	17
Figura 12. Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono [1].....	18
Figura 13. Circuito equivalente completo del motor síncrono trifásico [1].....	19
Figura 14. Curva par - velocidad de un motor síncrono [1]	19
Figura 15. Efecto del incremento de la corriente de campo en la operación de un motor síncrono [1].	20
Figura 16. Curva v de un motor síncrono [1]	21
Figura 17. Alternador de polos intercalados con anillos rozantes [7]	22
Figura 18. Rotor de 12 polos intercalados. [7].....	23
Figura 19. Despiece de un alternador. [7]	23
Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de excitación [4]	24
Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de excitación [4]	24
Figura 21. Diagrama de bloques de una fuente de dc con regulador lineal. [8].....	26
Figura 21. Diagrama de bloques de una fuente de dc con regulador lineal. [8].....	26
Figura 22. Elementos de un regulador de voltaje. [8].....	26
Figura 23. Regulador lineal. [8]	27
Figura 23. Regulador lineal. [8]	27
Figura 24. Voltaje de salida y de entrada en un regulador conmutado [8].....	27
Figura 24. Voltaje de salida y de entrada en un regulador conmutado [8].....	27
Figura 26. Regulador buck asíncrono. [9].....	28
Figura 25. Regulador buck síncrono. [9].....	28
Figura 25. Regulador buck síncrono. [9].....	28
b) Circuito equivalente durante tDead	28
a) Circuito equivalente durante ton.....	28
c) Circuito equivalente durante toff.....	28
Figura 27. Modo de operación del regulador buck síncrono. [9].....	28
Figura 28 Formas de ondas del convertidor buck síncrono. [9]	30
Figura 28 Formas de ondas del convertidor buck síncrono. [9]	30
Figura 29. Tiempos de conmutación de un mosfet. [10]	31
Figura 30. a) Esquema eléctrico del mosfet b) modelo equivalente del mosfet en conducción [10]	32
figura 31. Señal de control generada por modulación de ancho de pulso.	34
figura 32. Diagrama de bloques del control PWM	35
Figura 33. Esquema de conexión interna del alternador con valores nominales de cd. [3].....	36
Figura 34. Rotor de 7 polos intercalados maquina Delco Remy	37
Figura 35. Rotor de polos intercalados de 8 polos maquina Prestolite.	38
Figura 36. Topología de una fuente conmutada [10].....	40
Figura 37. Mosfet IRF640 con en capsulado TO-220AB.....	43
Figura 38. Configuración recomendada por el fabricante para el optoacoplador.	45
Figura 39. Circuito de asilamiento con optoacoplador 6N137 simulado.....	46
Figura 40. Comparación señal de entrada y salida del optoacoplador.	46

Figura 41. Circuito optoacoplador mas compuerta negadora para sincronización de las señales de los mosfet y generar tiempo muerto.	47
Figura 42. Señal de entrada y de salida de la compuerta negadora.	48
Figura 43. Desfase o tiempo muerto entre las señales de activación de los mosfet.	48
Figura 44. Esquema de conexión típica del driver IR2110.	49
Figura 45. Circuito simulado para las fuentes de cd.	50
Figura 46. Diferentes valores de tensión a la salida de la fuente simulada.	51
Figura 47. Impreso de la etapa del Convertidor ca cd y fuentes de alimentación de los circuitos de control.	51
Figura 48. impresos de la etapa convertidor cd a cd.	52
Figura 49. Impreso de la etapa de control.	55
Figura 49. Impreso de la etapa de control.	55
Figura 50. Maquinas en su estado original	56
Figura 51. Estatores de las maquinas con conectores.	56
Figura 52. Partes de la maquina Delco Remy después de ser adecuadas	57
Figura 53. Partes de la maquina Prestolite después de ser adecuadas	57
Figura 54. Maquinas después de las modificaciones.	57
Figura 55. Estructura de soporte y acople de las maquinas.	58
Figura 56. Maquinas acopladas mecánicamente y montadas en la estructura.	58
Figura 56. Circuitos de las diferentes etapas de las fuentes.	58
Figura 57. Componentes de las excitatrices	59
Figura 58. Vista interna de la fuente terminada.	59
Figura 59. Grupo motor generador sincrónico implementado.	59
Figura 60. Señal PWM de control de las excitatrices.	60
Figura 61. Señales de control PWM de disparo de los mosfet.	60
Figura 62. Señales de control y excitatrices conectadas al circuito de campo de las maquinas síncronas.	61
Figura 63. Grupo motor generador con motor de arranque.	61
Figura 64. Funcionamiento del módulo y conexión del analizador de red	62
Figura 65. Frecuencia y ondas de voltajes de la alimentación del motor sincrónico en operación, en el analizador de red.	62
Figura 66. Ondas de corriente y frecuencia del motor sincrónico	63
Figura 67. Diagrama fasorial.	63
Figura 68. Potencias y factor de potencia del motor síncrono.	63
Figura 69. Elevación del voltaje de salida del generador síncrono mediante un transformador trifásico.	64
Figura 70. Conexión del analizador red al transformador elevador de la tensión del generador.	64
Figura 71. Ondas de voltaje y frecuencia a la salida del transformador elevador.	65
Figura 4.1. Efecto del incremento de la corriente de campo en la operación de un motor síncrono	81
Figura 4.2. curva v del motor síncrono	82
Figura 4.3. Esquema de conexión para realizar la curva v del motor síncrono	82
Figura 5.1. Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación.	85
Figura 5.2. Esquema de conexión método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase	85
Figura 5.3. Esquema de conexión del grupo motor generador.	86

INTRODUCCIÓN

Las asignaturas del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pamplona se clasifican en materias teóricas y materias teórico prácticas, para las cuales debe existir laboratorios con los implementos o instrumentos necesarios para realizar todas las practicas que complementan y afianzan los conocimientos teóricos en los estudiantes. Aun cuando la Universidad de Pamplona cuanta con los laboratorios y una gran diversidad de implementos y materiales para estas labores entre sus implementos carece de un grupo motor generador y de máquinas síncronas que son necesarias para el desarrollo de temáticas de materias que son teórico prácticas.

Por medio de este proyecto se busca dar solución a esta necesidad del programa de Ing Eléctrica de la Universidad de Pamplona, implementando un grupo motor generador síncrono junto con guías de laboratorio para la realización de prácticas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El laboratorio de máquinas eléctricas del programa de ingeniería eléctrica de la Universidad de Pamplona no cuenta hoy en día con ninguna máquina síncrona, ni un grupo motor generador razón por la cual no se pueden plantear ni desarrollar prácticas de laboratorio de estas temáticas, limitando el aprendizaje de los estudiantes únicamente a lo teórico, aun cuando estas materias (máquinas de ac y suministro eléctrico) son teórico prácticas en nuestro pensum. El objetivo de las prácticas de laboratorio en este tipo de materias es reforzar y afianzar los conocimientos adquiridos en la teoría por parte de los estudiantes, ayudando a que el aprendizaje sea más rápido y comprensivo para el mismo.

JUSTIFICACIÓN

A raíz de la problemática mencionada anteriormente surge este proyecto con la idea de presentar diferentes guías de prácticas de laboratorio de las temáticas máquinas síncronas y grupo motor generador para suministros eléctricos, junto con un módulo didáctico para el desarrollo de las mismas. Un buen manejo y desarrollo de las prácticas de laboratorio contribuye a que el aprendizaje sea más rápido y efectivo por lo que se estarán formando futuros profesionales de alta calidad, quienes contarán con todos los conocimientos teórico prácticos necesarios para ejercer como profesionales competentes.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un módulo didáctico grupo motor generador síncrono para el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Pamplona.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la estructura mecánica y los circuitos electrónicos requeridos por el módulo.
- Diseñar el sistema de control de las excitatrices de las máquinas.
- Implementar el modulo con la estructura mecánica y los circuitos electrónicos diseñados.
- Validar funcionamiento del módulo.
- Diseñar guías de laboratorio y manual de funcionamiento del módulo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. MAQUINAS SINCRONAS.

Las maquinas síncronas son máquinas eléctricas que convierten potencia mecánica en potencia eléctrica de ca o viceversa. [1] Las maquinas síncronas están sometidas al principio de reciprocidad por lo que pueden operar tanto en régimen generador como en régimen motor. Una de las principales características de las maquinas síncronas es su vinculación rígidamente entre su velocidad de rotación y frecuencia de la red a la cual operan o generan. Su relación se puede apreciar en la ecuación (1).

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Donde:

n: velocidad de rotación de la maquina en rpm.

f: frecuencia de la red a la cual opera la maquina o genera la máquina.

p: número de pares de polos de la máquina. [2]

Aspectos constructivos de las maquinas asíncronas.

En general las maquinas síncronas están constituidas por dos partes una fija denominada estator y una móvil denominada rotor, donde están situados dos devanados independientes:

- Un devanado inductor, construido en forma de arrollamiento concentrado bien distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina.
- Un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por una corriente alterna.

Cualquiera de estos dos devanados puede estar situado tanto en el rotor como en el estator. En máquinas síncronas cuando el devanado inductor está situado el en rotor este puede estar conectado por medio de dos anillos rozantes por los cuales se alimenta con corriente cd y en el estator se encuentra el devanado inducido que va a estar recorrido por una corriente de ca trifásica ya sea entrando o saliendo del devanado según el régimen de funcionamiento de la máquina. También se puede tener estos dos devanados invertidos de posición el inductor en el estator, y el inducido en el rotor el cual va a estar conectado por medio de tres anillos rozantes que corresponde a cada una de las fases trifásicas por donde circula una corriente trifásica de ca.

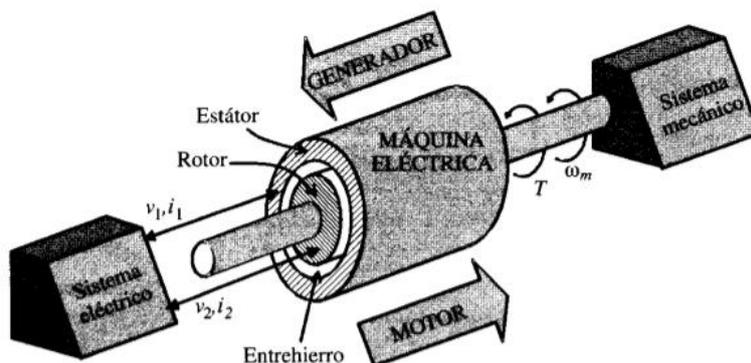


Figura 1. Máquina eléctrica como convertidor de energía [2]

1.2. Generador síncrono

Para el funcionamiento de un generador síncrono se debe producir un campo magnético en el rotor ya sea mediante el diseño de éste como un imán permanente o mediante la aplicación de una corriente de cd a su devanado inductor para crear un electroimán. Y cuando, el rotor del generador gira mediante un motor primario, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador, esto cuando el devanado inductor está ubicado en el rotor y el inducido en el estator. Para el caso contrario el campo magnético esta estático y el devanado inducido es el que gira ocasionando el mismo efecto.

El devanado inductor o generador del campo magnético es un gran electroimán, cuando este está ubicado en el rotor existen dos tipos denominados rotores de polos salientes o no salientes. El término saliente significa proyectado hacia “afuera” o “prominente” y un polo saliente es un polo magnético proyectado hacia afuera del eje del rotor. Por otro lado, un polo no saliente es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor.

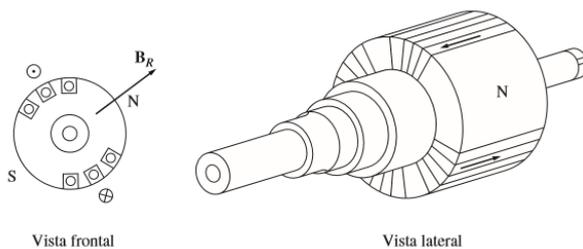


Figura 2. Rotor de dos polos no salientes [1]

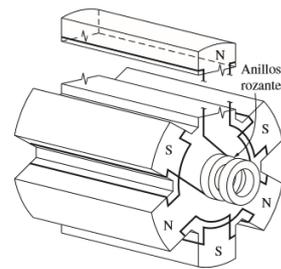


Figura 3. Rotor de seis polos salientes [1]

Como ya se mencionó anteriormente el circuito de campo se debe alimentar con cd y cuando este está ubicado en el rotor se requiere de un arreglo para hacer esta alimentación, que puede ser por medio de anillos rozantes y escobillas cuando se alimenta de una fuente externa, también se puede suministrar la potencia de cd desde una fuente de potencia de cd especial montada directamente en el eje del generador síncrono.

Velocidad de rotación de un generador síncrono

cuando se habla de un generador síncrono, el termino síncrono quiere decir que la frecuencia eléctrica se produce y entrelaza, o sincroniza con la tasa mecánica de rotación del eje del generador. Cuando el rotor del generador es un electroimán al que se introduce cd y este en consecuencia genera el campo magnético del generador, este campo magnético apunta en la dirección de rotación del rotor. Por lo que la tasa de rotación de los campos magnéticos en la maquina está relacionado con la frecuencia eléctrica en el estator mediante la ecuación (2).

$$f_e = \frac{P \cdot n_m}{120} \quad (2)$$

Donde

f_e : frecuencia eléctrica en Hz

n_m : velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad del rotor de la maquina síncrona)

P: número de polos de la máquina.

De la ecuación 2 se puede deducir que para que un generador síncrono genere una frecuencia eléctrica constante es su estator es necesario que su tasa rotación de los campos magnéticos sea fija, su magnitud dependerá del número de polos de la máquina para cualquier valor de frecuencia deseado.

Voltaje interno generado por generador síncrono.

La magnitud del voltaje inducido en la fase de un estator está dada por la ecuación 3

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f \quad (3)$$

esta magnitud E_A depende del flujo, la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina. A menudo esta ecuación se lleva o se expresa de una forma más sencilla ecuación 4, que destaca las cantidades que varían durante la operación de la máquina. Donde K es una constante que representa la construcción de la máquina.

$$E_A = K\phi\omega \quad (4)$$

E_A depende de la velocidad y del flujo, y el flujo a su vez depende de la corriente del circuito de campo I_F , por lo que E_A estará directamente relacionado con I_F con que se alimente el circuito de campo. En la figura 4 se puede apreciar la manera como se relaciona I_F del circuito de campo y el flujo ϕ de la máquina y en figura 5 se puede apreciar la relación entre I_F y E_A conocida como curva de magnetización.

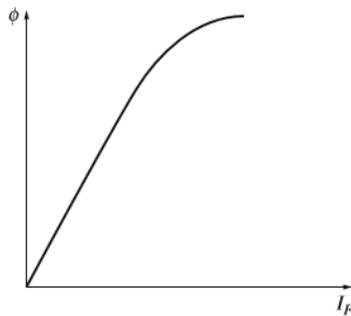


Figura 4. Flujo contra corriente de campo de un generador síncrono. [1]

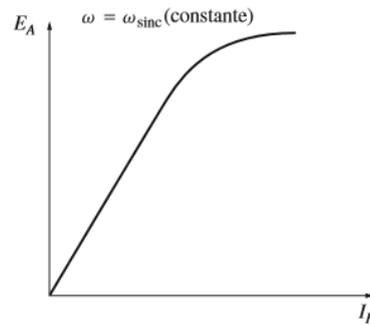


Figura 5. Curva de magnetización de generador síncrono. [1]

Circuito equivalente de un generador síncrono

Debido a que el voltaje interno generado E_A en un generador síncrono solo es igual al voltaje de fase V_ϕ que se presenta en las terminales de salida cuando no hay corriente de armadura en la máquina, se desarrolla el circuito equivalente para analizar los factores que ocasionan esta diferencia entre estos dos voltajes cuando existe una corriente de armadura I_A . Los factores que ocasionan esta diferencia son:

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido.
2. La autoinductancia de las bobinas del inducido (o armadura).
3. La resistencia de las bobinas del inducido.

La reacción del inducido genera un voltaje que es debido a la corriente de armadura que al circular genera su propio campo dentro de la máquina y al mismo tiempo este campo genera su propio voltaje en el estator E_{estat} de reacción del inducido que se expresa como:

$$E_{estat} = -jXI_A \quad (5)$$

Entonces el voltaje de fase en las terminales del generador es igual a:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad (6)$$

con esta ecuación se puede modelar el voltaje de reacción del inducido como un inductor en serie con un voltaje interno generado. Además de los efectos de la reacción del inducido, las bobinas del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si se llama L_A a la autoinductancia del estator (y se llama X_A a su reactancia correspondiente), mientras que a la resistencia del estator se le llama R_A , entonces la diferencia total entre E_A y V_ϕ está dada por:

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (7)$$

Los efectos de la reacción del inducido y autoinductancia de la máquina se representan por medio de reactancias y se acostumbra combinarlas en una sola llamada reactancia síncrona de la máquina:

$$X_S = X + X_A \quad (8)$$

Remplazando 8 en 7 nos queda la ecuación final 9 con la que es posible dibujar el circuito equivalente de un generador síncrono trifásico.

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (9)$$

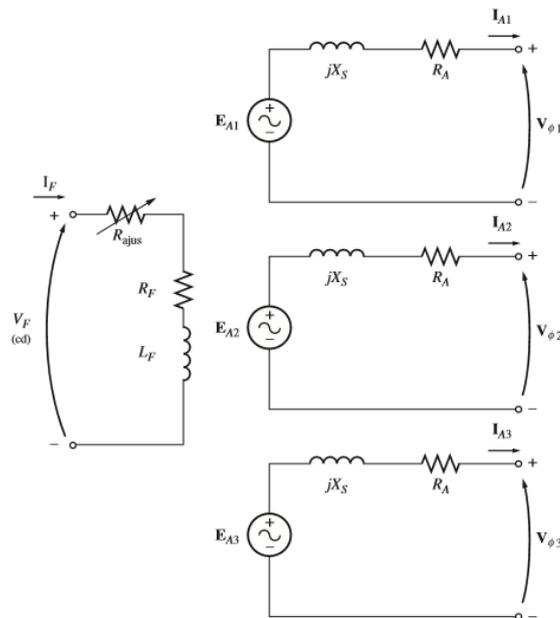


Figura 6. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico [1]

La única diferencia entre los voltajes y corrientes de las tres fases es que están separados 120° , estas tres fases se pueden conectar en Y o Δ dependiendo de la aplicación que se quiera realizar, si se conectan en Y, la relación entre el voltaje de línea y de fase es la siguiente:

$$V_L = \sqrt{3}V_\phi \quad (10)$$

Y si se conecta en Δ :

$$V_L = V_\phi \quad (11)$$

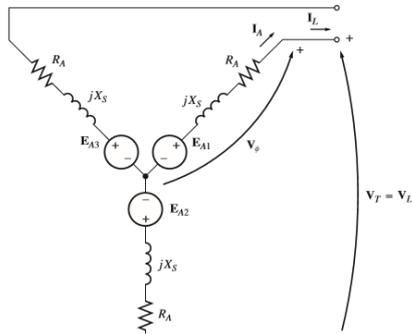


Figura 7. Circuito equivalente de un generador síncrono conectado en Y [1]

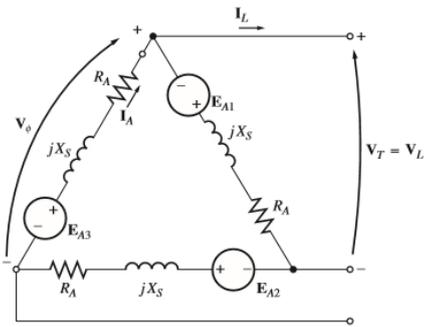


Figura 8. Circuito equivalente de un generador síncrono conectado en Δ [1]

Diagrama fasorial de un generador síncrono

Los diagramas fasoriales de un generador síncrono nos indican en que factor de potencia están operando, factor de potencia unitario en a trazo o adelanto.



Figura 9. Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia unitario. [1]

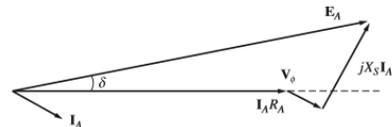


Figura 10. Diagrama fasorial de un generador síncrono factor de potencia en atraso. [1]

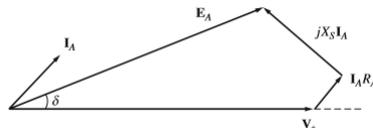


Figura 11. Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia en adelanto. [1]

Potencia y par en los generadores síncronos.

En los generadores síncronos no toda la potencia mecánica que entra en él se convierte potencia eléctrica a su salida, en este proceso de conversión de energía existen diferentes tipos pérdidas como se muestra en el diagrama de flujo de potencia figura 12. La potencia mecánica de entrada es:

$$P_{entr} = T_{ap} * Wm \quad (12)$$

en eje en el generador mientras que la potencia mecánica convertida a potencia eléctrica internamente está dada por:

$$P_{conv} = T_{ind} * Wm = 3E_A I_A \cos \gamma \quad (13)$$

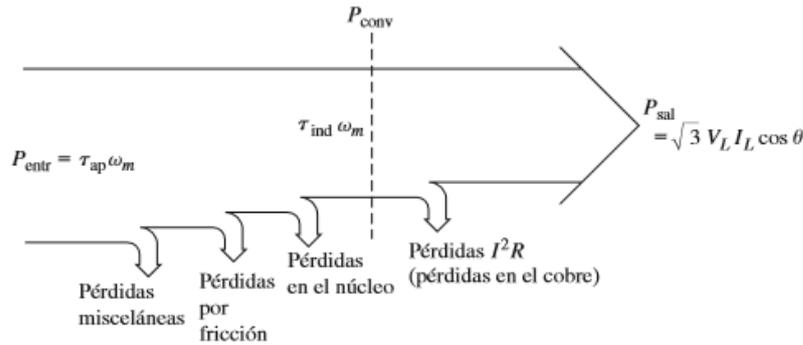


Figura 12. Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono [1]

Generador síncrono que opera solo

El comportamiento en general de un generador síncrono que opera solo alimentando una carga con diferentes factores de potencia se resume en los siguientes ítem.

Si se añaden cargas en retraso (+Q o cargas de potencia reactiva inductivas) a un generador, V_ϕ y el voltaje en las terminales V_T decrecen de manera significativa.

1. Si se añaden cargas con factores de potencia unitarios (no potencia reactiva) a un generador, se produce una pequeña disminución de V_ϕ y del voltaje en las terminales.
2. Si se añaden cargas en adelanto (-Q o cargas de potencia reactiva capacitivas) a un generador, V_ϕ y el voltaje terminal aumentarán.

Una forma conveniente de comparar el comportamiento del voltaje de dos generadores es su regulación de voltaje. La regulación de voltaje (VR) de un generador se define por medio de la ecuación 14

$$VR = \frac{V_{sc} - V_{pc}}{V_{pc}} * 100\% \quad (14)$$

Donde V_{sc} es el voltaje sin carga del generador y V_{pc} es el voltaje a plena carga del generador.

Cuando un generador está en operación es primordial mantener constante el voltaje suministrado a una carga, incluso cuando la carga misma varía, para corregir estas variaciones de voltaje en las terminales de salida el método más obvio es variar la magnitud de E_A , para compensar los cambios en la carga, para variar E_A se debe hacer por medio de la variación de flujo ya que al variar este no afecta la frecuencia que debe ser constante. Entonces a la hora de mantener constante el voltaje de salida de un generador que opera solo se debe tener en cuenta:

1. Un decremento en la resistencia de campo del generador incrementa su corriente de campo.
2. Un incremento en la corriente de campo causa un aumento del flujo en la máquina.
3. Un incremento en el flujo causa un aumento del voltaje interno generado E_A .
4. Un incremento en E_A causa un incremento en V_ϕ y en el voltaje en las terminales en el generador.

Para cuando se quiere disminuir el voltaje en las terminales se puede invertir este proceso, en conclusión, se puede regular el voltaje en las terminales de un generador a través de una serie de cambios en la carga simplemente ajustando la corriente de campo.

1.3. Motor síncrono

Principio básico de operación del motor síncrono

Para que un motor síncrono opere o entre en funcionamiento convirtiendo energía eléctrica en mecánica se requiere de dos fuentes de alimentación una de ac trifásica para alimentar su devanado trifásico y otra de cd para alimentar su devanado de campo. Cuando se alimenta su devanado de campo la I_F genera un campo magnético estático en el rotor, y cuando se aplica el voltaje ca trifásico al devanado del estator esto produce un flujo de corrientes trifásicas en este devanado, posteriormente estas corrientes generan un campo magnético giratorio uniforme en el inducido del motor, como se tiene dos campos magnéticos en el motor estos se trataran de alinearse pero como el campo magnético del estator es giratorio entonces el campo estático girara junto con él y consiga el mismo rotor.

Circuito equivalente de un motor síncrono

Los motores síncronos son iguales en todos los aspectos a los generadores síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia es la opuesta. Debido a que se invierte la dirección del flujo de potencia en la máquina, se puede esperar que la dirección del flujo de corriente en el estator del motor también se invierta. Por lo que el circuito equivalente es idéntico excepto la dirección de I_A . Las fases de un motor síncrono también se pueden conectar tanto en Y como en Δ al igual que los generadores.

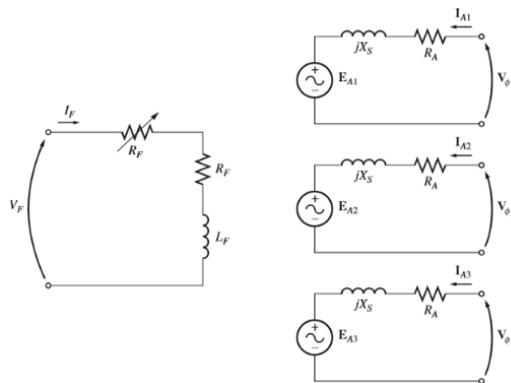


Figura 13. Circuito equivalente completo del motor síncrono trifásico [1]

Curva característica par-velocidad de los motores síncronos

La velocidad de rotación de los motores síncronos está asociada a la tasa de rotación de los campos magnéticos, y la tasa de rotación de los campos magnéticos aplicados está asociada a la frecuencia eléctrica de la red, por lo que la velocidad del motor síncrono será constante sin que importe la carga. Esta velocidad fija de rotación está dada por la ecuación 1.

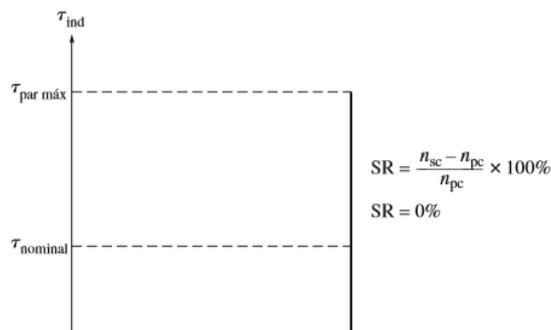


Figura 14. Curva par - velocidad de un motor síncrono [1]

La ecuación para el par de un motor síncrono es:

$$T_{ind} = \frac{3V_{\phi}E_A \text{sen } \delta}{\omega_m X_S} \quad (15)$$

El par máximo para un motor síncrono se da cuando $\delta=90$, cuando se rebasa el par máximo de un motor síncrono el rotor no puede seguir unido al campo magnético del estator y al campo magnético neto, sino que comienza a retrasarse en relación con ellos. Conforme el rotor pierde velocidad, el campo magnético del estator "lo rebasa" varias veces y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada rebase. Provocando grandes vibraciones y la pérdida de sincronismo entre los dos campos.

Entre mayor sea la corriente de campo en un motor mayor será el

E_A y el par máximo del motor será más grande, existiendo una gran ventaja en la estabilidad cuando se opera con una gran corriente de campo.

Efecto de los cambios de carga en los motores síncronos

Cuando un motor síncrono opera con carga al eje éste desarrolla suficiente par como para mantener el motor y su carga a velocidad síncrona. Si se incrementa la carga en el eje del motor, el rotor comenzará a perder velocidad. Conforme pierde velocidad, el ángulo del par δ se hace más grande y se incrementa el par inducido. Este incremento en el par inducido a la larga acelera de nuevo el rotor y el motor vuelve a girar a velocidad síncrona, pero con un ángulo de par δ más grande.

Efecto de cambios de la corriente de campo en los motores síncronos

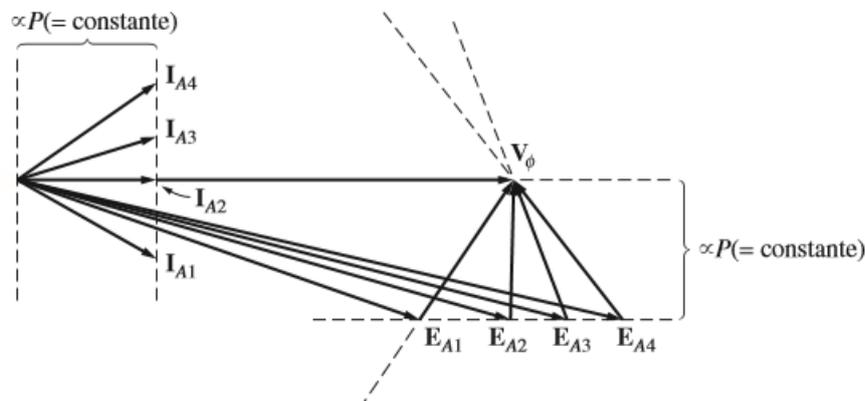


Figura 15. Efecto del incremento de la corriente de campo en la operación de un motor síncrono [1].

Como se puede apreciar en la figura 15 conforme se incrementa el valor de E_A , la magnitud de la corriente en el inducido I_A primero disminuye y luego se incrementa. Con un E_A bajo, la corriente en el inducido está en retraso y el motor es una carga inductiva. Actúa como una combinación de inductor y resistor y consume potencia reactiva Q . A medida que se incrementa la corriente de campo, la corriente en el inducido a la larga se alinea con V_{ϕ} y el motor parece puramente resistivo. Si se incrementa la corriente de campo aún más, la corriente en el inducido está en adelanto y el motor se convierte en una carga capacitiva. Ahora actúa como una combinación de capacitor y resistor, consume potencia reactiva negativa $-Q$ o, alternativamente, suministra potencia reactiva Q al sistema.

En la figura 16 se muestra una gráfica de I_A versus I_F de un motor síncrono. Esta gráfica se llama curva en V del motor síncrono, por la obvia razón de que tiene la forma de esa letra. Hay muchas

curvas en V que corresponden a diferentes niveles de potencia real. En cada curva, la corriente mínima del inducido se presenta con un factor de potencia unitario cuando sólo se suministra al motor potencia real. En cualquier otro punto de la curva se suministra alguna cantidad de potencia reactiva, ya sea al motor o desde el motor.

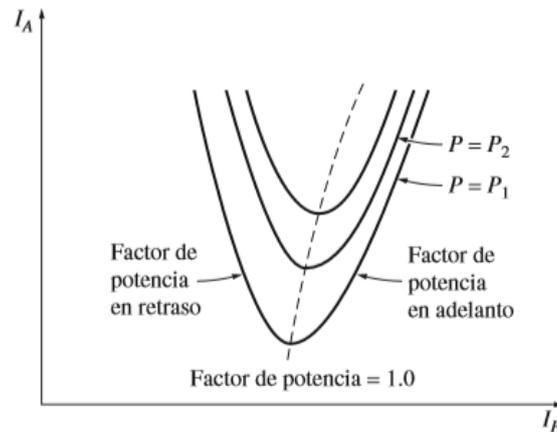


Figura 16. Curva v de un motor síncrono [1]

En general para que un motor síncrono opere como una carga inductiva este se debe subexcitar y para que opere como una carga capacitiva se debe sobreexcitar.

Arranque de los motores síncronos

Debido a que en el arranque de un motor síncrono el rotor está estático y con el campo magnético, cuando el campo magnético del estator comienza a rotar a velocidad síncrona a una alta velocidad por lo que el campo estacionario del rotor no se alcanza entrelazar con este provocando grandes vibraciones en el motor y con ello el calentamiento del mismo debido a ello se deben emplear técnicas especiales para el arranque de los motores síncrono estas técnicas son tres:

1. Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante un semiciclo de la rotación del campo magnético. Este objetivo se puede lograr con la reducción de la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada. Para llevar a cabo esta técnica hoy en día es muy fácil por medio de los controladores de estado sólido para motores a fin de convertir una frecuencia de entrada constante en cualquier frecuencia de salida deseada.
2. Utilizar un motor primario externo para acelerar el motor síncrono hasta velocidad síncrona, pasar por el procedimiento de entrada en sincronía y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagar o desconectar el motor principal para convertir la máquina síncrona en un motor.
3. Utilizar devanados de amortiguamiento. [1]

1.4. Aplicación de las máquinas síncronas como alternadores de automóviles.

El alternador al igual que la antigua dinamo, es un generador de corriente eléctrica que transforma la energía mecánica que recibe en su eje en energía eléctrica, que sirve además de cargar la batería, para proporcionar corriente eléctrica a los distintos elementos eléctricos y electrónicos del vehículo como son el: el sistema de alimentación de combustible, el sistema de encendido, las luces, los limpias etc. El alternador sustituyó a la dinamo debido a que esta presentaba limitaciones que se vieron agravadas a medida que se han instalado más accesorios eléctricos en el automóvil.

Los alternadores son máquinas síncronas trifásicas que en principio generan corriente alterna, que luego es convertida en corriente continua mediante un rectificador trifásico o puente de diodos incorporado en el alternador. Además, el alternador debe ir acompañado de un regulador de tensión que se encarga de estabilizar la tensión generada en un valor fijo que será de 14V, para turismos y 28V. para vehículos industriales.

Forma constructiva de los alternadores

El alternador debido a su forma constructiva en el que las bobinas inducidas permanecen estáticas formando parte del estator, siendo el campo inductor el que se mueve con el rotor, alimentado con corriente continua procedente del mismo generador a través de dos anillos rozantes situados en el eje de rotor. Esta disposición de los elementos del alternador proporciona grandes ventajas tal como poder girar a grandes revoluciones sin deterioro de sus partes móviles, además de entregar un tercio de su potencia nominal con el motor girando en ralentí. y proporcionando su potencia nominal a un régimen de motor reducido.

El rendimiento del alternador aumenta con la velocidad de giro del motor; por eso debe procurarse que la relación de desmultiplicación entre el cigüeñal del motor y el alternador sea lo más alta posible. En el sector de turismos, los valores típicos están entre 1:2 y 1:3 (por cada vuelta del cigüeñal, da dos vueltas del alternador); en el sector de vehículos industriales llegan hasta 1:5.

Alternadores de polos intercalados con anillos colectores

A esta clasificación pertenecen la mayoría de los alternadores de automóviles menos el monobloc N3 y el Estándar U2. La construcción de estos alternadores (polos intercalados con anillos rozantes) hacen del mismo un conjunto compacto con características de potencias favorables y reducido peso. La relación longitud/diámetro permite conseguir máxima potencia con escasa demanda de material. De ello se deriva la forma achatada típica de este alternador, de gran diámetro y poca longitud. Esta forma permite además una buena disipación de calor. La denominación de "alternador de polos intercalados" proviene de la forma de los polos magnéticos. El árbol del rotor lleva las dos mitades de rueda polar con polaridad opuesta. Cada mitad va provista de polos en forma de garras engarzados entre si formando alternativamente los polos norte y sur. De ese modo recubren el devanado de excitación, en forma de bobina anular, dispuesto sobre el núcleo polar. El número de polos realizable tiene un límite. Un número de polos pequeño determinaría un rendimiento insuficiente de la máquina, mientras que un número demasiado grande haría aumentar excesivamente las pérdidas magnéticas por fugas, Por esta razón, estos alternadores se construyen, según el margen de potencia, con 8,12,14 o16 polos.

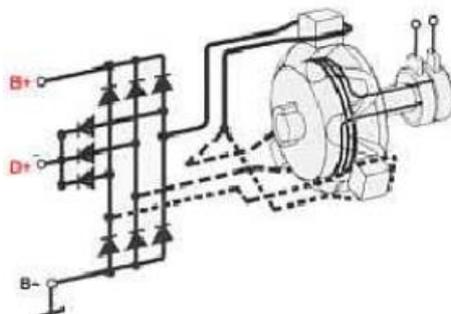


Figura 17. Alternador de polos intercalados con anillos rozantes [7]

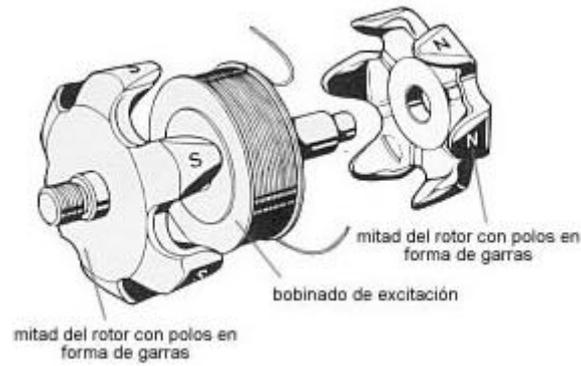


Figura 18. Rotor de 12 polos intercalados. [7]

Descripción y características de sus componentes:

El alternador utilizado en automóviles está constituido por los siguientes elementos:

- Un conjunto inductor que forman el rotor o parte móvil del alternador.
- Un conjunto inducido que forman el estator o parte fija del alternador.
- El puente rectificador de diodos.
- Carcasas, ventilador y demás elementos complementarios de la máquina.

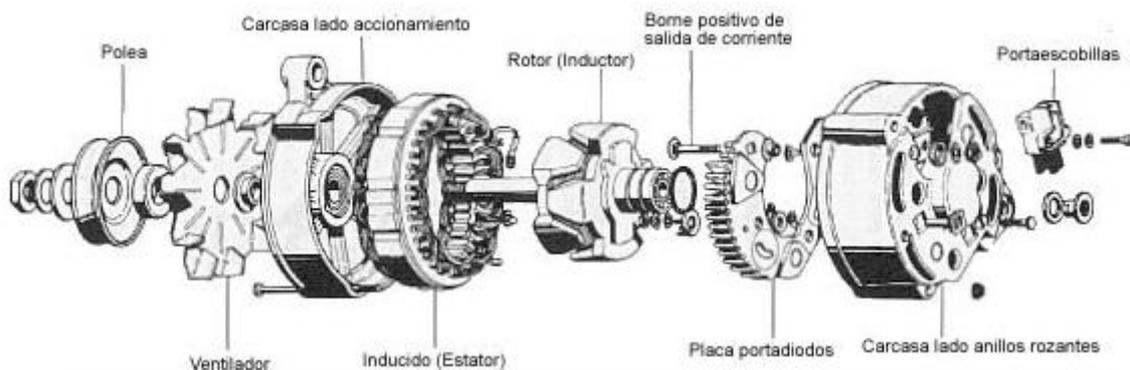


Figura 19. Despiece de un alternador. [7]

Reguladores de tensión en alternadores de automóviles

La función del regulador de tensión es mantener constante la tensión del alternador, y con ella la del sistema eléctrico del vehículo, en todo el margen de revoluciones del motor de este e independientemente de la carga y de la velocidad de giro. La tensión del alternador depende en gran medida de la velocidad de giro y de la carga a que este sometido. A pesar de estas condiciones de servicio, continuamente variables, es necesario asegurar que la tensión se regula al valor predeterminado. Esta limitación protege los sistemas eléctricos de sobretensiones e impide que se sobrecargue la batería.

La tensión generada en el alternador es tanto más alta cuanto mayores son su velocidad de giro y la corriente de excitación. En un alternador con excitación total, pero sin carga y sin batería, la tensión no regulada aumenta linealmente con la velocidad y alcanza, p. ejemplo a 10.000 r.p.m., un valor de 140 V aproximadamente. El regulador de tensión regula el valor de la corriente de excitación, y con ello, la magnitud del campo magnético del rotor, en función de la tensión

generada en el alternador. De esta forma se mantiene constante la tensión en bornes del alternador, con velocidad de giro y cargas variables, hasta el máximo valor de corriente. Los sistemas eléctricos de los automóviles con 12 V. de tensión de batería se regulan dentro de un margen de tolerancia de 14 V. y los de los vehículos industriales con 24 V. de tensión de batería se regulan a 28 V. Siempre que la tensión generada por el alternador se mantenga inferior a la de regulación el regulador de tensión no desconecta. Si la tensión sobrepasa el valor teórico superior prescrito, dentro del marco de la tolerancia de regulación, el regulador interrumpe la corriente de excitación. La excitación disminuye, es decir, desciende la tensión que suministra el alternador. Si a consecuencia de ello dicha tensión llega a ser menor que el valor teórico inferior, el regulador conecta de nuevo la corriente de excitación. La excitación aumenta y con ella la tensión del alternador. Cuando la tensión sobrepasa otra vez el valor límite superior, comienza nuevamente el ciclo de regulación. Como los ciclos de regulación son del orden de milisegundos, se regula el valor medio de la tensión del alternador en correspondencia con la curva característica preestablecida. La relación de los tiempos de conexión y desconexión de la corriente de excitación a través del regulador, determinan la corriente excitación media. A bajo régimen, el tiempo de conexión es alto y el de desconexión bajo, a altas revoluciones del motor sucede lo contrario tiempo de conexión bajo y de desconexión alto. [7]

1.5. SISTEMA DE EXCITACIÓN DE LAS MAQUINAS SINCRONAS

Los polos de una maquina síncrona se alimenta con corriente continua, esta corriente proviene del sistema de excitación de la máquina, en la actualidad existen una gran diversidad de sistemas de excitación que varían en diferentes aspectos entre ellos la forma como se hace la conexión de esta con el circuito de campo. Pero al final de todo, la función de estas se reduce siempre a lo mismo. La función básica de un sistema de excitación es la de proveer la corriente directa al campo de las maquinas síncrona para alcanzar su sincronización. Además, el sistema de excitación controla y protege las funciones esenciales para el cumplimiento satisfactorio del funcionamiento del sistema de potencia, para esto controla el voltaje y la corriente de campo. [3]

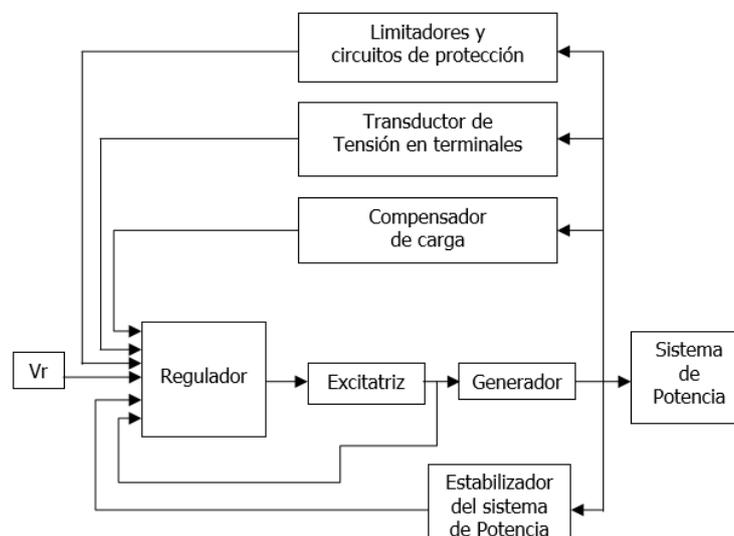


Figura 20. Diagrama de bloques de un sistema de excitación [4]

Excitatriz: Este elemento es el encargado de proveer la potencia de corriente continua al arrollamiento de campo de la maquina síncrona, constituyendo así la etapa de potencia de un sistema de excitación.

Regulador: Procesa y amplifica la señal de control de entrada a un nivel y forma adecuado para el control de la excitatriz. Este incluye función de regulación y estabilizador.

Transductor de tensión en bornes: Censa la tensión en los bornes de la máquina, la rectifica y la filtra para obtener un valor de corriente continua que luego se compara con una referencia la cual representa la tensión deseada en los bornes de la máquina.

Estabilizador del sistema de potencia: provee una señal adicional de entrada al regulador para amortiguar las oscilaciones del sistema de potencia. Tiene como entrada el deslizamiento de velocidad del motor, la potencia acelerante y la desviación de la frecuencia.

Circuitos limitadores y de protección: Asegura que los límites de capacidad de la máquina síncrona no sea excedidos. Entre ellos los límites de la corriente de campo, de la tensión de excitación, de tensión en terminales de subexcitación y sobreexcitación. [4]

Clasificación de los sistemas de excitación

Excitación Estática (excitación directa)

- Sistema autoexcitado
- Excitación independiente

Excitación Rotativa (excitación indirecta)

- Excitatriz CA diodos rotativos
- Excitatriz CC
- Autoexcitada o excitación independiente.
- Chopper o rectificador de alterna (tiristores) [5]

La magnitud de la potencia que se emplea para la alimentación del campo de una máquina síncrona se encuentra comprendida entre 0.35% y 1.5% de la potencia nominal del generador, respectivamente desde las potencias grandes hacia las pequeñas. En generadores de la misma potencia nominal, la potencia de excitación requerida aumenta al aumentar el número de polos. [6]

1.6. Excitatriz o fuente de alimentación de cd

Las fuentes de alimentación de cd son circuitos que convierte una tensión alterna en una tensión prácticamente continua. Existen dos tipos de fuentes diferentes de cd las lineales y las conmutadas. Siendo una de sus diferencias el tipo de regulador utilizado por las mismas el regulador lineal que hace alusión al nombre de la fuente es una solución simple y de bajo costo, pero que provoca una cantidad significativa de pérdidas de potencia por lo que la eficiencia global de estas fuentes está en el rango de 30% - 60%, mientras que los reguladores conmutados permite que las mismas presenten las siguientes ventajas:

Tamaño y peso reducido. La operación a frecuencias elevadas permite la reducción del tamaño de los elementos inductivos, transformadores e inductancias. Mayor frecuencia del ripple de salida, facilitando las tareas de filtrado y reduciendo el tamaño de los elementos requeridos. Alta eficiencia. El elemento activo de conmutación (transistor o MOSFET), opera entre corte y saturación, reduciendo su disipación de potencia. Rendimientos típicos del 80 al 90% pueden ser fácilmente obtenidos (en oposición al 30 a 60% ofrecido por las fuentes reguladas linealmente). Adicionalmente las fuentes conmutadas alcanzan su máximo rendimiento a plena carga, en contraposición de las fuentes convencionales donde su mayor rendimiento se obtiene en vacío. Bajo costo. Debido a su reducido volumen y disipación, los elementos activos, pasivos y de disipación son más pequeños, con el consecuente ahorro en el gabinete, montaje y ventilación. Amplio rango de tensión de entrada. Mediante la variación del ciclo de trabajo, estas variaciones pueden ser fácilmente compensadas.

Como desventajas pueden considerarse su mayor complejidad de diseño, emisión de señales de interferencia de radiofrecuencia y menor velocidad de respuesta ante bruscas variaciones de carga. [8] [8]

A grandes rasgos las fuentes de alimentación reguladas o estabilizadas consta de tres bloques:

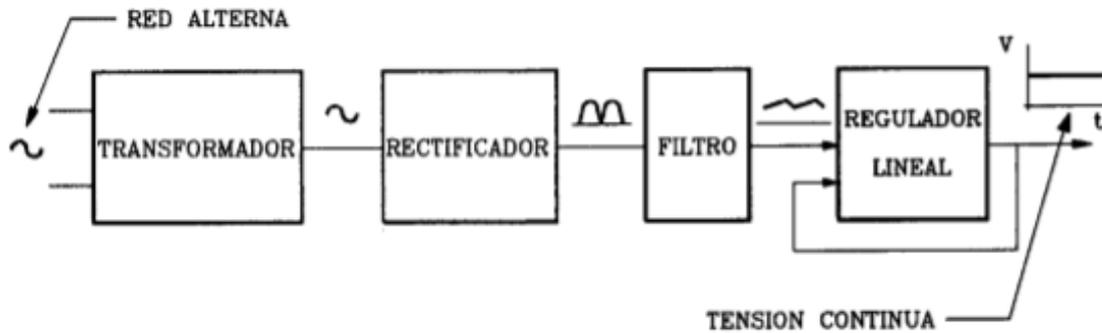


Figura 21. Diagrama de bloques de una fuente de dc con regulador

Bloque de Rectificación: está conformado por un transformador y uno o más diodos los cuales nos permiten que a partir de una señal de ac se obtener una de baja tensión de dc

- Transformador: Aumenta o reduce la tensión de ac de forma adecuada según nuestras necesidades.
- Rectificador: Obtiene de la tensión alterna del secundario del transformador una tensión unidireccional, variable en amplitud, pero no en sentido.

Bloque de filtrado: Tiene como función suavizar la onda de tensión que sale del bloque de rectificación. Consigue una reducción importante de la variación en amplitud de la tensión rectificada. Desde el punto de vista matemático el filtro disminuye la amplitud los armónicos de la onda rectificada.

Bloque estabilizador o de regulación: la función de un regulador de voltaje es convertir un voltaje de cd de entrada en un voltaje de cd a la salida estable y específico, manteniéndolo constante sin importar las condiciones de carga y de voltaje de dc de entrada, los reguladores de voltaje de cd están formados principalmente por: elemento de referencia, elemento de muestreo, amplificador de error y elemento de control.

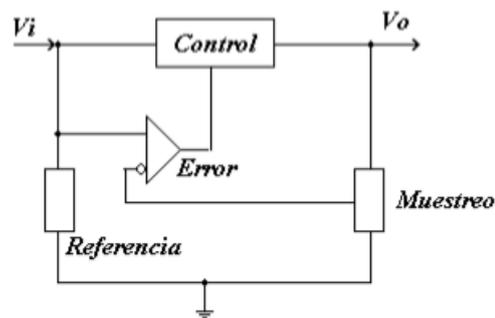


Figura 22. Elementos de un regulador de voltaje. [8]

Regulador lineal: En un regulador lineal el circuito consta de pocos elementos como son un transistor y un amplificador de error, debido a que no se emplean inductores para transferir energía se facilita la integración y disminuye el costo significativamente. El funcionamiento del regulador lineal es muy sencillo el amplificador de error compara el voltaje de salida con un voltaje de referencia y modula el valor de la resistencia (transistor) para ajustar el voltaje de salida.

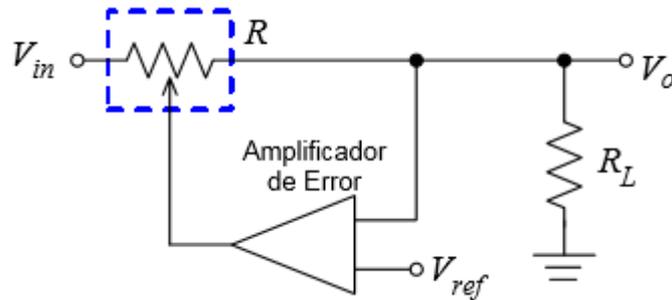


Figura 23. Regulador lineal. [8]

Reguladores conmutados

En este tipo de reguladores su elemento de control trabaja en estado prendido o apagado y con esto trocea el voltaje de entrada, por lo que el voltaje a la salida del elemento de control no es constante, sino que está formado por pulsos de voltaje de magnitud V_m y una duración ton por lo que el voltaje que se aplica a la carga es igual al voltaje promedio durante un período T .

$$V_o = \frac{V_m ton + 0 toff}{T} \quad (16)$$

$$V_o = V_m \frac{ton}{T} \quad (17)$$

De la ecuación anterior podemos decir que si V_m y T permanecen constantes el voltaje a la salida es proporcional al tiempo ton , por lo que si varía la duración de ton el voltaje promedio varía proporcionalmente.

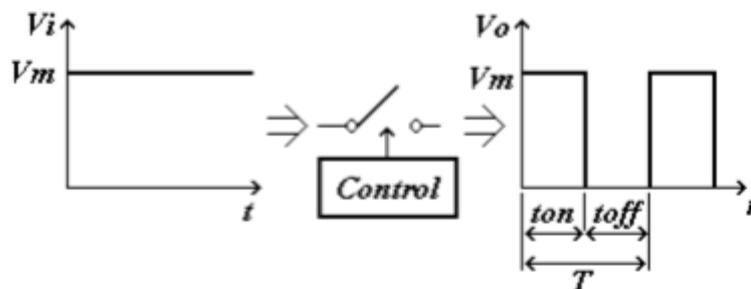


Figura 24. Voltaje de salida y de entrada en un regulador conmutado [8]

A la variación de duración de un pulso se conoce como modulación por ancho de pulso (PWM), el cual nos permite manipular el elemento de control en un regulador conmutado, por lo general la frecuencia de operación está entre los 25 y 100kHz. [8]

Arquitecturas o topologías de los reguladores conmutados.

Existen tres tipos principales de topologías para los reguladores conmutados:

- Configuración reductora buck
- Configuración elevadora boost
- Configuración buck boost

Configuración reductora buck: en esta configuración el voltaje a la salida será menor que al de la entrada existen dos variantes para esta configuración el buck reductor asíncrono y el buck reductor síncrono.

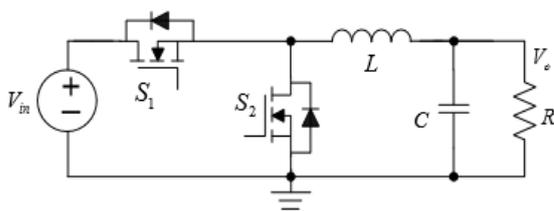


Figura 25. Regulador buck síncrono. [9]

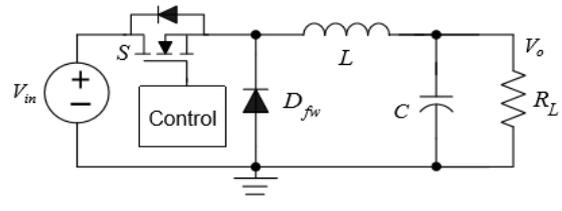
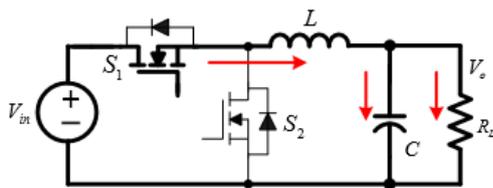


Figura 26. Regulador buck asíncrono. [9]

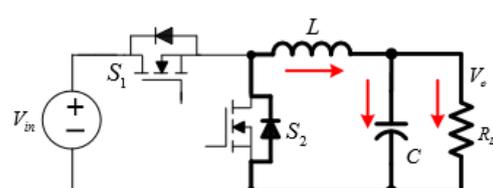
Una de las variantes del regulador buck es el regulador buck síncrono el cual utiliza un interruptor controlado para sustituir al diodo de libre circulación con esto se mejora la eficiencia sobre todo en aplicaciones de voltaje bajo.

Principio de operación del regulador síncrono.

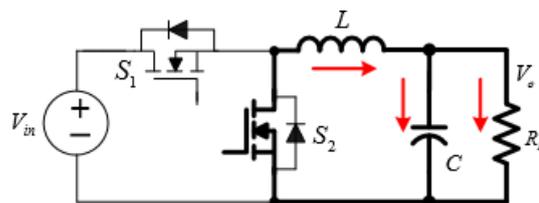
El regulador buck síncrono presenta tres circuitos equivalentes en su operación como se muestran a continuación.



a) Circuito equivalente durante ton



b) Circuito equivalente durante tDead



c) Circuito equivalente durante toff

Figura 27. Modo de operación del regulador buck síncrono. [9]

Durante el tiempo t_{on} se enciende el mosfet s1 y s2 se mantiene apagado en este tiempo se carga el inductor L y existe una transferencia de energía de la entrada hacia RL.

En el tiempo t_{dead} se apaga el mosfet s1 y el diodo parasito del mosfet s2 se enciende debido al flujo de la corriente I_L en este intervalo el inductor suministra la energía necesaria para RL.

En el intervalo t_{off} se enciende s2 como la caída de voltaje a través del mosfet es menor que el voltaje de conducción del diodo parasito este se apaga y la corriente I_L circula por el canal del mosfet.

En la figura 28 se muestran las formas de ondas idealizadas del convertidor buck síncrono en modo de conducción continuo.

Se define el ciclo de trabajo como la relación:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} \quad (18)$$

A partir de un análisis de Fourier se establece que el valor medio del voltaje V_o de salida es:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_m(t) d(t) = \frac{1}{T} (D * T * V_m) = D * V_m \quad \mathbf{V_o = D * V_m} \quad (19)$$

La forma de onda de la corriente por la bobina está formada por una componente en continua (I_L) más una de rizado pico a pico (ΔI_L) que depende de la construcción del inductor. Entre los valores típicos de rizado para convertidores de cd a cd tenemos 10 y 20 % de la componente de continua en plena carga.

$$\Delta I_L = 0.01 * I_L \quad (20) \quad \bullet \quad \Delta I_L = 0.02 * I_L \quad (21)$$

La corriente entregada a la carga es dada por la ecuación (22). [9]

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (22)$$

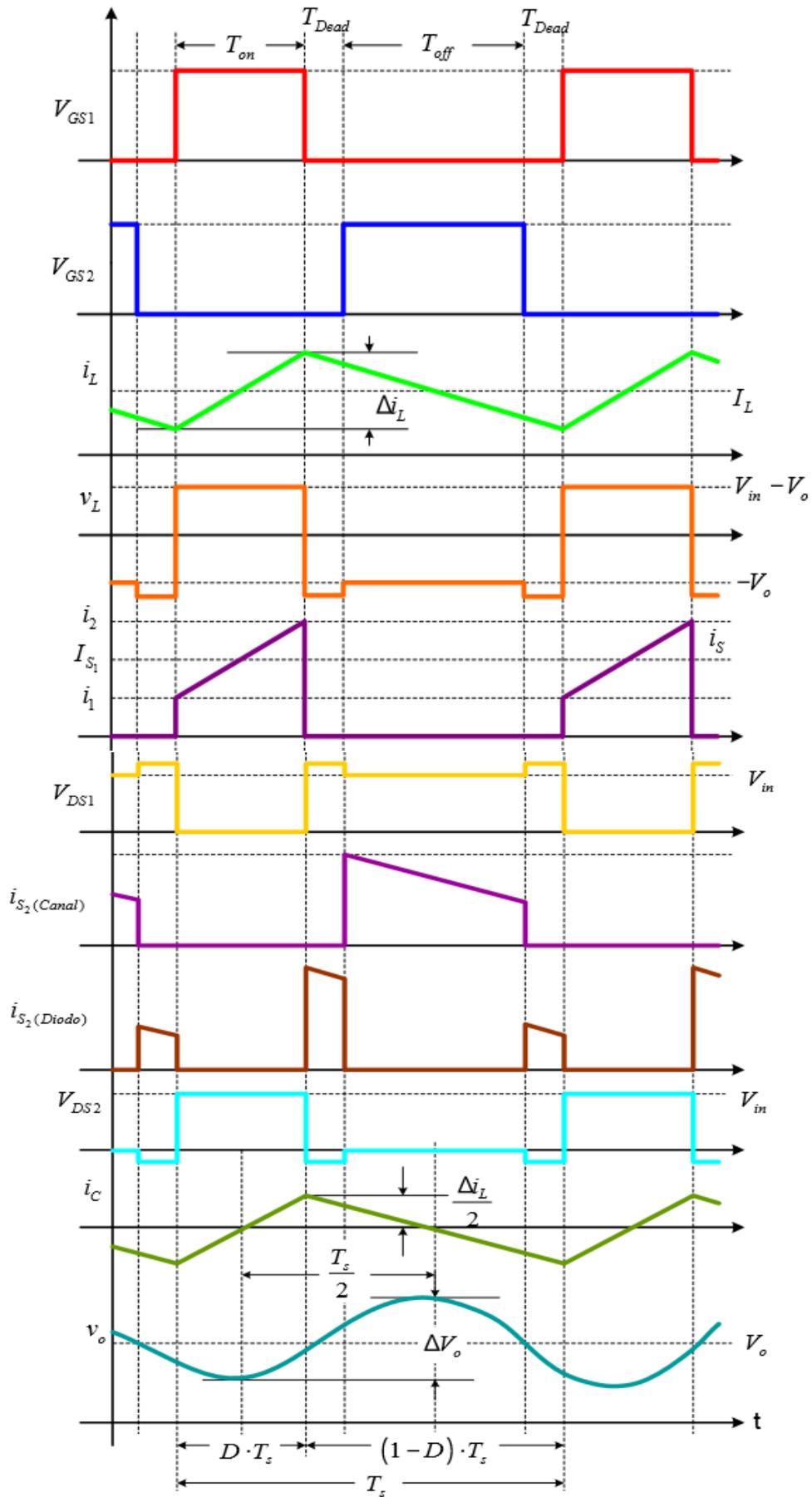


Figura 28 Formas de ondas del convertidor buck síncrono. [9]

Mosfet de los reguladores conmutados

El mosfet es un dispositivo electrónico de tres terminales el drenador (D, drain), la puerta (G, gate) y el surtidor o fuente (S, source). La corriente en el mosfet va desde la fuente al drenador y es controlado con la compuerta, el control de puerta se establece por medio de tensión. Este es un dispositivo de alta velocidad debido a su alta capacidad de conmutación de trabajo.

A la hora de diseñar se cuenta con la hoja técnica de estos dispositivos que contiene los datos o características necesarias de los mismos para diseñar. Algunos de estos datos son:

- Tensión de umbral (V_{GSth}): Tensión mínima entre puerta y surtidor para ponerlo en conducción.
- Tensión máxima: Se produce una ruptura de unión a nivel electrónico si se aplica una tensión superior entre el drenador y el surtidor.
- Máxima corriente en el drenador (I_{Dmax}): corriente máxima que puede circular por el mosfet.
- Resistencia en conducción (R_{DSon}): Resistencia equivalente cuando el mosfet está en conducción entre drenador y surtidor.
- Velocidad de conmutación: Los parámetros para el cálculo del tiempo que tarda el mosfet en conmutar se toman de la gráfica x que también viene incluida en la hoja técnica del mismo.
 - Tiempo de retraso de encendido (t_{don}).
 - Tiempo de subida (t_r)
 - Tiempo de retraso de apagado (t_{doff})
 - Tiempo de bajada (t_f)

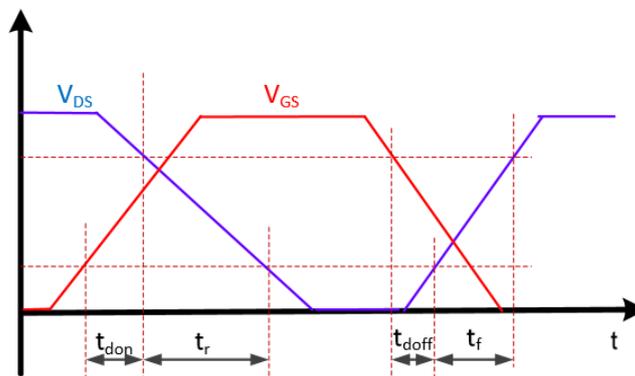


Figura 29. Tiempos de conmutación de un mosfet. [10]

Los mosfet no son interruptores ideales por lo que en realidad presentan pequeñas pérdidas que se clasifican en dos grupos pérdidas por conducción y pérdidas por conmutación. La suma de estas dos genera la potencia disipada por el mosfet.

Perdidas por conducción (P_c)

Las pérdidas por conducción de un mosfet se analizan o se calculan cuando el dispositivo está en conducción en este estado el dispositivo se comporta como una resistencia entre drenador y surtidor (R_{DSon}). Donde V_{DS} e I_D son la tensión y la corriente en la misma.

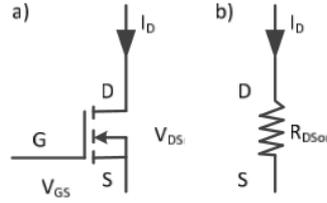


Figura 30. a) Esquema eléctrico del mosfet b) modelo equivalente del mosfet en conducción [10]

El valor instantáneo de la potencia en conducción se calcula como:

$$Pc(t) = R_{DSon} i_D^2(t) = v_{DS}(t) * i_D(t) \quad (23)$$

Para obtener el valor medio de la potencia generada por conducción en el mosfet integramos la ecuación anterior con respecto al ciclo de trabajo para obtener la siguiente ecuación:

$$Pc = \frac{1}{T} \int_0^T Pc(t) dt \quad Pc = R_{DSon} I_{Drms}^2 \quad (24)$$

La corriente eficaz (I_{Drms}) que circula por el mosfet s1 en estado de conducción se calcula como:

$$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_D^2(t) dt} \quad I_{Drms} = \sqrt{(D) * (I_{Lmin}^2 + (I_{Lmin} * \Delta_{IL}) + \frac{\Delta_{L}^2}{3})} \quad (25)$$

La corriente eficaz (I_{Drms}) que circula por mosfet s2 en estado de conducción se calcula como:

$$I_{Drms} = \sqrt{(1 - D - (T_{deadon} * T_{deoff}) * f) * (I_o^2 + \frac{\Delta_{L}^2}{12})} \quad (26)$$

La tensión máxima que deben soportar los mosfet s1 y s2 se da durante el tiempo de apagado y es igual a la tensión de entrada V_m .

$$V_{Dsoff} = V_m \quad (27)$$

Las pérdidas por conmutación vienen expresadas por:

$$P_{SW} = (\frac{1}{2} * V_m * I_o * (t_d + t_f)) f \quad (28)$$

$$P_{SW} = (\frac{1}{2} * V_m * I_o * (t_{don} + t_r + t_{doff} + t_f))$$

Inductancia en las fuentes conmutadas

Siguiendo las formas de onda presentadas en la figura 28 se puede determinar el valor mínimo de la inductancia para un valor de rizado determinado mediante la ecuación 29.

$$L = \frac{V_m - V_o}{\Delta_{IL}} * DT \quad (29)$$

La inductancia presenta dos tipos de pérdidas por efecto joule y debidas al flujo magnético.

Perdidas por efecto joule: Las pérdidas por efecto joule se presentan debido a la resistencia interna del inductor. Para determinar estas pérdidas es necesario conocer la corriente eficaz en el inductor que es igual a la suma cuadrática de las corrientes eficaces en los dos mosfets.

$$I_{Lrms} = \sqrt{I_{T1rms}^2 + I_{T2rms}^2} \quad (30)$$

$$P_J = R_L * I_{Lrms}^2 \quad (31)$$

Perdidas debidas al flujo magnético: Para el cálculo de estas pérdidas a menudo se asume que el inductor trabaja a unos 200mT de densidad de flujo magnético, de tal manera que consultando las especificaciones del material magnético y en función de la frecuencia de conmutación, el fabricante proporciona la cantidad de pérdidas por unidad de volumen del núcleo.

El condensador de salida de las fuentes conmutadas

Para obtener un rizado en la tensión de salida lo suficientemente bueno se debe colocar un filtro a la salida del convertidor que es un capacitor. El condensador mantiene la tensión y disminuye el rizado en la tensión de salida.

A la hora de calcular el condensador el parámetro a tener en cuenta por el diseñador es el porcentaje máximo de rizado admitido de tensión (ΔV_o) entre más pequeño mejor será la tensión de salida del convertidor.

$$C = \frac{(1-D)}{8 * L * f^2 * \Delta V_o} \quad (32)$$

La tensión que debe soportar el condensador debe ser superior a la tensión de salida del convertidor.

$$V_c > V_o \quad (33)$$

Eficiencia del convertidor: La eficiencia del convertidor nos indica el rendimiento del mismo una vez diseñado un convertidor se puede calcular su rendimiento mediante la siguiente ecuación, conociendo las pérdidas en cada uno de sus componentes.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% = \frac{P_{in} - P_{perd}}{P_{in}} * 100\% = \frac{P_{in} - P_{mosft} - P_L}{P_{in}} * 100\% \quad (34)$$

1.6.1. Control de las fuentes conmutadas

Las fuentes de alimentación deben satisfacer los siguientes requerimientos:

Buena regulación de línea, regulación de carga y respuesta frente a bruscas variaciones de carga o de la tensión de entrada, ser estable en todo su rango de operación

Un adecuado diseño del circuito de realimentación permite satisfacer estas condiciones al regular la tensión de salida mediante la variación del ciclo de trabajo.

En la mayoría de las fuentes conmutadas el control de la tensión de salida se realiza utilizando técnicas de PWM. La tensión de salida V_o se compara en un amplificador de error con una tensión de referencia V_{ref} , generando una señal de error V_c . La señal final de control se genera

modulando el ancho de pulso de excitación mediante la comparación del nivel de error V_c con una tensión diente de sierra de amplitud y frecuencia fija V_s .

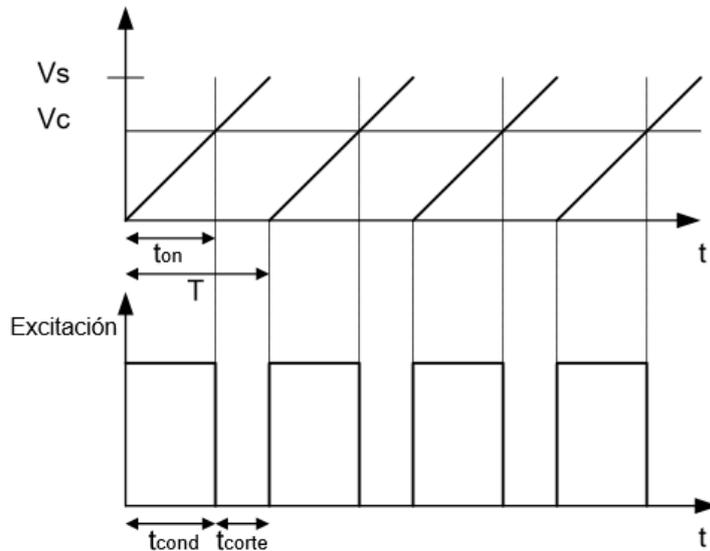


figura 31. Señal de control generada por modulación de ancho de pulso.

Si el nivel de comparación V_c se eleva, debido por ejemplo a una reducción de la tensión de salida, el ciclo de trabajo se incrementa en función de la ecuación 35.

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} = \frac{V_c}{V_s} \quad (35)$$

A este tipo de método de control se le conoce también como control de tensión. En este tipo de control la muestra de tensión se toma directamente de la salida del circuito. Esta muestra es comparada de manera analógica con una señal de referencia cuyo valor se diseña dependiendo de la magnitud de la tensión de salida deseada. De esta comparación se obtiene una señal de error, la cual normalmente pasa por una etapa de amplificación con el fin de dar a la señal una mayor capacidad de operación. De esta manera la señal de control del circuito está dada por la ecuación 36.

$$V_{CONT} = k(V_o - V_{REF}) \quad (36)$$

donde V_o corresponde con la muestra de tensión de salida tomada del circuito, el símbolo V_{REF} representa el valor de la tensión de referencia y k corresponde con la ganancia o nivel de amplificación de la señal de error.

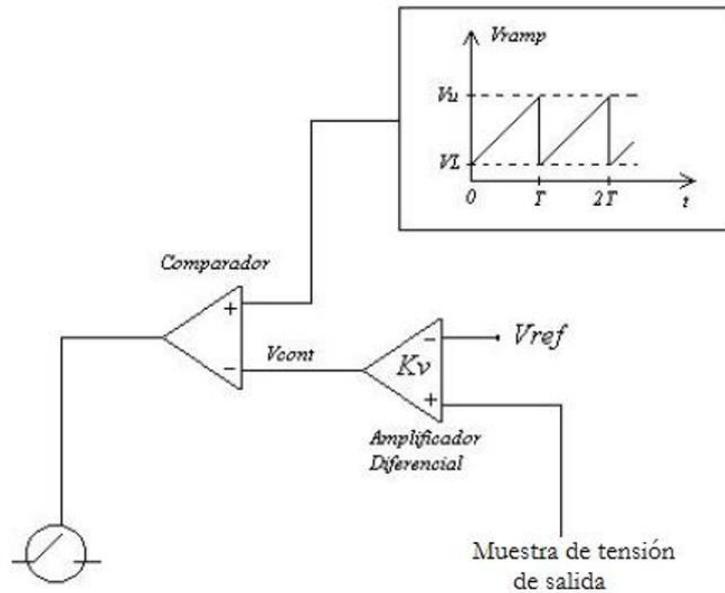


figura 32. Diagrama de bloques del control PWM

Tal como se aprecia en la figura 32 la comparación entre la señal de control (V_{cont}) con la señal del oscilador genera la señal de conmutación que debido a su magnitud actúa sobre el elemento conmutador obligando al convertidor a variar su ciclo de trabajo. La regulación de tensión de salida obtenida no es inmediata y depende de la magnitud de la variación de la señal, de manera que existe la posibilidad de que el circuito necesite más de un ciclo de conmutación para devolver el valor de la señal de salida al valor deseado.

CAPÍTULO II

2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA Y LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS PARA EL GRUPO MOTOR GENERADOR.

2.1. Maquinas del grupo motor generador.

Las maquinas seleccionadas para el presente proyecto son 2 alternadores de automóvil de las marcas Delco Remy y Prestolite, del cual uno trabajara en régimen motor y el otro como generador. Aunque estas máquinas están en perfectas condiciones de funcionamiento se requieren hacer algunas modificaciones para que sean funcionales para el proyecto. Como ya se mencionó en el capítulo I estos alternadores tienen incorporados un puente rectificador el cual debe ser retirado para así tener acceso a las fases del alternador las cuales deben ir a borneras de fácil conexión, así como las terminales del circuito de campo.

Valores nominales conocidos de los alternadores.

- Alternador Prestolite

$$V_{cd} = 12 \text{ V}$$

$$I_{cd} = 45$$

$$P = 540 \text{ W}$$

$$V_{EXC} = 12 \text{ V}$$

Debido a que no se tienen los valores nominales en ca del alternador se calculan de la siguiente manera:

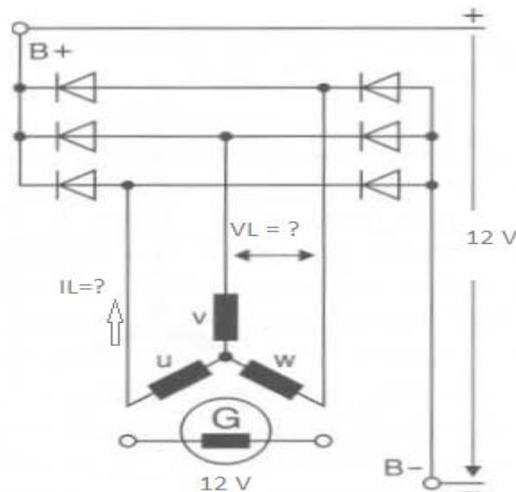


Figura 33. Esquema de conexión interna del alternador con valores nominales de cd. [3]

Como se conoce el valor de voltaje cd de salida del puente rectificador, de la siguiente fórmula se puede despejar el voltaje de fase pico y calcular con el mismo el voltaje de línea a la entrada del rectificador.

$$V = \frac{2}{\frac{2\pi}{6}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} V_m \cos wt d(wt) \qquad V = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \qquad V = 1.654 V_m$$

Donde V_m es el voltaje de fase pico y V_L el voltaje de línea del alternador.

Si $V = 12V$ entonces $V_m = \frac{V}{1.654}$ $V_m = \frac{12V}{1.654}$ **$V_m = 7.255V$**

$V_L = \sqrt{3} V_m$ $V_L = \sqrt{3} * 7.255V$ **$V_L = 12.566V$**

$IL = \frac{45A}{3}$ **$IL = 15 A$**

- **Alternador Delco Remy**

$V_{cd} = 12 V$ $I_{cd} = 37 A$ $P = 444 W$ $V_{EXC} = 12 V$

$V = \frac{2}{\frac{2\pi}{6}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} V_m \cos wt d(wt)$ $V = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$ $V = 1.654 V_m$

Donde V_m es el voltaje de fase pico

Si $V = 12V$ entonces $V_m = \frac{V}{1.654}$ $V_m = \frac{12V}{1.654}$ **$V_m = 7.255V$**

$V_L = \sqrt{3} V_m$ $V_L = \sqrt{3} * 7.255V$ **$V_L = 12.566V$**

$IL = \frac{37A}{3}$ **$IL = 12.33 A$**

En las figuras 32 y 33 se puede apreciar el número de polos de las dos máquinas por lo que es el último dato requerido para establecer la nueva placa característica de las máquinas.



Figura 34. Rotor de 7 polos intercalados maquina Delco Remy



Figura 35. Rotor de polos intercalados de 8 polos maquina Prestolite.

Valores nominales de la maquina Delco Remy

- $V_L = 12.5 \text{ V}$
- $I_L = 12.3 \text{ A}$
- $P = 14$
- $V_{exc} = 12\text{V}$
- $f = 60 \text{ Hz}$

Valores nominales de la maquina Prestolite

- $V_L = 12.5 \text{ V}$
- $I_L = 15 \text{ A}$
- $P = 8$
- $V_{exc} = 12\text{V}$
- $f = 60 \text{ Hz}$

2.1.1. Selección de la máquina que operara en régimen de motor y acoplamiento mecánico de este con el generador.

Como las maquinas no son del mismo número de polos se debe seleccionar la más adecuada para que trabaje en régimen de motor, así como la trabajara como generador esto con fin de obtener una frecuencia en la tensión de salida del generador de 60 Hz.

De la ecuación 1 se obtiene que para la máquina de 8 polo si trabaja en régimen de motor a una frecuencia de 60 Hz su velocidad mecánica de rotación es de:

$$n_m = 900rpm$$

Si esta se acopla mecánicamente a la otra máquina de 14 polos la cual trabajaría como generador, con una relación de poleas 1 a 1 por medio de la ecuación 2 se obtendría una frecuencia en la tensión de salida del generador de:

$$f_e = 105\text{Hz}$$

Ahora si se invirtiera el régimen de funcionamiento de las maquinas se obtiene:

$$n_m = 514\text{rpm}$$

$$f_e = 34\text{Hz}$$

Debido a los resultados obtenidos se selecciona la máquina de 8 polos para que opere en régimen motor ya que para obtener una frecuencia de 60 Hz en el generador se requiere disminuir el diámetro de su polea o aumentar el del generador y con ello disminuye el par requerido para mover la carga, esto con fin de disminuir la velocidad del eje del generador y con ello la frecuencia eléctrica a su salida. Además, que la potencia de esta máquina es mayor que la de 14 polos.

Calculo de la relación de las poleas de las máquinas.

Para que la frecuencia a la salida del generador sea de 60 Hz se requiere una velocidad en su rotor de 514.28 rpm y como las rpm del motor son 900, entonces:

$$relacion = \frac{900}{514.28} = 1.75$$

2.2. Estructura de soporte para el acoplamiento mecánico de las maquinas

La estructura para el montaje de las maquinas se implementará para realizar el acople mecánico entre las maquinas por medio de una correa para poleas en v, ya que esta forma de acople es fácil de realizar, nos permite cambiar la relación de las poleas de las maquinas según nuestras necesidades y mitiga las vibraciones de la estructura en caso de no haber un buen alineamiento de las máquinas.

2.3. Excitricas o fuentes de cd de alimentación del circuito de campo.

Para el presente proyecto se trabajaron con dos máquinas síncronas de las cuales trabaja en régimen de motor y otra como generador en donde el motor es el encargado de dar movimiento al generador, como ya se mencionó anteriormente para que las maquinas síncronas puedan operar es necesario alimentar su circuito de campo magnético con corriente directa por medio de la excitatriz o fuentes de cd. A continuación, se presentará el diseño e implementación de las mismas. El diseño para cada una de estas es el mismo ya que ambas maquinas tienen el mismo valor nominal de voltaje de excitación. Se decide diseñar e implementar fuentes conmutadas para este trabajo por todos los beneficios que estas presentan frente a las fuentes lineales.

La topología básica de la fuente regulada conmutada que se va a diseñar está compuesta por una etapa de potencia, compuesta por un convertidor AC/DC y un convertidor conmutado (convertidor DC/DC), así como una etapa de control compuesta por una red de realimentación y su respectivo controlador.

Parámetros de diseño:

Vinac =127 VRMS alimentación de la red.

$V_o = (3 - 14)$ VDC voltaje variable y regulado de salida de la fuente.

$P_o = 60W$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad I_o = 4 A$$

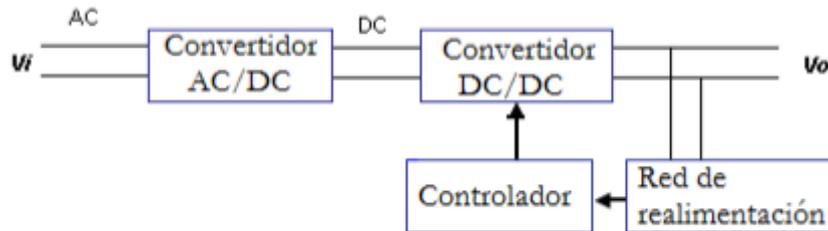


Figura 36. Topología de una fuente conmutada [10]

2.3.1. Diseño de la etapa del convertidor de CA – CD

Para el diseño de esta etapa se debe tener en cuenta el tipo o topología del convertidor de cd a cd que se va a realizar. En este caso utilizaremos el buck reductor síncrono, como en esta topología el voltaje máximo que se puede obtener a la salida es el de la entrada, que es el mismo de salida de la primera etapa este debe ser de 15 V que será el máximo valor de tensión a la salida de la segunda etapa.

Parámetros de diseño para la etapa del convertidor CA a CD

La etapa del convertidor de ca a cd está formada por un transformador el cual reduce el voltaje de entrada de alimentación y aísla magnéticamente la fuente de la red, un puente rectificador de diodos que convierte la tensión de ca en cd, y un filtro con condensador a la entrada que disminuye el rizado del voltaje de salida.

$V_{inac} = 127$ VRMS alimentación de la red.

$V_{out} = 15$ VDC voltaje de salida sin regular

$P_{out} = 60$ W

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad I_{out} = \frac{60W}{15} \quad I_{out} = 4 A$$

$V_{rpp} = 1V$ voltaje de rizado pico pico de salidad.

Calculo del transformador

$$V_{cd} = V_{p2} - 1.4 \quad V_{p2} = V_{cd} + 1.4 \quad V_{p2} = 15 + 1.4 \quad \mathbf{V_{p2} = 16.4 V}$$

$$V_{rms2} = 0.707 * V_{p2} \quad V_{rms2} = 0.707 * 16.4V \quad \mathbf{V_{rms2} = 11.5V}$$

Calculo de la corriente del transformador y del rectificador.

$$I_{rect} = \frac{V_o}{V_{in}} I_o \quad I_{rect} = \frac{15V}{15V} * 4 A \quad \mathbf{I_{rect} = 4 A}$$

Potencia del transformador

$$P_{trafo} = V_{rms2} * I_o$$

$$P_{trafo} = 11.5V * 4A$$

$$P_{trafo} = 46 VA$$

Por lo que se requiere un transformador de 127V a 12V con una potencia de 48VA.

Como para el proyecto se necesitan dos fuentes de las mismas características para las dos excitatrices de las maquinas síncronas son necesarias dos etapas de con versión de ca – cd debido a esto se decidió hacer una sola etapa con el doble de potencia que puede alimentar a estas dos.

Diseño del transformador

$$V1 = 127V$$

$$V2 = 11.5V$$

$$I2 = 8A$$

$$P = 92W$$

- Numero de espiras

$$N1 = \frac{32 * V1}{\sqrt{P}}$$

$$N1 = 424 \text{ vueltas}$$

$$N2 = \frac{33.6 * V2}{\sqrt{P}}$$

$$N2 = 40 \text{ vueltas}$$

Los valores (32-33.6) son constantes que dependen del tipo de chapa.

- Sección del núcleo.

$$S_n = \frac{10^2 * V2}{2.22 * N2}$$

$$S_n = 12.9 \text{ cm}^2$$

Las constantes (10²-2.22) dependen de la calidad de las chapas y el factor de apilamiento de las mismas.

- Intensidad I1

$$I1 = \frac{P}{V1}$$

$$I1 = 0.724A$$

- Sección de los conductores

$$S_{c1} = \frac{I1}{\delta}$$

$$S_{c1} = 0.181 \text{ mm}^2$$

$$S_{c2} = \frac{I2}{\delta}$$

$$S_{c2} = 2 \text{ mm}^2$$

La constante δ es la densidad de corriente en (A/mm²).

- Diámetro de los conductores

$$D_{c1} = \sqrt{\frac{4S_{c1}}{\pi}}$$

$$D_{c1} = 0.48 \text{ mm}$$

$$D_{c2} = \sqrt{\frac{4S_{c2}}{\pi}}$$

$$D_{c2} = 1.59 \text{ mm}$$

Selección del puente rectificador

Para el rectificador se decide utilizar un puente rectificador encapsulado por su la facilidad para realizar su montaje.

Como en un rectificador en puente la tensión inversa pico $PIV = V_{p2}$

El voltaje inverso pico que debe soportar debe este debe ser $PIV = V_{p2} = 16.4V$

Y una intensidad de corriente mayor a **4 A**

Selección del capacitor del filtro:

Para un voltaje de rizado pico pico deseado de $V_{rpp} = 1V$

$$C = \frac{I_o}{2fV_{rpp}} \quad C = \frac{8A}{2 \cdot 60Hz \cdot 1V} \quad C = 66.66mF$$

El capacitor debe ser de 66.66μF a una tensión mayor de 15 V.

2.3.2. Diseño de la etapa del convertidor de CD a CD

Para esta etapa como ya menciono anteriormente se seleccionó la topología buck reductor síncrono. Esta etapa está conformada por 2 mosfet (transistor de efecto de campo de semiconductor oxido - metal) de potencia uno superior y otro inferior los cuales trabajan como dos interruptores a altas frecuencias que son controlados, una inductancia la cual en un instante de tiempo almacena energía para luego entregarla a la carga, y un capacitor el cual mantiene la tensión y disminuye el rizado de la misma a la salida del convertidor.

Parámetros de diseño del convertidor buck reductor síncrono.

$$V_{in} = 15V; V_o = (3 - 14) V; P_o = 60 W \quad f = 10kHz$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad I_o = \frac{60W}{15V} \quad I_o = 4 A$$

$$\Delta IL = 10\% \text{ de la componente de } IL \quad \Delta V_o = 1\% \text{ de rizado máximo de tensión.}$$

$$\Delta IL = 0.10 * 4A \quad \Delta IL = 0.4 A$$

Ciclos de trabajo ideal para las tensiones máximas y mínimas de salida del convertidor.

$$D_{max} = \frac{14V}{15V} = 0.9333 \quad D_{min} = \frac{3V}{15V} = 0.2$$

Para el diseño de este convertidor se tomará un 10% de rizado de la componente IL por lo que podemos saber las corrientes max y min en el inductor.

$$\Delta IL = 0.10 * 4A \quad \Delta IL = 0.4 A$$

$$IL_{min} = IL - \frac{\Delta IL}{2} \quad IL_{min} = 4A - \frac{0.4A}{2} \quad IL_{min} = 3.8A$$

$$IL_{max} = IL + \frac{\Delta IL}{2} \quad IL_{max} = 4A + \frac{0.4A}{2} \quad IL_{max} = 4.2A$$

Selección de los mosfet

Para la selección de los mosfet se tienen en cuenta las siguientes características:

$$V_{DSS} > V_m \quad V_{DSS} > 15V$$

$$I_{DS} > I_o \quad I_{DS} > 4A$$

R_{DS} : Lo más pequeña posible para disminuir pérdidas.

De los mosfet comerciales se escoge el IRF640N que tiene las siguientes características

$$V_{DSS} = 200V$$

$$I_{DS} = 18A$$

$$R_{DSon} = 0.15\Omega$$



Figura 37. Mosfet IRF640 con en capsulado TO-220AB

Calculo de las pérdidas en el mosfet s1

$$I_{Drms} = \sqrt{(D) * (I_{Lmin}^2 + (I_{Lmin} * \Delta_{IL}) + \frac{\Delta_{IL}^2}{3})} \quad I_{Drms} = \sqrt{(0.933) * (3.8^2 + (3.8 * 0.4) + \frac{0.4^2}{3})}$$

$$I_{Drms} = 3.865A$$

Perdidas por conducción

$$P_c = R_{DSon} I_{Drms}^2 \quad P_c = 0.15 * 3.865^2 \quad P_c = 2.240 W$$

Perdidas por conmutación: Tomamos de la hoja técnica del dispositivo los tiempos de conmutación del mismo.

$$P_{SW} = \left(\frac{1}{2} * V_m * I_o * (t_{don} + t_r + t_{doff} + t_f) \right) * f$$

$$P_{SW} = \left(\frac{1}{2} * 15 * 4 * (10n + 19n + 23n + 5.5n) \right) * 10k \quad P_{SW} = 0.0172W$$

Pérdidas totales en el mosfet

$$P_T = P_c + P_{sw} \quad P_T = 2.240W + 0.01725W \quad P_T = 2.257W$$

Calculo de la inductancia

Para el cálculo de la inductancia se desarrolla la siguiente tabla con los valores de voltaje V_o que se pueden obtener a la salida de la fuente, con su respectivo ciclo de trabajo y la inductancia requerida mínima para filtrar el mismo. De esta tabla se selecciona el valor más grande de inductancia siendo este el valor mínimo de inductancia de nuestra fuente que nos garantiza el filtrado de esta para cualquier voltaje de salida. Si se quiere mejorar o ser más exigentes con el filtrado se puede aumentar este valor.

$$L = \frac{V_m - V_o}{\Delta_{IL}} * DT$$

Tabla 1. Selección de la inductancia para las fuentes de cd.

Vo(V)	D=Vo/Vin	L(mH)
1	0,06666667	77,777
2	0,13333333	144,443
3	0,2	199,998
4	0,26666667	244,442
5	0,33333333	277,775
6	0,4	299,997
7	0,46666667	311,108
8	0,53333333	311,108
9	0,6	299,997
10	0,66666667	277,775
11	0,73333333	244,442
12	0,8	199,998
13	0,86666667	144,443
14	0,93333333	77,777

$$L = 311.108 \mu\text{H} \cong 311 \mu\text{H}$$

Con este valor de inductancia se completa todos los parámetros para el diseño de la bobina.

- Valor nominal mínimo de la inductancia $L=311 \mu\text{H}$.
- Corriente nominal 4 A.
- Rizado de corriente 0.4 A pico a pico.
- Frecuencia 30KHz.
- Tensión 14V.
- Temperatura ambiente 25°C.

Diseño de la bobina

Para el diseño de la bobina se seleccionó el núcleo PC40EF32-Z por ser el único que se encontró en nuestro medio comercialmente de la hoja técnica que ofrece el fabricante se toman los datos AL, Ae, Le, μr , Bs, H. Con los cuales se calcula el número de vueltas que debe tener la bobina.

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} \quad N = \sqrt{\frac{311 \mu\text{H}}{1050 n\text{H}/N^2}} \quad N = 18 \text{ vueltas}$$

Se verifica que el núcleo no se sature para la máxima intensidad de corriente que circulara por ella en caso de que el núcleo se sature se debe seleccionar un núcleo de mayor área efectiva Ae y un cuando cumpla este para metro también se debe tener en cuenta que tenga la capacidad para el numero de vueltas calculado. Cuando no se cumple alguno de estos parámetros se debe seleccionar un núcleo de mayor área.

$$H = \frac{NI}{Le} \quad H = \frac{18 \cdot 4}{53.3\text{m}} \quad H = 1350.8 \text{ A/m}$$

$$\beta_{cal} = \mu_r * H \quad \beta_{cal} = 350.99mT \quad \beta_{cal} < \beta_s$$

Calculo y selección del condensador:

El cálculo del condensador que se realiza por medio de la siguiente ecuación nos da un valor mínimo de capacitancia que por lo general para mejorar el filtrado a la salida se debe aumentar mucho más.

$$C = \frac{(1-D)}{8 * L * f^2 * \Delta V_o} \quad C = \frac{(1-0.53)}{8 * 311 \mu * 30k^2 * 0.01} \quad C = 20.989 \mu F$$

Con una capacidad de tensión superior de 14 V.

2.3.3. Diseño de la etapa de acople.

La etapa de acople es la que nos brinda las condiciones necesarias para la sincronización y disparo de los mosfet, así como aislamiento entre la etapa control y de potencia. Esta etapa está formada por los siguientes circuitos.

- **Circuito de aislamiento y sincronización de los tiempos de disparo de los mosfet.**

Brindar aislamiento a la etapa de control nos asegura que no hallan perturbaciones en estas debido a las corrientes circulantes en la etapa de potencia. Para cumplir esta función se seleccionó el optoacoplador 6N137. El cual acopla ópticamente dos puertas que combinan un diodo emisor de luz de GaAsP y una foto detector integrado de alta ganancia. Una entrada de habilitación permite que el detector sea estroboscopio. La salida del detector IC es un colector abierto de un transistor Schottky-clamped. Cuyos tiempos de respuesta típicos en subida son de 48ns y en caída de 50ns, Este diseño proporciona el aislamiento máximo, mientras se logra la compatibilidad TTL.

Para lograr un buen funcionamiento de este optoacoplador el fabricante recomienda en su hoja de características hacer una pequeña configuración con componentes externos. Recomendando los valores requeridos o dando los parámetros para el cálculo de los mismos. Las condiciones de operación recomendadas de este son: corriente de entrada máxima ($I_F=15mA$), tensión de alimentación ($4.5 < V_{cd} < 5.5$).

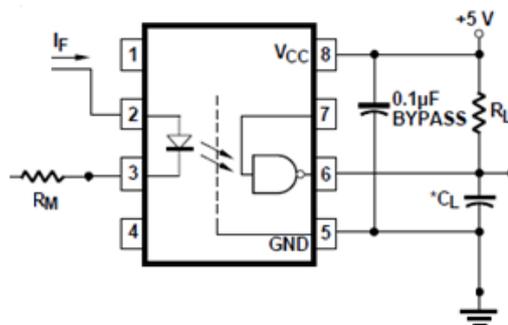


Figura 38. Configuración recomendada por el fabricante para el optoacoplador.

Para obtener un tiempo de propagación de 30ns la hoja de características sugiere los valores de $R_L=350\Omega$ Y $C_L=15pf$ con esta configuración el tiempo mínimo de respuesta sería de 30ns en el

peor de los casos. La resistencia R_m se calcula con la corriente de entrada recomendada ($I_f=23mA$).

$$R_m = \frac{5V}{23mA} \quad R_m = 217.4\Omega$$

Simulación en el software NI MULTISIM

Se realizó la simulación de esta etapa para verificar el buen funcionamiento del mismo, así como para verificar su tiempo de respuesta.

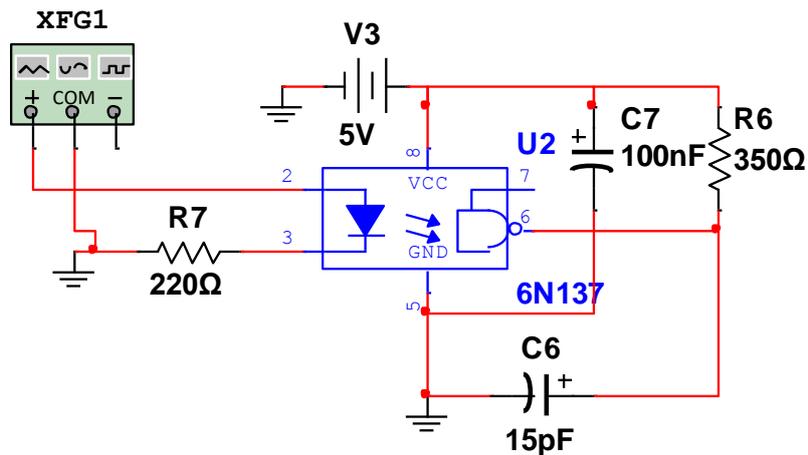


Figura 39. Circuito de asilamiento con optoacoplador 6N137 simulado.

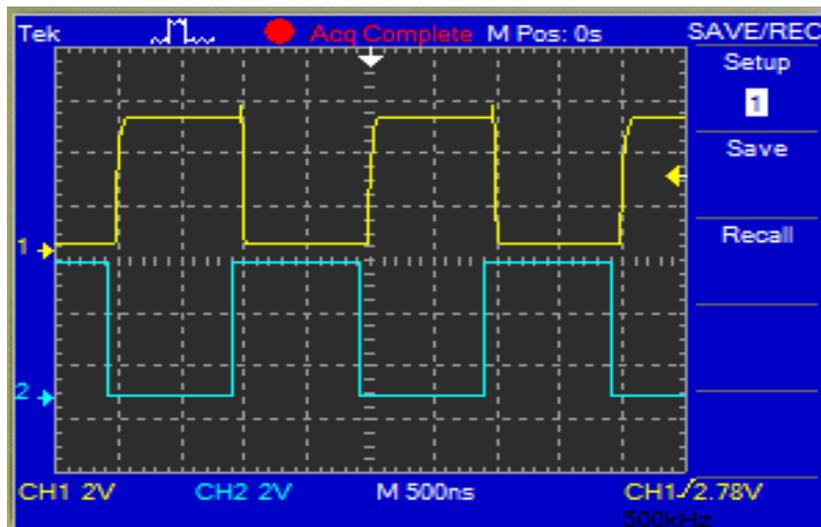


Figura 40. Comparación señal de entrada y salida del optoacoplador.

En la simulación mediante el osciloscopio se pudo observar como el optoacoplador niega la señal de entrada, la señal de entrada es la 2 de color azul proveniente de un generador de señales del simulador, la señal de salida es la 1 en color amarillo. Se puede apreciar con respecto al tiempo de subida que el optoacoplador responde en unos 30 ns mientras que en el tiempo de bajada unos 50ns.

Hasta hora se tiene la señal de disparo del mosfet superior, estando aislada la etapa de control, pero como se necesita una segunda señal de disparo para el mosfet inferior que esté sincronizada con la del superior, de tal manera que cuando una esté en estado alto su homóloga este en estado bajo, lo que severa reflejado en los mosfet, cuando uno entra en conducción el otro conmuta al estado de no conducción. Además de esto se debe asegurar que cuando un mosfet conmuta el otro debe estar totalmente en el estado opuesto ya que, si no es así, aun cuando sea por pequeños intervalos de tiempo (ns) esto hace que se averíen o disminuya la vida útil de los mosfet y que baje la eficiencia del nuestro convertidor, para evitar esto se debe generar un tiempo muerto en las señales de disparo.

Para generar nuestra segunda señal, sincronizarla con la primera y que además entre sus cambios de estado exista un tiempo muerto se utilizará una compuerta negadora 74LS04 la cual tendrá como entrada la señal de disparo del mosfet superior, y así a la salida de la compuerta será nuestra segunda señal.

La compuerta 74LS04 no solo nos ayuda obtener una segunda señal, sino que, también debido a la naturaleza de su construcción esta tiene un tiempo de respuesta de 10ns lo que genera un desfase entre la señal de entrada y de salida este desfase será la asignación de nuestro tiempo muerto.

Simulación del circuito optoacoplador con compuerta negadora en NI MULTISIM

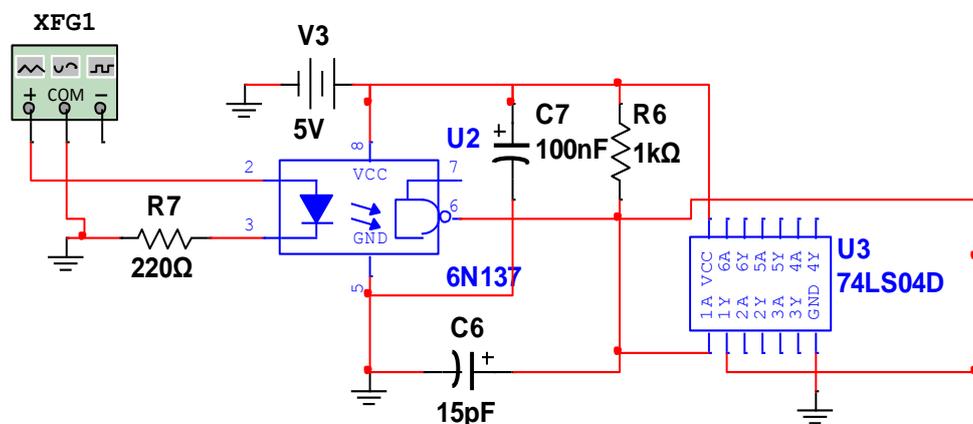


Figura 41. Circuito optoacoplador mas compuerta negadora para sincronización de las señales de los mosfet y generar tiempo muerto.

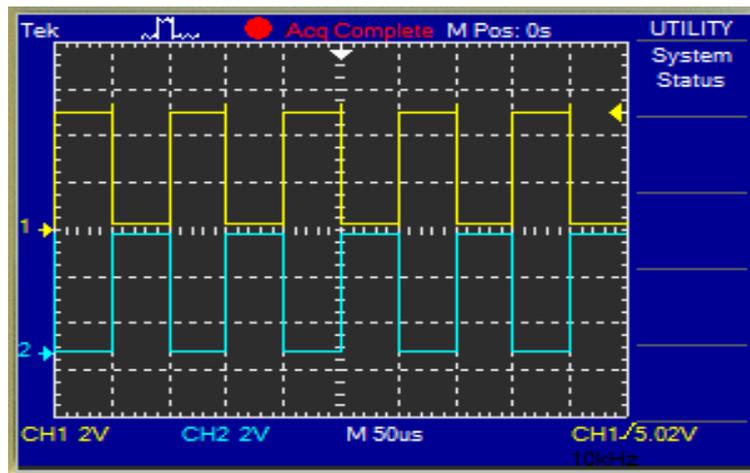


Figura 42. Señal de entrada y de salida de la compuerta negadora.

En el osciloscopio del simulador se puede apreciar como la compuerta niega la señal de entrada, la señal de entrada es la 1 en color amarillo la cual va directamente al driver y será la que active el mosfet superior y la señal de salida de la compuerta es la 2 color rojo, la que va al driver pero con retardo de 10 ns con respecto a la 1 esta activará el mosfet inferior, para ver el desfase o tiempo muerto entre las dos señales se hace una ampliación en la escala temporal como se muestra en la siguiente figura 45.

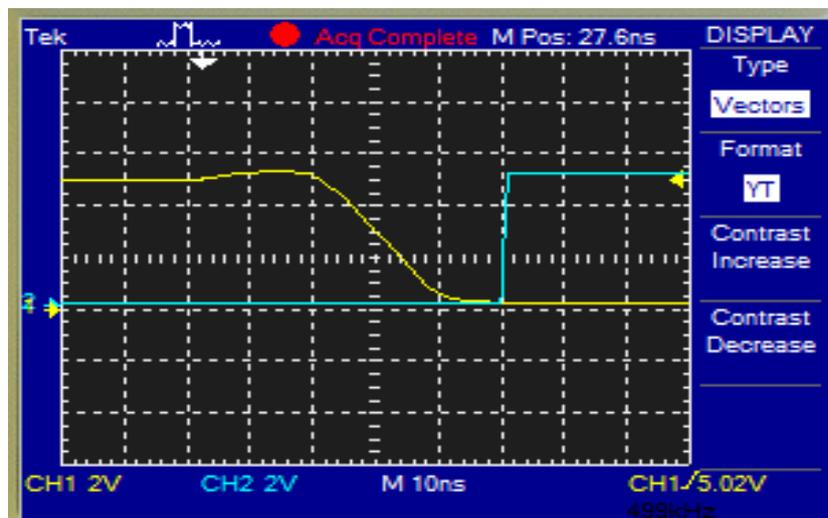


Figura 43. Desfase o tiempo muerto entre las señales de activación de los mosfet.

- **Circuito de activación de los mosfet (drivers)**

Esta etapa se encarga de recibir las dos señales de control, la principal y la negada y las convierte en condiciones de activación o de apagado, brindando las características necesarias para que los mosfet conmuten de manera efectiva, grandes rasgos la función de esta etapa es recibir las señales de control con valores de 5V y amplificarlas a un valor comprendido entre 10 y 20 V que es el valor al que se activan los mosfet, para nuestro caso seleccionaremos un valor intermedio de voltaje para la activación de los mosfet 15V por lo que este driver debe alimentarse con una fuente de 15 y 5 voltios

Para el diseño de esta etapa se hace uso del driver ir2110. Los IR2110 son drivers de MOSFET e IGBT de alto voltaje, velocidad y potencia con canales independientes de salida de referencia alta y baja. Las entradas lógicas son compatibles con el estándar de CMOS o salida LSTTL. Los controladores de salida cuentan con una etapa de pulsos con buffer diseñado para un mínimo cruce a conducción. Los retardos de propagación se emparejan para simplificar el uso en aplicaciones de alta frecuencia. El canal flotante se puede utilizar para activar un MOSFET de potencia de canal N o IGBT en la configuración de lado de alta operando hasta 500 o 600 voltios. La respuesta de este elemento se da típicamente a 120ns en subida y 94ns en caída.

Dentro de la hoja característica de este dispositivo se encuentra la configuración de conexión típica de este además del significado de la simbología usada en el mismo, la cual es la clave a la hora de realizar su montaje.

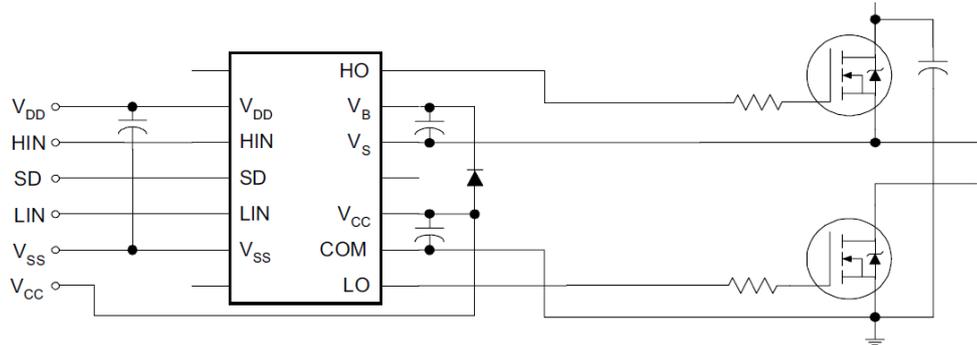


Figura 44. Esquema de conexión típica del driver IR2110.

Para reducir inductancias parasitas y garantizar el óptimo funcionamiento del driver el fabricante provee las siguientes consideraciones para las capacitancias, estas consideraciones se pueden encontrar en el documento AN-978 de la *International Rectifier*.

$$c \geq \frac{2[2Qg + \frac{Iqbs(max)}{f} + Qls + \frac{Icbs}{f}]}{Vcc - Vf - Vls - Vmin}$$

Donde:

Qg: Carga en la puerta del MOSFET.

F: Frecuencia de operación.

ICbs: Corriente de fuga del capacitor de Bootstrap.

Iqbs: Máxima corriente de reposo.

VCC: Voltaje de alimentación.

Vf: Caída de voltaje en el diodo de Bootstrap.

VLF: Caída de tensión en el lado bajo del driver.

VMin: Tensión mínima entre VB y VS.

Teniendo en cuenta la hoja de característica del driver y del Mosfet a activar se tiene:

$$c \geq 0,629 \mu F$$

El valor de las capacitancias conectadas entre Vcc – Com y VB –Vs deben ser diez veces mayor al calculado ósea **10μF**.

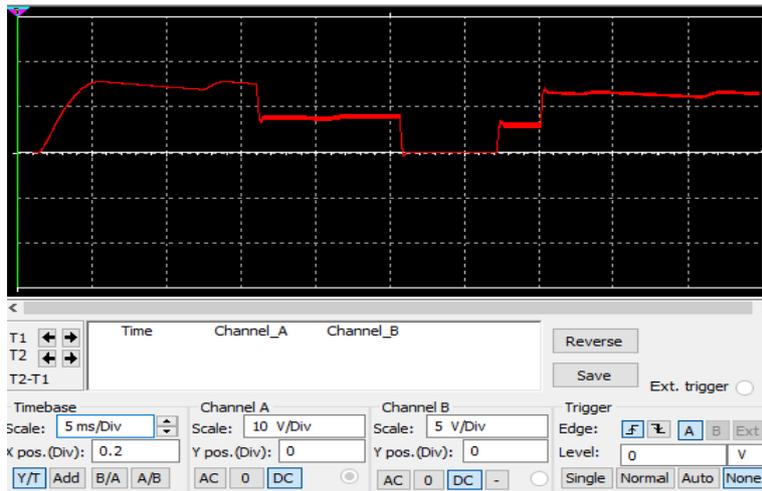


Figura 46. Diferentes valores de tensión a la salida de la fuente simulada.

En la figura 48 se puede observar como el voltaje de salida de la fuente simulada aumenta o disminuye cuando se varia el ancho de pulso del generador de señales. También se puede observar que se presenta un mayor rizado en el voltaje en los valores intermedios. También es de apreciar que en la simulación la fuente está operando a plena carga entregando una intensidad de corriente de 4 A.

2.4. Circuitos impresos

Los circuitos impresos de los esquemas simulados en NI Multisim se diseñaron en el software PCB Wizard, y el cálculo del ancho de las pistas se realizó en un software gratuito disponible en la página web.

http://www.microensamble.com/site/index.php?option=com_content&view=article&id=105:calculadora-de-ancho-de-pista&catid=62&Itemid=197

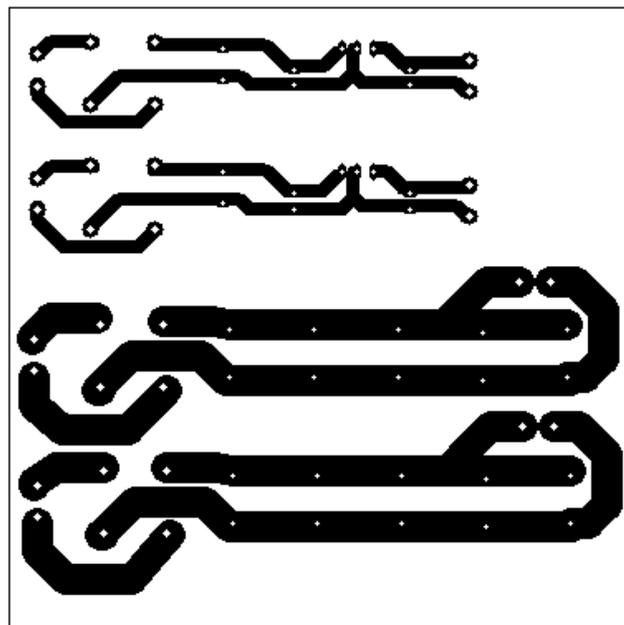


Figura 47. Impreso de la etapa del Convertidor ca cd y fuentes de alimentación de los circuitos de control.

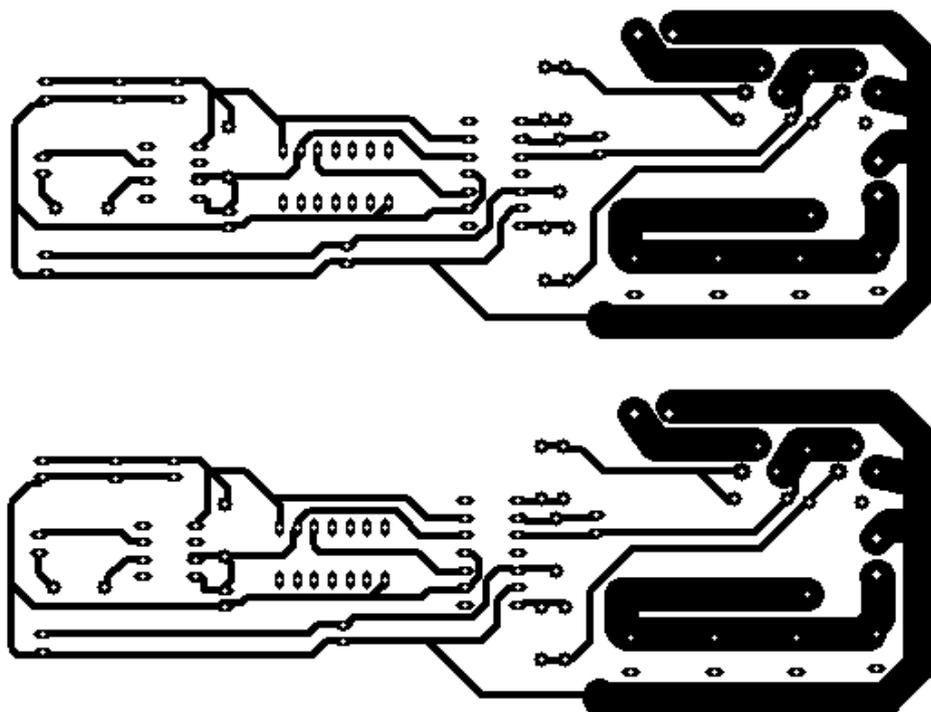


Figura 48. impresos de la etapa convertidor cd a cd.

CAPITULO III

3. Diseño del sistema de control de las excitatrices de las máquinas.

El control de las excitatrices representa una etapa fundamental en su funcionamiento. Para el presente proyecto se diseñará un control de lazo cerrado, el cual se implementará por software por su simplicidad y economía. Este se implementará en un microcontrolador (PIC 18F2550) por medio de programación.

3.1. Sensor de retroalimentación

Para realizar la retroalimentación se debe utilizar un sensor de tensión a la salida de fuente, este debe modificar el valor censado dándole las características ideales para poder enviar esta señal al microcontrolador ya que el micro solo trabaja con entradas de 5 V. el sensor es un divisor de voltaje en cual debe haber 5 V que son los que irán al microcontrolador.

Calculo del valor de las resistencias para el divisor de tensión, para divisor de tensión como son necesarias dos resistencias se fija una de ellas y la otra se calcula mediante el divisor de voltaje.

$$R2 = \frac{9V * R1}{5V}$$

Donde R1 se seleccionó de 100 K Ω , este valor de resistencia debe ser grande para que las pérdidas en el divisor de tensión sean pequeñas.

$$R2 = 180K\Omega$$

3.2. Microcontrolador

El micro controlador seleccionado es el PIC 18F2550, quien va a tener los voltajes de entrada de forma analógica provenientes del lazo de retroalimentación comprendidos de entre 0 y 5 voltios, los cuales se compararán con los voltajes de referencia o deseados a las salidas de las fuentes, este valor de tensión también es un parámetro de entrada del micro el cual está comprendido entre 0 y 5 donde 0 corresponde 0 voltios a la salida de la fuente y 5 corresponde a 14 voltios que será el mayor voltaje de salida de la fuente los cuales se generan por medio de un potenciómetro. La comparación de estos dos voltajes produce una señal de error el cual es multiplicado por una constante K ganancia, para dar a la señal una mayor capacidad de operación. De esta, manera las señales de control están dadas por la ecuación siguiente que corresponde a controlador proporcional:

$$V_{contr} = k * (V_o - V_{ref})$$

Donde V_o corresponde a voltaje censado a la salida de la fuente y V_{ref} valor de referencia o voltaje deseado, k es la ganancia o nivel de amplificación de la señal de error.

Después de obtener esta señal de control esta se compara con la señal del oscilador la cuales generan la señal de conmutación obligando al convertidor a variar su ciclo de trabajo. La regulación de tensión de salida obtenida no es inmediata y depende de la magnitud de la variación de la señal, de manera que existe la posibilidad de que el circuito necesite más de un ciclo de conmutación para devolver el valor de la señal de salida al valor deseado. La frecuencia de la señal de conmutación se fija en el micro a 30 K Hz. Todo el proceso mencionado anteriormente se hace por código el cual se carga al microcontrolador

Código en C del microcontrolador.

```
1  #include <18f2550.h>
2  #device adc=10
3  #include <math.h>
4  #INCLUDE <stdlib.h>
5  #fuses HSPLL, NOWDT, PLL6, CPUDIV1, USBDIV, NOXINST
6  #use delay(clock=4800000)
7  #BYTE TRISC=0x87
8  #BYTE TRISA=0x85
9  #BYTE PORTA=0x05
10
11 float actual=0;
12 float anterior=0;
13 float errora=0;
14 float error=0;
15 float sp=40;
16 float tp=0;
17 float tia=0;
18 float ti=0;
19 float td=0;
20 float kp=0.20;
21 float ki=0.00;
22 float kd=0.00;
23 float pwm=0,pwma=0;
24 float max=255;
25 float min=3;
26 float bias=0;
27 float pwm1=0;
28 int8 pwm2=0;
29
30 void main (){
31     float q,q1;
32     float p,p1;
33     setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
34     setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
35     setup_timer_2(t2_div_by_1,255,1);
36     setup_ccp1(ccp_pwm);
37     setup_ccp2(ccp_pwm);
38
39     WHILE (true){
40         set_adc_channel(0);
41         delay_ms(10);
42         q=read_adc();
43         p=((255.0*q)/1023.0);
44
45         set_adc_channel(1);
46         delay_ms(10);
47         q1=read_adc();
48         p1=((255.0*q1)/1023.0);
49
50
51
```

```

52 error=(p-p1); //calculo del error
53 tp=kp*error; //calculo del termino proporcional
54 ti=(ki*error)+tia; //calculo del termino integral
55 td=kd*(error-errora); //calculo del termino derivativo
56 pwm=(tp+ti+td); // salida del controlador
57
58 pwm1=pwma-pwm;
59
60 if(pwm1>=max){ //salidade pid si es mayor que el max
61     pwm1=max;}
62 else{
63     if(pwm1<=min){ //salidade pid si es menor que el min
64         pwm1=min;}
65     }
66     pwm2=pwm1;
67
68     set_pwm1_duty(pwm2);
69     //set_pwm2_duty(3);
70
71     anterior=actual;
72     errora=error;
73     tia=ti;
74     pwma=pwm1;
75     delay_ms(10);
76 }
77 }
78

```

3.3. Circuito impreso de la etapa de control

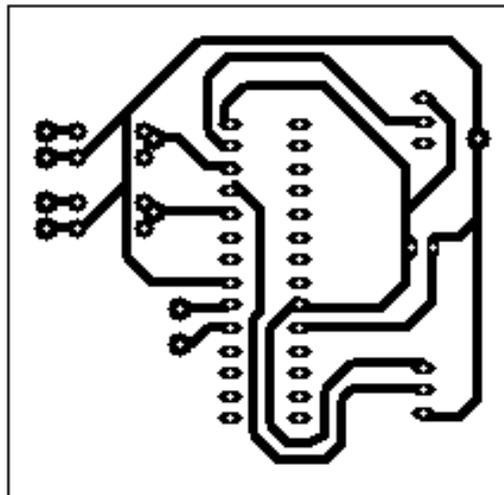


Figura 49. Impreso de la etapa de control

CAPITULO IV

4. Implementación del módulo con la estructura mecánica y los circuitos electrónicos diseñados.

4.1. Adecuación de las maquinas

Como ya se mencionó en el capítulo II las maquinas seleccionadas para el presente proyecto son 2 alternadores de automóvil de las marcas Delco Remy y Prestolite, las cuales requieren de algunas modificaciones para que sean funcionales para el proyecto. En las modificaciones esta retirar el puente rectificador que está incorporado en las maquinas, adicionar conectores para tener acceso a las fases y neutro de las maquinas. Además, se deben limpiar y pintar para una buena presentación.



Figura 50. Maquinas en su estado original



Figura 51. Estatores de las maquinas con conectores



Figura 52. Partes de la maquina Delco Remy después de ser adecuadas



Figura 53. Partes de la maquina Prestolite después de ser adecuadas



Figura 54. Maquinas después de las modificaciones

4.2. Estructura de soporte para acoplamiento mecánico de las maquinas



Figura 55. Estructura de soporte y acople de las maquinas.

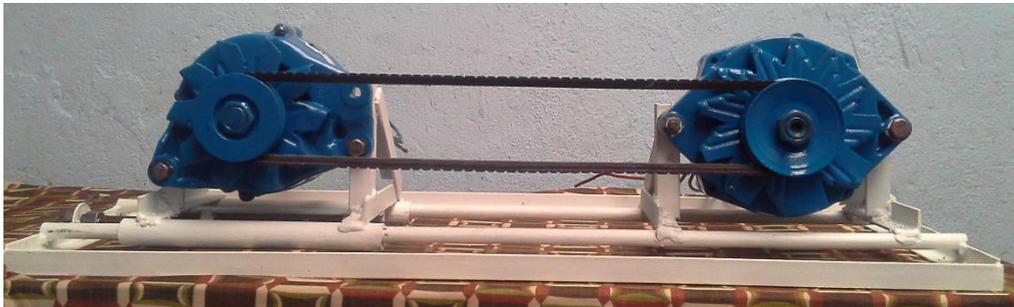


Figura 56. Maquinas acopladas mecánicamente y montadas en la estructura.

4.3. Excitatrices

A continuación, se presentan los circuitos de las diferentes etapas de las excitatrices, implementados, como estas etapas se realizaron de forma separada se deben usar conectores para conexión de una etapa a otra, lo que representa más posibilidades de un mal funcionamiento de la fuente si no se realiza unos buenos empalmes, pero también representa ventajas como un fácil acceso a cada una de estas etapas.



Figura 56. Circuitos de las diferentes etapas de las fuentes



Figura 57. Componentes de las excitatrices

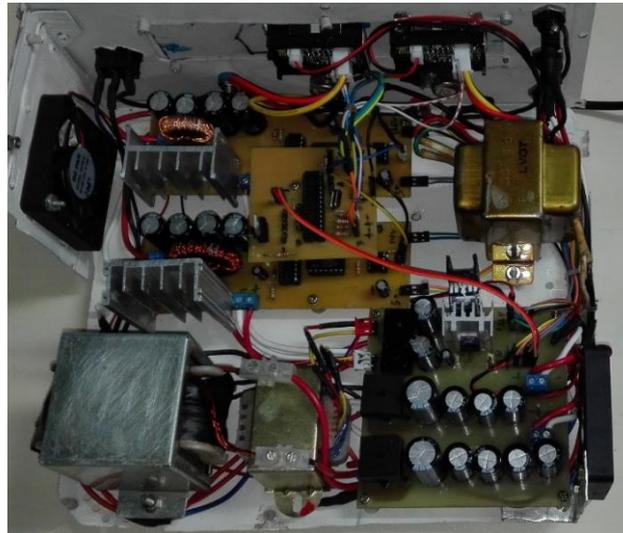


Figura 58. Vista interna de la fuente terminada.

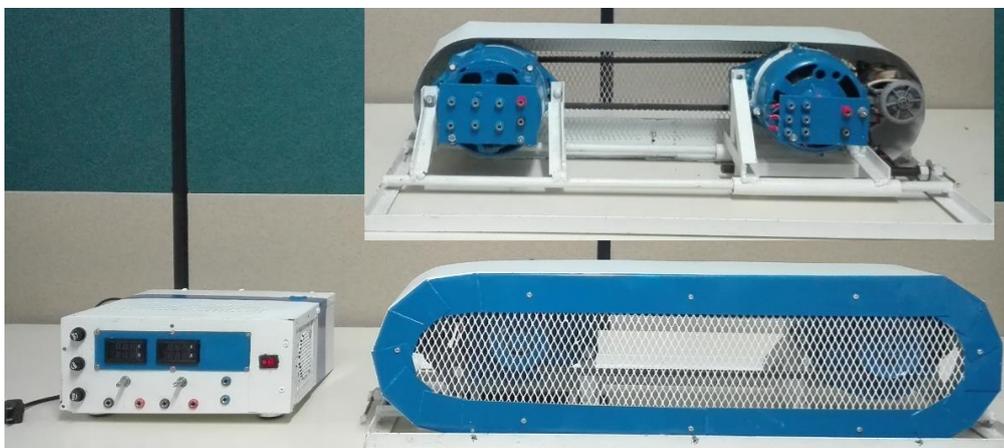


Figura 59. Grupo motor generador sincrónico implementado.

CAPITULO V

5. Validación resultados y pruebas de funcionamiento del grupo motor generador sincrónico

5.1. Señales de salida PWM de la etapa de control de las excitatrices y fuente de CD en operación.

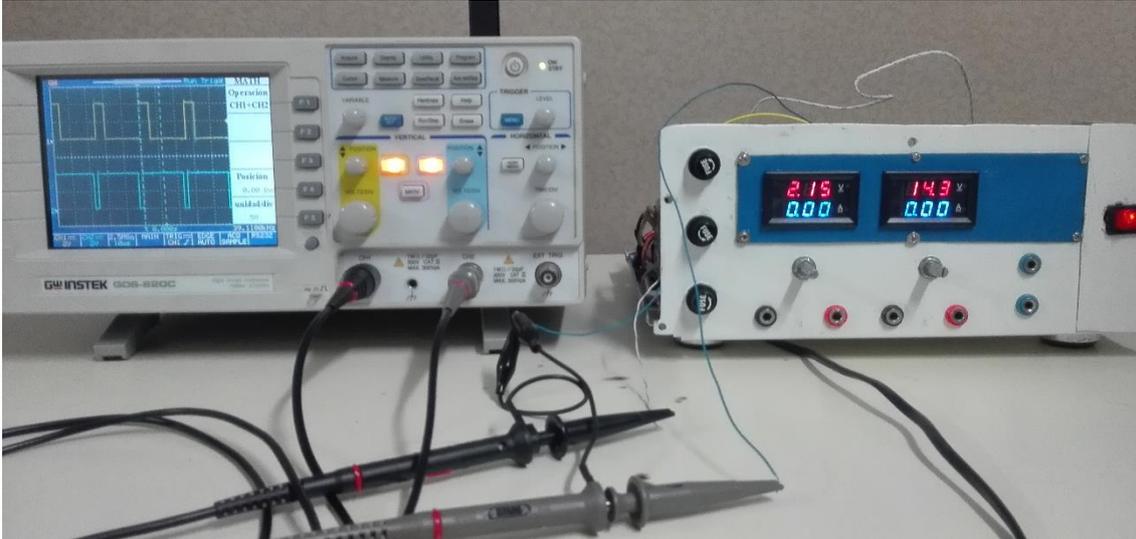


Figura 60. Señal PWM de control de las excitatrices.

En la figura 60 se puede apreciar las dos señales PWM que salen del microcontrolador, las cuales van a la etapa de acoplamiento de cada uno de los canales de la fuente o excitatrices de las maquinas síncronas realizando la acción de control de las mismas, la señal inferior del osciloscopio que está en su mayoría en estado alto corresponde a la señal de control del canal de la fuente que está en 2.15 V, y la señal de control superior que está en su mayoría en estado bajo corresponde al canal de la fuente que está en 14.3V.

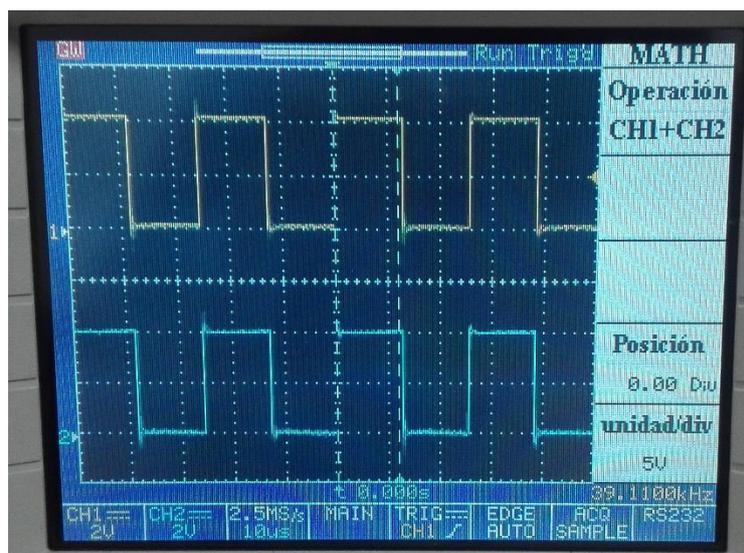


Figura 61. Señales de control PWM de disparo de los mosfet.

Al realizar una ampliación de las señales de control en el osciloscopio figura 61 se puede apreciar la amplitud y frecuencia de las mismas. Valores que corresponden a los parámetros de diseño o están dentro de los márgenes de tolerancia permitidos para el mismo, donde la frecuencia de diseño de conmutación de los mosfet es 40 KHz y la amplitud de la señal 5V, siendo los valores implementos los que se pueden apreciar en el osciloscopio.

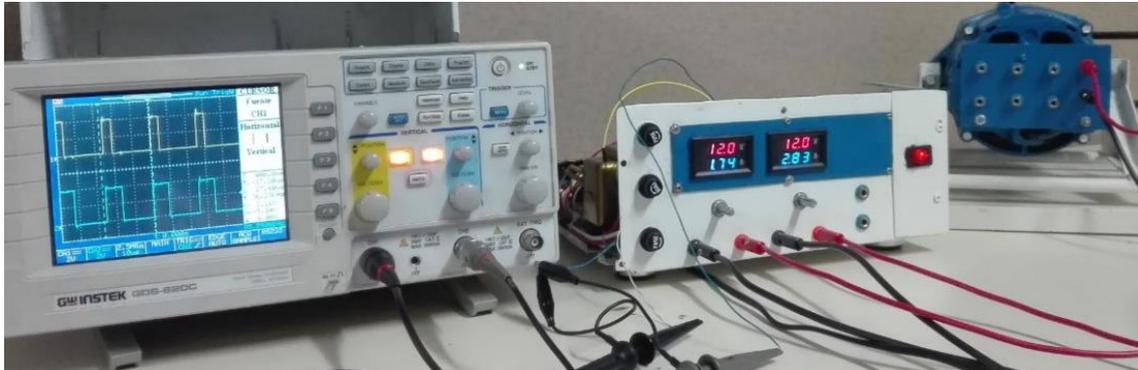


Figura 62. Señales de control y excitatrices conectadas al circuito de campo de las maquinas síncronas.

En la figura 62 se puede observar las excitatrices alimentando el circuito de campo de las maquinas síncronas a tensión nominal 12 V las cuales consumen 1.74 A y 2.83 A, también se puede apreciar que las señales de control no se ven afectadas o distorsionadas cuando la fuente trabaja en carga.

5.2. Validación y funcionamiento del grupo motor síncronico

5.2.1. Arranque del motor síncronico

el arranque del motor síncronico se realiza por medio de un motor auxiliar acoplado mecánicamente al grupo. Este es un motor universal que se alimenta a 127 V, el cual tiene el suficiente par para mover el grupo motor generador en vacío durante un pequeño lazo de tiempo, la velocidad mecánica del mismo es mayor a la velocidad de sincronismo para poder lograr el alineamiento de los campos del rotor y el estator de motor síncronico.

Con en el motor auxiliar mencionado anteriormente se logró con éxito el arranque del motor síncronico durante las pruebas de laboratorio.

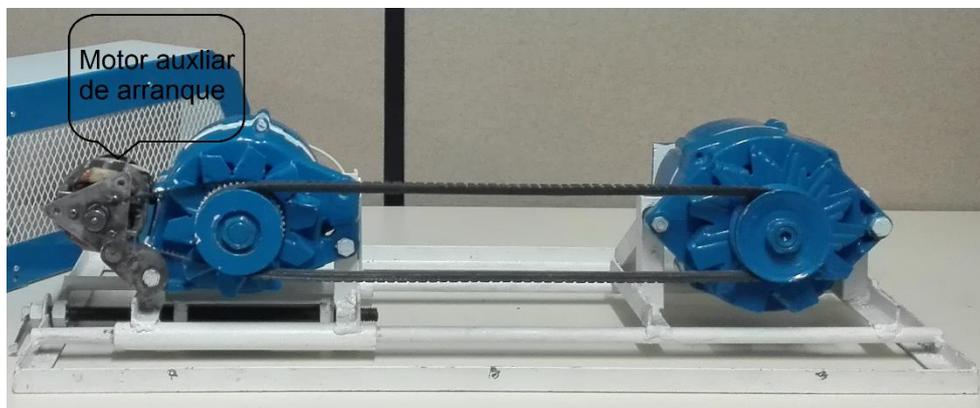


Figura 63. Grupo motor generador con motor de arranque.

5.2.2 Validación del funcionamiento de las maquinas síncronas con el analizador de red

Prueba de funcionamiento del motor síncrono con el analizador de red.

En el laboratorio se le realizaron pruebas de funcionamiento a las maquinas sincrónicas del módulo mediante el analizador de red arrojando buenos resultados, como se puede apreciar y analizar en las siguientes fotografías.

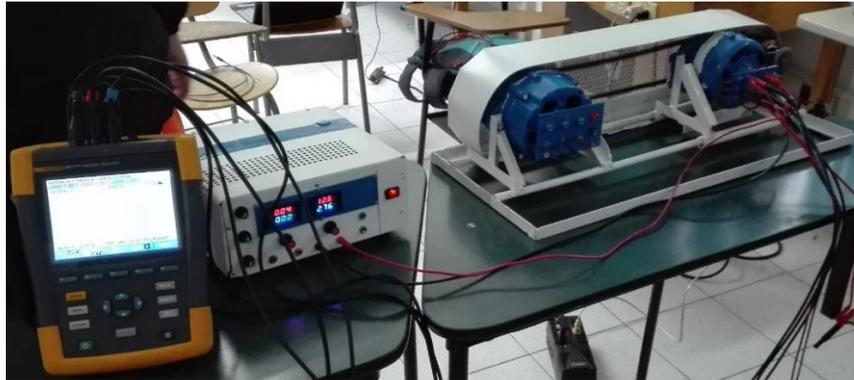


Figura 64. Funcionamiento del módulo y conexión del analizador de red

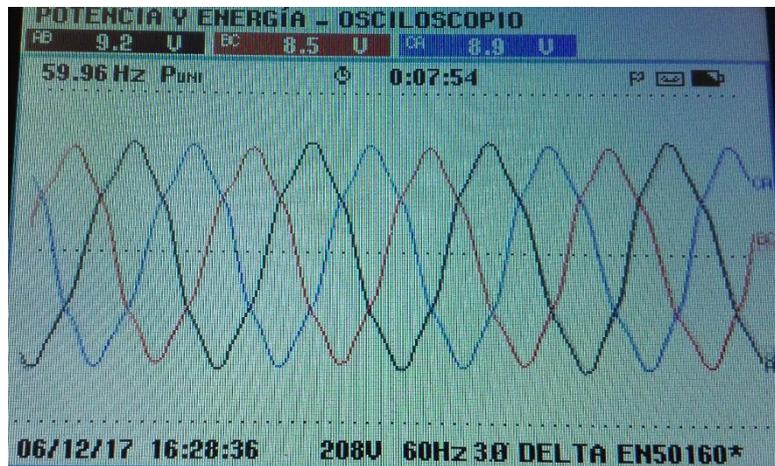


Figura 65. Frecuencia y ondas de voltajes de la alimentación del motor síncrono en operación, en el analizador de red

En el analizador de red en la figura 65 se puede apreciar un pequeño desbalance o desequilibrio de las tensiones en la alimentación de motor, dicho desbalance se debe a la fuente de alimentación del laboratorio.



Figura 66. Ondas de corriente y frecuencia del motor sincrónico

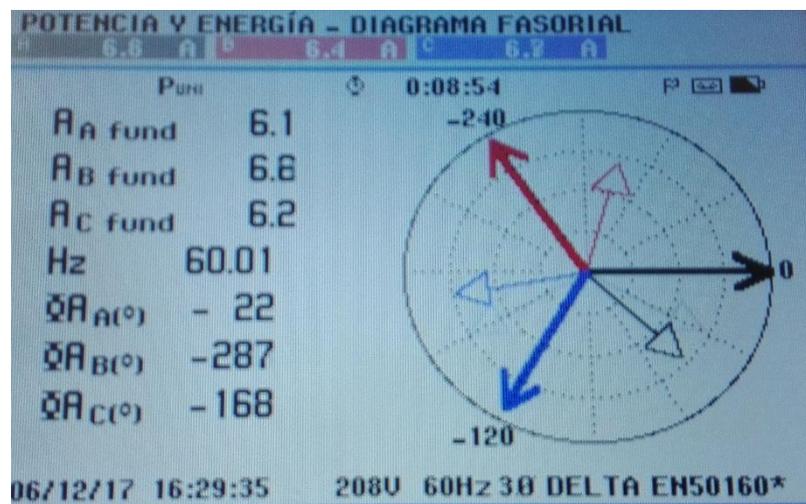


Figura 67. Diagrama fasorial

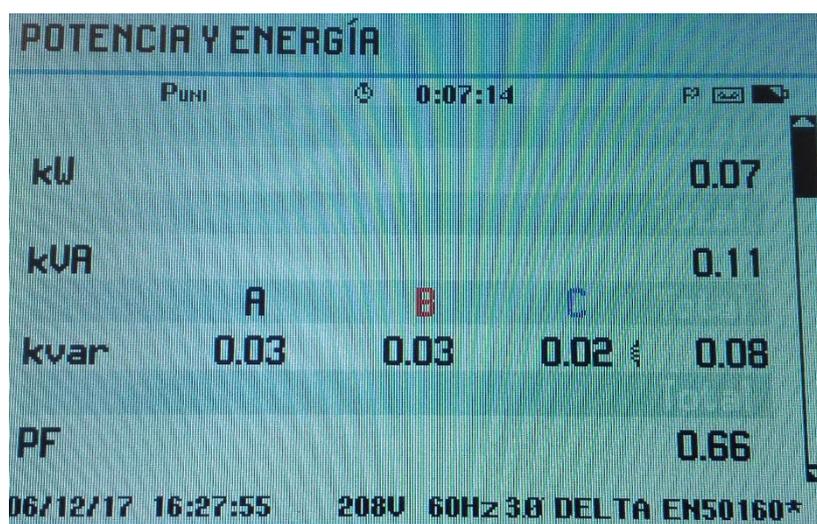


Figura 68. Potencias y factor de potencia del motor síncrono.

Prueba de funcionamiento del generador síncrono con el analizador de red.



Figura 69. Elevación del voltaje de salida del generador síncrono mediante un transformador trifásico.

En la figura 69 se puede apreciar un transformador trifásico elevador conectado a las terminales del generador. Esta elevación de tensión se realiza ya que nuestro generador solo puede generar a 12V y para fines de estudio es mejor obtener la tensión de nuestra red de alimentación.



Figura 70. Conexión del analizador red al transformador elevador de la tensión del generador.

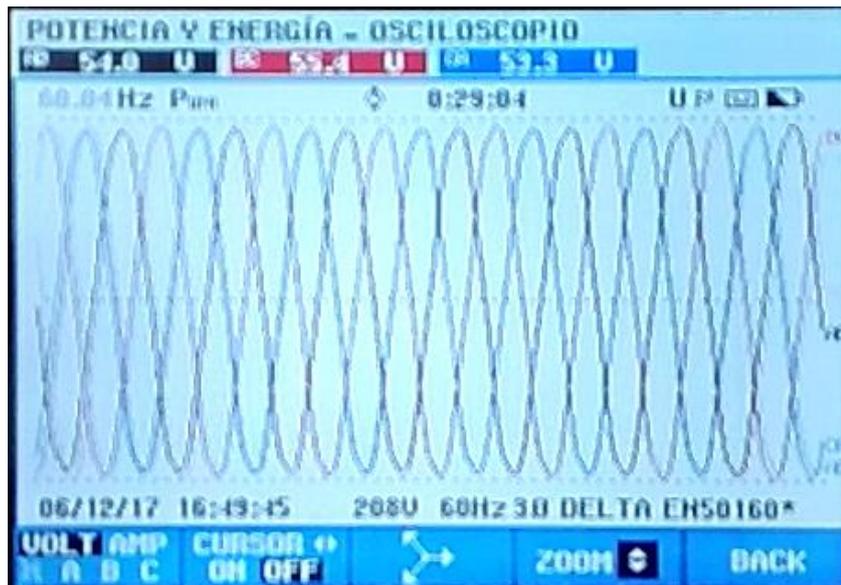


Figura 71. Ondas de voltaje y frecuencia a la salida del transformador elevador.

CONCLUSIONES

1. Se diseñó la estructura mecánica y los circuitos electrónicos requeridos por el módulo.
2. Se diseñó el sistema de control de las excitatrices de las máquinas, en el cual se realizó un control por medio de software, por ser económico y de baja complejidad a la hora de su implementación.
3. Se implementó el modulo con la estructura mecánica y los circuitos electrónicos diseñados, cuales cumplieron con los requisitos de operación para el buen funcionamiento del módulo.
4. Se realizó la validación del funcionamiento del módulo mediante pruebas en el laboratorio, por medio del analizador de red en el cual se obtuvieron buenos resultados.
5. Se diseñaron guías de laboratorio de las temáticas maquinas síncronas en régimen motor y régimen generador las cuales se pueden desarrollar haciendo uso del grupo motor generador sincrónico implementado.
6. Se desarrolló el manual de funcionamiento del módulo el cual especifica como manipular de manera correcta el modulo para que no sufra averías.

ANEXOS

- Guías de prácticas de laboratorio.

GUÍAS DE LABORATORIO MÁQUINAS DE CA SINCRONAS

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
SISTEMAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA**

2017

INDICE DE CONTENIDO

Practica 1: Tensión y frecuencia de un generador Síncrono

Practica 2: Reactancia síncrona y circuito equivalente

Practica 3: Arranque motor síncrono con motor auxiliar y variador de frecuencia.

Practica 4: Curva V del motor síncrono.

Practica 5: Conexión del generador síncrono en paralelo con un sistema de potencia en operación.

PRACTICA 1: TENSIÓN Y FRECUENCIA DE UN GENERADOR SÍNCRONO

1. Objetivos

- Comprobar la relación de frecuencia, flujo y fem existente en un generador síncrono.
- Observar el comportamiento de los generadores al variar la corriente I_f .
- Observar el comportamiento de los generadores al variar la velocidad W_m .

2. Materiales

- Fuente de voltaje 3ϕ .
- 1 Multímetro.
- Caimanes.
- Osciloscopio.
- Grupo motor generador síncrono

3. Marco Teórico

VOLTAJE INTERNO GENERADO POR UN GENERADOR SÍNCRONO

- Voltaje de fase por generador síncrono

La fem inducida por fase en un generador síncrono trifásico corresponde a la estudiada en la unidad 1 para devanados distribuidos con un determinado factor de paso, esta se representa con la siguiente expresión:

$$E_{rms} = \sqrt{2}\pi N_c k_d k_p \phi_{pico} f$$

De forma más simple:

$$E_A = K\phi\omega$$

Donde K es una constante que representa la construcción de la máquina.

- Voltaje de línea en el generador síncrono

Los valores de las tensiones de línea dependerán de la conexión interna de las tres fases del devanado, si la máquina se conecta en estrella las tensiones de línea serán:

$$E_{línea\ rms} = \sqrt{6}\pi N_c k_d k_p \phi_{pico} f$$

Para una conexión delta el valor RMS de las tensiones de línea corresponderán con las tensiones de fase:

$$E_{línea\ rms} = \sqrt{2}\pi N_c k_d k_p \phi_{pico} f$$

FRECUENCIA DE LA TENSION INDUCIDA EN UN GENERADOR SINCRONO

La máquina síncrona recibe su nombre debido a que la frecuencia eléctrica de las tensiones inducidas en el estator y la velocidad mecánica del rotor están en sincronía, cumpliendo a plenitud la siguiente ecuación:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

Donde:

- f_e : frecuencia eléctrica [Hz]
- n_m : velocidad mecánica del campo magnético [rpm], equivalente a la velocidad del rotor
- P: número de polos

4. Procedimiento

1. Realizar el montaje del generador síncrono con tutoría del profesor.
2. Colocar los instrumentos necesarios para medir V_L , I_f , V_f , P_f y W_m .
3. A W_m en un valor constante, ($W_1 = W_{max}$ y $W_2 = W_{max}/2$) varíe la corriente I_f mediante la variación del valor de la fuente de alimentación en dc de la máquina.
4. Registre los datos en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1.

W_1						
I_f						
V_{ef}						
W_2						
I_f						
V_{ef}						

5. Con un osciloscopio observe la forma de onda de voltaje en la salida del generador, regístrela en papel milimetrado y observe los cambios al variar la corriente de campo con las dos velocidades.
6. Para un I_f constante ($I_{f1} = I_{fmax}$ y $I_{f2} = I_{fmax}/2$), varíe la velocidad mecánica W_m mediante la variación del punto de operación del motor primario.
7. Registre los datos en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2.

W_1						
I_f						
V_{ef}						
W_2						
I_f						
V_{ef}						

8. Con un osciloscopio observe la forma de onda de voltaje en la salida del generador, regístrela en papel milimetrado y observe los cambios al variar la velocidad con las dos corrientes de campo.

5. Conclusiones



6. Bibliografía

- S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, México : Mc Graw Hill, 2005
- J. F. Mora, Máquinas eléctricas, España : Mc Graw Hill, 2003.

PRACTICA 2: REACTANCIA SÍNCRONA Y CIRCUITO EQUIVALENTE

1. Objetivos

- Comprobar la curva característica en circuito abierto y en cortocircuito de los generadores síncronos.
- Observar el comportamiento de los generadores al variar la corriente I_f .
- Determinación de las características de un alternador trifásico que permitan predecir sus condiciones de funcionamiento.
- Establecer el circuito equivalente de un generador síncrono.

2. Materiales

- Fuente de voltaje 3ϕ .
- 1 Multímetro.
- Caimanes.
- Grupo motor generador síncrono

3. Marco Teórico

El circuito equivalente del generador síncrono es un modelo circuital que permite representar a la máquina en estado estacionario, dando la posibilidad de predecir comportamientos de la máquina frente a variaciones de carga o diferentes puntos de operación.

Para obtener el circuito equivalente del generador síncrono en estado estacionario, se deben modelar cuatro fenómenos. Los cuales se describen a continuación:

- **fem inducida:**

La fem inducida es el voltaje interno generado por fase en el estator del generador síncrono, esta se representa con la letra E_A y es la fuente de tensión del circuito equivalente. Esta tensión no es la misma que se presente en los bornes del generador debido a la regulación que se presenta a causa de los fenómenos descritos a continuación.

- **Resistencia de armadura:**

El circuito equivalente tendrá un elemento resistivo por fase que representa la resistencia propia de los devanados del inducido y por tanto las pérdidas de Joule en el cobre del estator de la máquina. Este elemento se representa con la letra R_A .



- **Reacción del Inducido:**

El modelo de la reacción del inducido es la representación circuital de la distorsión del campo magnético del entrehierro debido a la corriente que fluye en el estator o inducido. Al conectar carga en los bornes del generador la corriente que fluye de este circula en los devanados, dicha corriente crea un campo estátorico que deforma el campo principal y afecta el flujo, influyendo en la fem de fase resultante y afectando el voltaje en los bornes del generador. En la siguiente figura se muestra las interacciones de los campos del rotor y el campo generado como reacción del inducido del estator:



El campo principal B_r induce a E_A que alimenta una carga con corriente (I_A) en atrás, esta corriente crea un campo en el estator (B_s) que se suma al campo principal para crear un B_{neto} , el cual genera el voltaje de salida.

Matemáticamente:

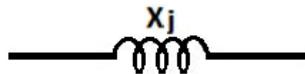
El estator depende del campo estátorico (B_s), a su vez de la corriente, por tanto:

$$V_\phi = E_A + X I_A \quad X \text{ es Constante}$$

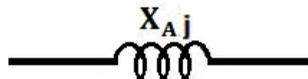
$$E_A = V_\phi - X I_A$$

$$E_A = V_\phi - j X I_A$$

El elemento modelo de la reacción del inducido será:



- **Autoinductancia de la armadura:**



De los cuatros modelos antes descritos se deduce la siguiente Ley de Kirchhoff:

$$V_\phi = E_A - I_A X_j - I_A X_{Aj} - I_A R_A$$

$$V_\phi = E_A - I_A (X + X_A) j - I_A R_A \quad X_S = X + X_A$$

Donde el voltaje en los bornes del generador será la fem calculada teórica (E_A), que se conocerá como voltaje interno generado, menos las caídas de tensión en la

resistencia y en las reactancias de autoinductancia y reacción del inducido. Que al estar en serie conforman una sola reactancia, llamada reactancia síncrona, dando lugar a la siguiente Ley de Kirchoff:

$$V_{\phi} = E_A - I_A X_s j - I_A R_A$$

Por tanto, el **circuito equivalente** que se deduce de ese LVK para el generador síncrono trifásico será el mostrado en la figura 2.1:

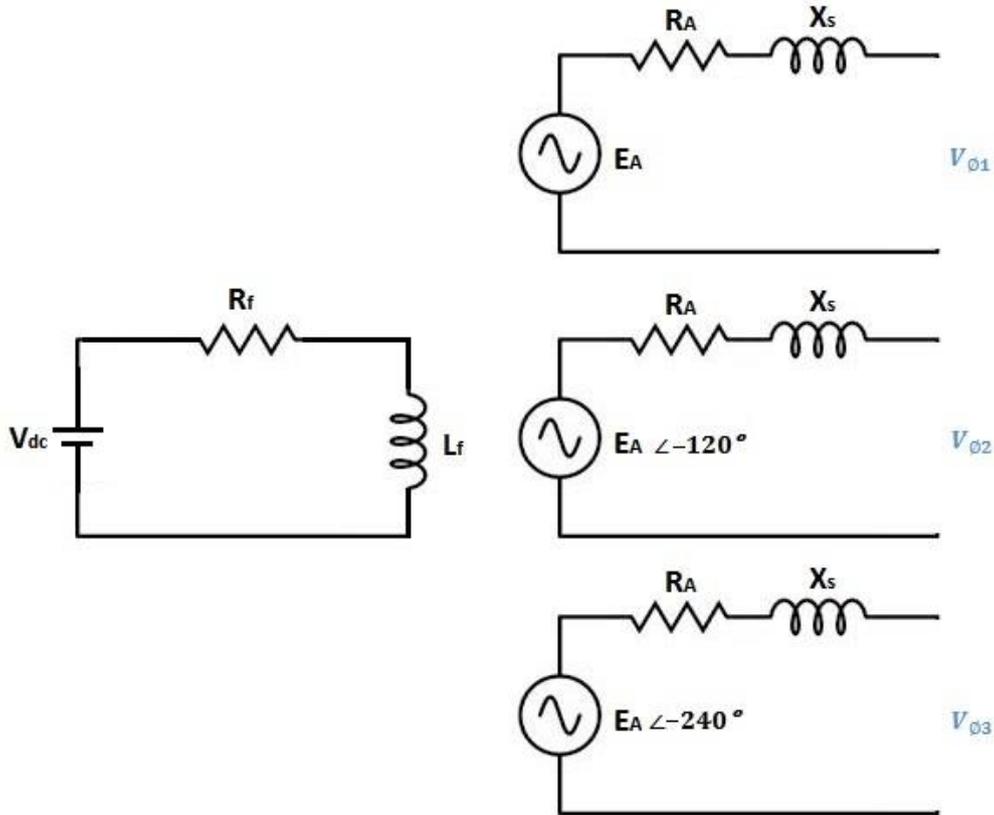


Figura 2.1. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico

En la figura 2.1 se incluye el circuito de campo que representa el devanado del rotor que se alimenta con corriente directa, ya sea concentrado para polos salientes o cilíndricos para devanados distribuidos. En este circuito rotórico se presenta la resistencia del devanado y la inductancia propia del mismo, al igual que la fuente de CD controlada que sería la excitatriz del generador.

El circuito equivalente por fase de un generador síncrono es:

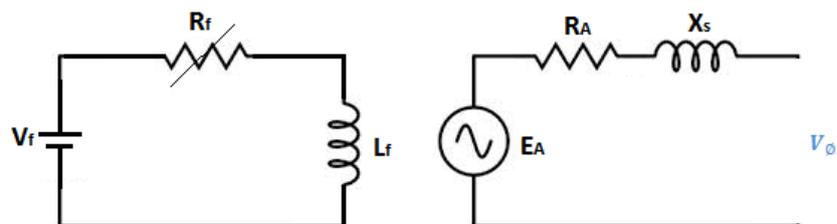


Figura 2.2. Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico.

4. Procedimiento

Parte 1. Ensayo en vacío

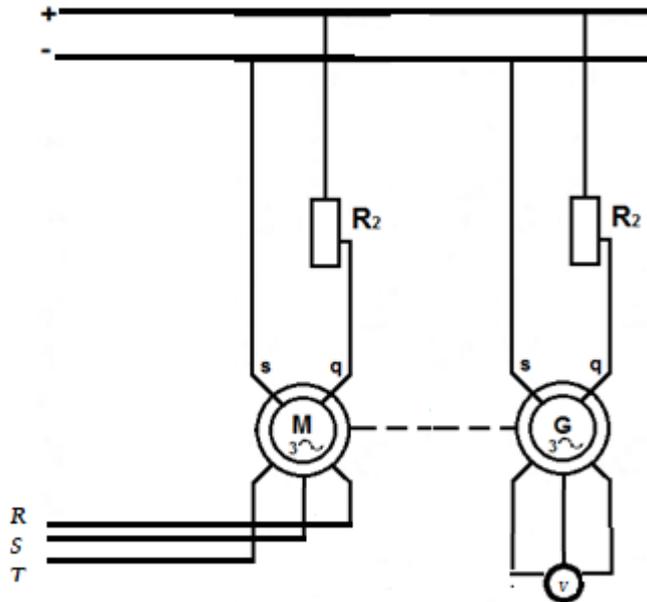


Figura 2.3. Esquema ensayo en vacío

1. Realizar el montaje del generador síncrono en vacío (figura 2.3) con tutoría del profesor.
2. Empezar a girar el motor primario hasta llegar a establecer la velocidad nominal de la máquina.
3. Colocar los instrumentos necesarios para medir V_L , I_f y W_m .
4. Variar la corriente de campo I_f desde cero hasta su valor nominal tomando el mayor número de mediciones posibles de I_f y V_L .
5. Registrar los datos en la tabla 1.

Tabla 1.

I_f														
E_a														

6. Realizar La grafica de V_L Vs I_f en papel milimetrado.

Parte 2. Ensayo de cortocircuito

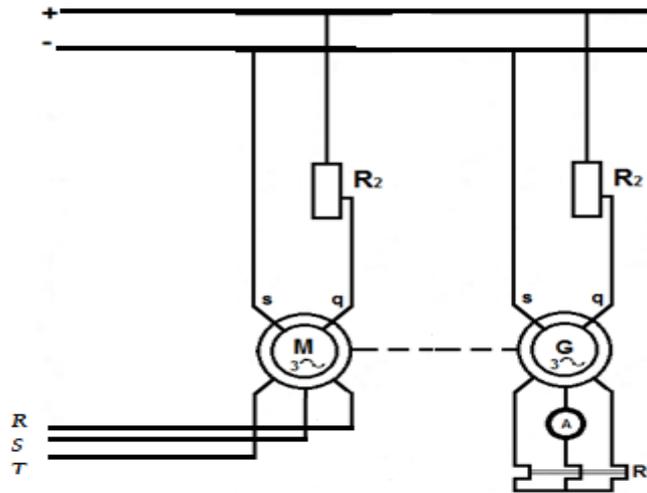


Figura 2.4. Esquema ensayo en corto circuito

8. Realizar el montaje del generador síncrono en cortocircuito con tutoría del profesor. Asegúrese que I_f sea cero al iniciar el ensayo.
9. Empezar a girar el motor primario hasta llegar a establecer la velocidad nominal de la máquina.
10. Colocar los instrumentos necesarios para medir I_L , I_f y W_m .
11. Variar la corriente de campo I_f desde cero hasta que verifique que el valor nominal de la corriente de armadura sale de la máquina. Asegúrese de tomar el mayor número de mediciones posibles de I_f y V_L .
12. Registrar los datos en la tabla 2.

Tabla 2.

I_f															
I_{cc}															

13. Realizar La grafica de I_{cc} Vs I_f en papel milimetrado.

Parte 3. Prueba DC

15. Establezca el tipo de conexión de los devanados de la maquina síncrona.
16. Aplique un voltaje en D.C a los bornes de salida del generador empiece a incrementarlo desde cero hasta 10 Vdc y mida la corriente en DC.
17. Registre los valores en la tabla 3.

Tabla 3.

Vd c															
I_{dc}															

Parte 4. Resistencia Síncrona y circuito equivalente

21. Basado en la información suministrada por las pruebas, establezca en valor de la Impedancia síncrona saturada y no saturada mediante una gráfica en papel milimetrado de Z Vs I_f , para esto registre los datos en la tabla 4.

Tabla 4.

I_f														
Z														

Tabla 5.

I_f														
Z														

23. Establezca y grafique el circuito equivalente de la máquina.

24. Elaborar conclusiones.

5. Conclusiones

6. Bibliografía

- FRAILE MORA, Jesús. (2003) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Quinta edición
- GUTIERRES PAUCAR, Agustín. (2000) "Teoría y análisis de máquinas eléctricas", Universidad nacional de Ingeniería, Lima Perú.
- CHAPMAN, Stephen J. (2000) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Tercera edición

PRACTICA 3: ARRANQUE MOTOR SÍNCRONO CON MOTOR AUXILIAR Y VARIADOR DE FRECUENCIA.

1. Objetivos

- Conocer y realizar el arranque de un motor síncrono con motor auxiliar.
- Conocer y realizar el arranque de un motor síncrono con variador de frecuencia.

2. Materiales

- Grupo motor generador síncrono
- Fuente AC 3 ϕ
- Multímetro
- Variador de frecuencia
- Cables de conexión

3. Marco Teórico

Arranque de los motores síncronos

En el arranque de un motor síncrono el rotor está estático y con el campo magnético, cuando el campo magnético del estator comienza a rotar a velocidad síncrona, por lo general una alta velocidad. Por lo que el campo estacionario del rotor no se alcanza entrelazar con este provocando grandes vibraciones en el motor y con ello el calentamiento del mismo debido a ello se deben emplear técnicas especiales para el arranque de los motores síncrono estas técnicas son tres de las cuales solo se llevaran a cabo las dos primeras.

- Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante un semiciclo de la rotación del campo magnético. Esto solo se puede lograr con la reducción de la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada. Para llevar a cabo esta técnica hoy en día es muy fácil por medio de los controladores de estado sólido para motores a fin de convertir una frecuencia de entrada constante en cualquier frecuencia de salida deseada.
- Utilizar un motor primario externo para acelerar el motor síncrono hasta velocidad síncrona, pasar por el procedimiento de entrada en sincronía y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagar o desconectar el motor principal para convertir la máquina síncrona en un motor.
- Utilizar devanados de amortiguamiento.

4. Procedimiento

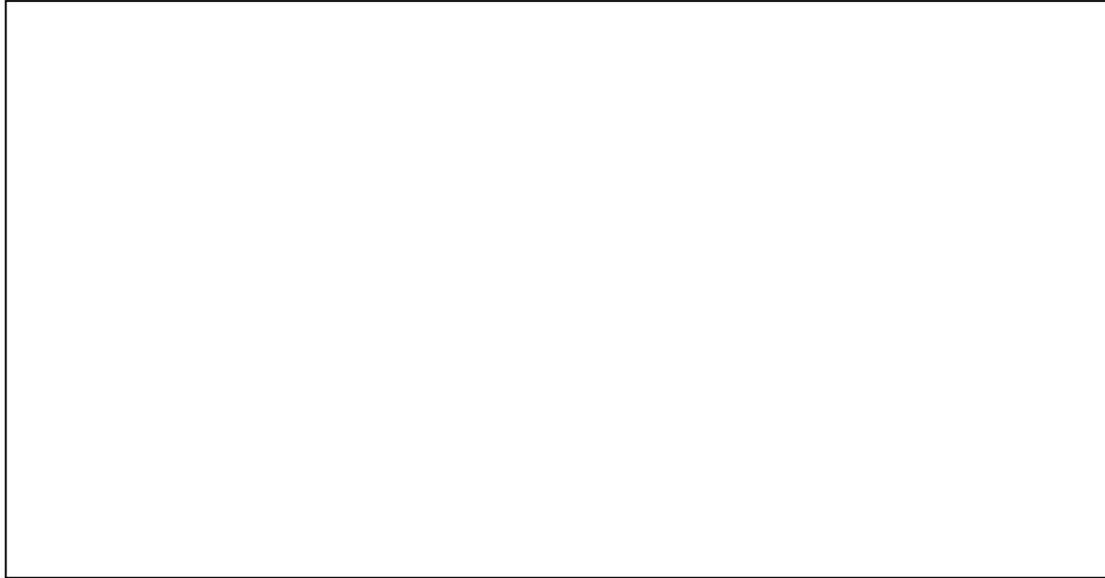
Arranque motor síncrono con motor auxiliar

1. Graduar la fuente CA al valor nominal del motor síncrono.
2. Graduar la excitatriz de alimentación el circuito de campo del motor síncrono a la mitad del valor nominal del mismo.
3. Realizar la conexión del motor síncrono y motor auxiliar de arranque del grupo motor a sus respectivas fuentes de alimentación.
4. Colocar en marcha el motor de arranque auxiliar y energizar el circuito del estator con la fuente de CA.
5. Energizar el circuito de campo del motor síncrono con la excitatriz a la mitad de su valor nominal y desenergizar el motor auxiliar. (realizar la energización y desenergización lo más simultáneamente).
6. Una vez sincronizado el motor aumentar el voltaje de la excitatriz al valor nominal del motor.

Arranque motor síncrono con variador de frecuencia

1. Graduar la fuente CA al valor nominal del motor síncrono.
7. Graduar la excitatriz de alimentación el circuito de campo del motor síncrono al valor nominal del mismo.
2. Realizar la conexión del motor síncrono a las fuentes de alimentación y variador de frecuencia.
3. Energizar y disminuir la frecuencia hasta un valor en que se pueda sincronizar el motor.
4. Una vez sincronizado el motor aumentar gradualmente la frecuencia hasta su valor nominal.

5. Conclusiones



6. Bibliografía

- FRAILE MORA, Jesús. (2003) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Quinta edición
- CHAPMAN, Stephen J. (2000) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Tercera edición

PRACTICA 4: CURVA V DEL MOTOR SÍNCRONO

1. Objetivos

- Realizar la curva v del motor síncrono.
- Analizar y observar el funcionamiento del motor síncrono como una carga inductiva, resistiva y capacitiva.

2. Materiales

- Fuente trifásica
- Amperímetro
- Grupo motor generador síncrono
-

3. Marco Teórico

Efecto de cambios de la corriente de campo en los motores síncronos

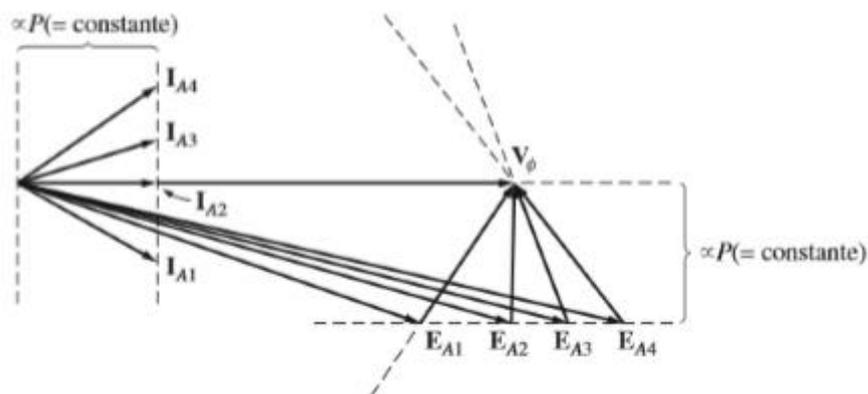


Figura 4.1. Efecto del incremento de la corriente de campo en la operación de un motor síncrono

Como se puede apreciar en la figura 4.1 conforme se incrementa el valor de E_A , la magnitud de la corriente en el inducido I_A primero disminuye y luego se incrementa. Con un E_A bajo, la corriente en el inducido está en retraso y el motor es una carga inductiva. Actúa como una combinación de inductor y resistor y consume potencia reactiva Q . A medida que se incrementa la corriente de campo, la corriente en el inducido a la larga se alinea con V_ϕ y el motor parece puramente resistivo. Si se incrementa la corriente de campo aún más, la corriente en el inducido está en adelanto y el motor se convierte en una carga capacitiva. Ahora actúa como una combinación de capacitor y resistor, consume potencia reactiva negativa $-Q$ o, alternativamente, suministra potencia reactiva Q al sistema.

En la figura 4.2 se muestra una gráfica de I_A versus I_F de un motor síncrono. Esta gráfica se llama curva en V del motor síncrono, por la obvia razón de que tiene la forma de esa letra.

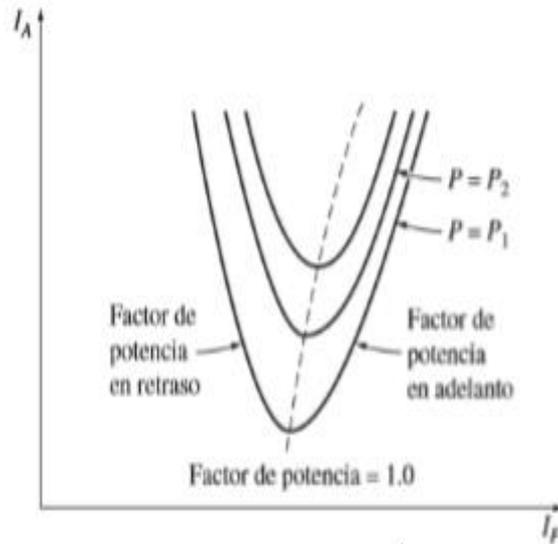


Figura 4.2. curva v del motor síncrono

Hay muchas curvas en V que corresponden a diferentes niveles de potencia real. En cada curva, la corriente mínima del inducido se presenta con un factor de potencia unitario cuando sólo se suministra al motor potencia real. En cualquier otro punto de la curva se suministra alguna cantidad de potencia reactiva, ya sea al motor o desde el motor.

En general para que un motor síncrono opere como una carga inductiva este se debe subexcitar y para que opere como una carga capacitiva se debe sobreexcitar

4. Procedimiento

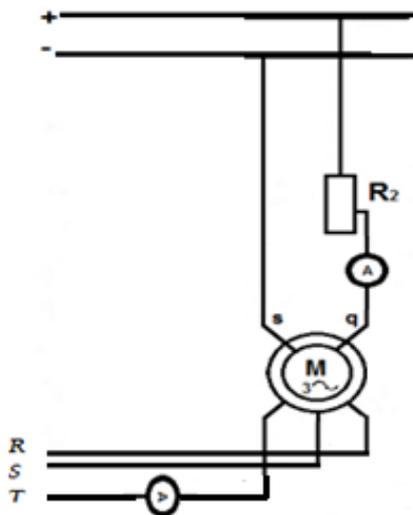


Figura 4.3. Esquema de conexión para realizar la curva v del motor síncrono

1. Realizar el montaje del esquema de la figura 4.3.
2. Una vez puesto en marcha el motor disminuir y aumentar la corriente de excitación y tomar datos de los valores de los amperímetros, registrar en la tabla 1.

Tabla1.

I_f												
I_A												

3. Realizar la gráfica de I_A vs I_F .

5. Conclusiones

6. Referencias

- FRAILE MORA, Jesús. (2003) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Quinta edición
- CHAPMAN, Stephen J. (2000) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Tercera edición

PRACTICA 5: Conexión del generador síncrono en paralelo con un sistema de potencia en operación.

1. Objetivos

- Conocer las condiciones requeridas para conectar un generador síncrono con un sistema de potencia en operación.
- Realizar el procedimiento y conectar el generador síncrono con un sistema de potencia en operación.

2. Materiales

- Fuente trifásica
- Multímetro
- Grupo motor generador síncrono
- Tres lámparas.

3. Marco Teórico

Condiciones requeridas para que un generador operar en paralelo con un sistema de potencia.

La figura 1 muestra un generador síncrono G1 que suministra potencia a una carga con otro generador G2 a punto de conectarse en paralelo con G1 por medio del cierre del interruptor S1. Para poder cerrar el interruptor de y conectar los dos generadores se deben cumplir unas condiciones ya que, si el interruptor se cierra de manera arbitraria en cualquier momento, es posible que los generadores se dañen severamente y que la carga pierda potencia. Si los voltajes no son exactamente iguales en cada uno de los generadores que se conectarán juntos, habrá un flujo de corriente muy grande cuando se cierre el interruptor. Para evitar este problema, cada una de las tres fases debe tener exactamente la misma magnitud de voltaje y ángulo de fase que el conductor al que se conectará. En otras palabras, el voltaje en la fase a debe ser exactamente igual al voltaje en la fase a' y así en forma sucesiva para las fases b-b' y c-c'. Para lograr lo anterior, se deben cumplir las siguientes condiciones de puesta en paralelo:

1. Los voltajes de línea rms de los dos generadores deben ser iguales.
2. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
3. Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales.
4. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación, debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación.

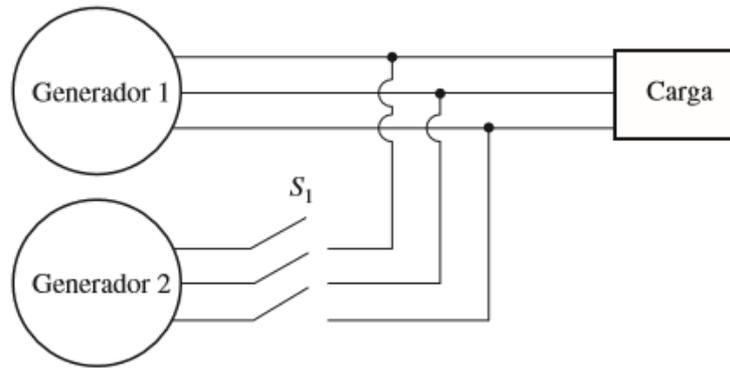


Figura 5.1. Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación

La secuencia de fase entre el generador y el sistema de potencia se puede revisar de muchas maneras. Una de ellas es conectar alternativamente un pequeño motor de inducción a las terminales de cada uno de los dos generadores. Si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones, entonces la secuencia de fase es la misma. Si el motor gira en direcciones opuestas, entonces las secuencias de fase son diferentes y se deben invertir dos de los conductores del generador en aproximación. Si no se cuenta con un motor una segunda alternativa es usar el método de las tres lámparas. En este método, se conectan tres lámparas a través de las terminales abiertas del interruptor que conecta el generador al sistema, como se muestra en la figura 2. Conforme la fase cambia entre los dos sistemas, las lámparas lucirán primero brillantes (una gran diferencia de fase) y luego tendrán una luz tenue (una diferencia de fase pequeña). Si las tres lámparas lucen brillantes y se apagan al mismo tiempo, los sistemas tienen la misma secuencia de fase. Si las lámparas lucen brillantes sucesivamente, los sistemas tienen secuencias de fase opuestas y se debe invertir una de las secuencias. para saber cuándo los dos sistemas están por fin en fase, una manera sencilla es observar las tres lámparas Cuando se apagan las tres lámparas, la diferencia de voltajes a través de ellas es cero y los sistemas están en fase. Este sencillo esquema funciona, pero no es muy exacto. Un método mejor es la utilización de un sincronoscopio.

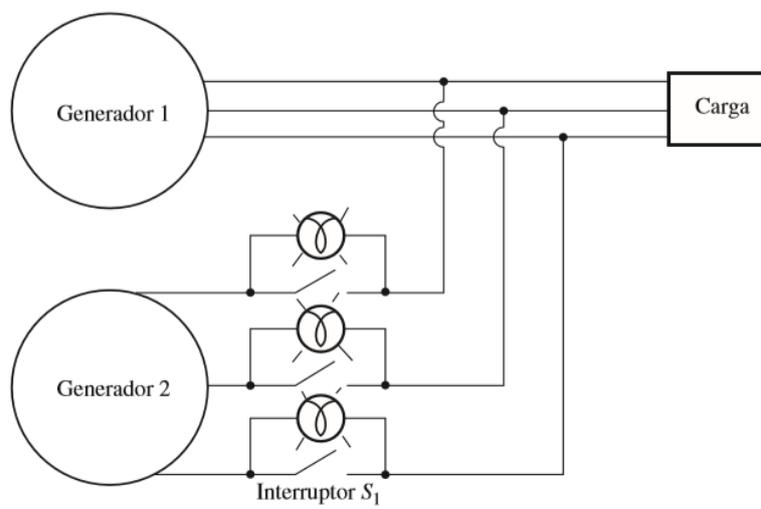


Figura 5.2. Esquema de conexión método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase

4. Procedimiento

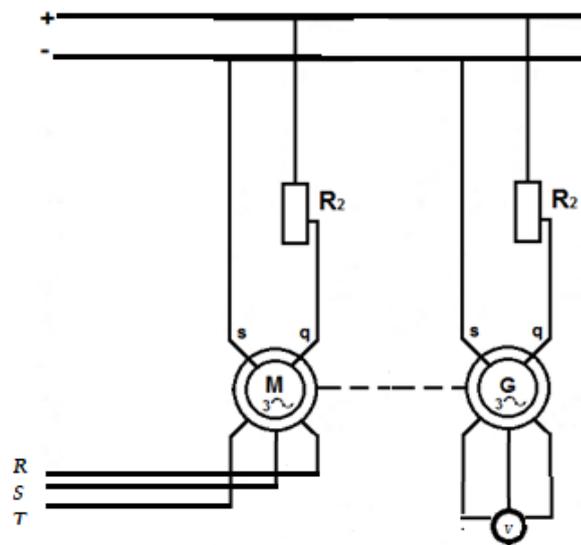


Figura 5.3. Esquema de conexión del grupo motor generador.

1. Realizar la conexión del grupo motor generador como se muestra en el esquema de la figura 5.3 con tutoría del profesor.
2. Realizar el arranque del grupo motor síncrono.
3. Por medio de voltímetros ajustar la corriente de campo del generador en aproximación hasta que su voltaje en las terminales sea igual al voltaje en línea del sistema en operación.
4. Realizar la conexión del esquema de la figura 5.2. Para comparar la secuencia de fase del generador con el sistema de potencia.
5. Observar las tres lámparas si estas lucen brillantes y se apagan al mismo tiempo, los sistemas tienen la misma secuencia de fase. Si las lámparas lucen brillantes sucesivamente, los sistemas tienen secuencias de fase opuestas y se debe invertir una de las secuencias invirtiendo dos de los conductores del generador en aproximación.
6. Medir la frecuencia del generador en aproximación y comprobar que esta es levemente mayor que la del sistema.
7. Observar las tres lámparas, cuando se apaguen las tres lámparas, la diferencia de voltajes a través de ellas es cero y los sistemas están en fase y es cuando se cierra el interruptor que conecta los dos sistemas.

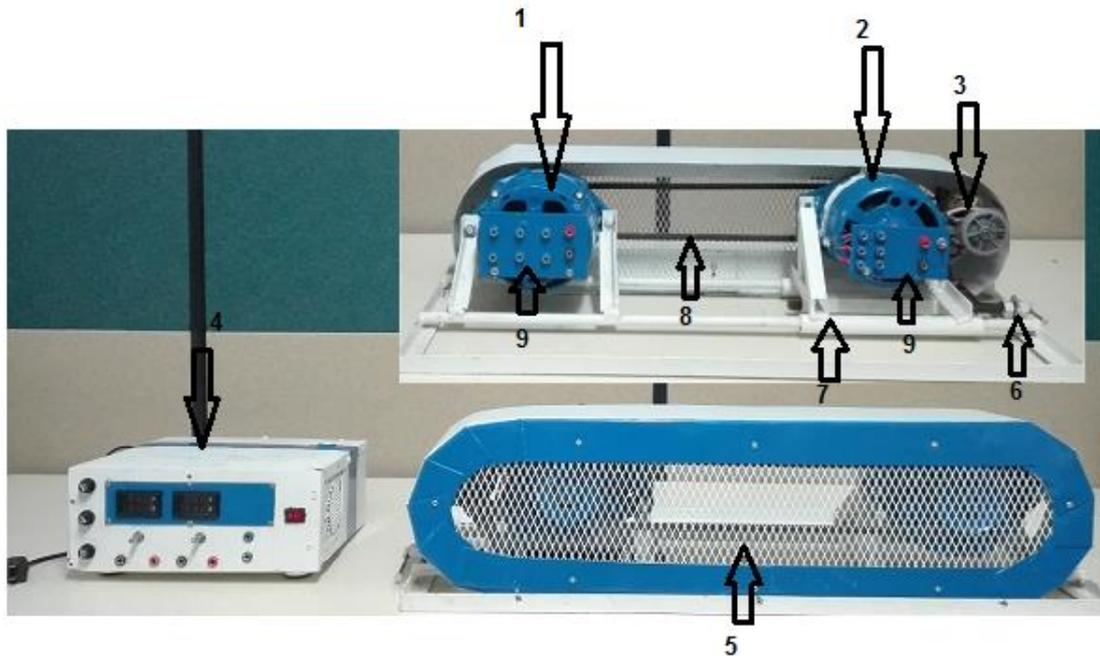
5. Conclusiones

6. Referencias

- FRAILE MORA, Jesús. (2003) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Quinta edición
- CHAPMAN, Stephen J. (2000) "Maquinas eléctricas", McGraw-Hill Tercera edición

- Manual de funcionamiento del módulo.

Partes el grupo motor generador

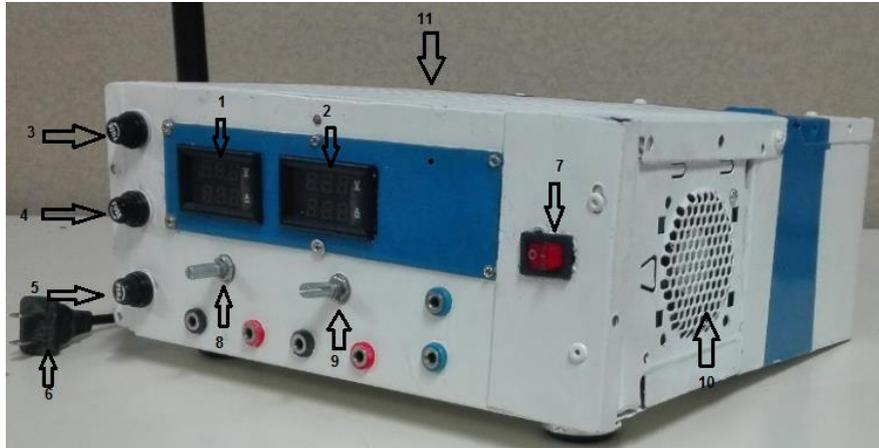


1. Generador sincrónico
2. Motor sincrónico
3. Motor auxiliar de arranque
4. Fuente de CD excitatriz de las maquinas
5. Protector contra la correa y aspas de los ventiladores de las maquinas
6. Tornillo de ajuste de la correa
7. Estructura de soporte
8. Correa de acoplamiento
9. Tablero de borneras de conexión de las maquinas

Procedimiento de puesta en marcha del grupo motor generador

1. Conectar el circuito de campo del motor y el generador a la fuente de cd.
2. Conectar el motor a una fuente trifásica no exceder valor nominal de alimentación tener en cuenta de conectar fases comunes entre fuente y motor.
3. Conectar motor auxiliar de arranque
4. Energizar fuente de CD y ajustar voltaje de campo a el valor nominal del motor.
5. Dejar el voltaje de campo del generador en cero 0 voltios.
6. Energizar y colocar en marcha el motor auxiliar de arranque.
7. Energizar con la fuente trifásica el motor sincrónico y apagar el motor auxiliar de arranque.
8. Si no se logra la sincronización del motor realizar nuevamente paso 6 y 7.
9. Justar el voltaje campo del generador al valor deseado.

Partes de la fuente de CD o excitatrices de las maquinas síncronas.



1. Indicador de voltaje y corriente del canal 1.
2. Indicador de voltaje y corriente del canal 2.
3. Fusible totalizador de la fuente valor 1 A.
4. Fusible del canal 1 valor 3 A.
5. Fusible del canal 1 valor 5 A.
6. Cable de conexión
7. Interruptor de encendido y apagado
8. Perilla del canal 1
9. Perilla del canal 2
10. Rejilla de succión de aire fresco del ventilador.
11. Rejilla de salida del aire succionado por el ventilador.

Recomendaciones:

- No obstaculizar las entradas y salidas de aire de refrigeración de la fuente.
- Llevar siempre las perillas de la fuente a cero voltios cuando se va a conectar o desconectar de las maquinas.
- No obstaculizar las entradas y salidas de aire de refrigeración de las maquinas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, Bogota: McGRAW-HILL/Interamericana, 2012.
- [2] J. F. Mora, Máquinas eléctricas, Santafe de Bogota: McGRAW-HILL/Interamericana, 2003.
- [3] J. C. Pineda Orellana, Sistemas digitales de control de la excitación (decs) y regulación primaria de voltaje en generadores eléctricos, trabajo para optar por el titulo de ingeniero mecánico electricista, Guatemala, 2004.
- [4] D. Colome, Estabilida en sistemas eléctricos de potencia, Argentina.
- [5] D. S. Martín, «Máquina Síncrona,» de *Máquinas eléctricas de corriente alterna*, Madrid, OCW, 2011, pp. 64-70.
- [6] E. Harper, Elementos de Centrales Eléctricas, México: LIMUSA, S.A, 1983.
- [7] A. Nachez, Aplicaciones de la conversión CC-CC fuentes conmutadas, Rosario.
- [8] J. M. Morales Hernandes, Diseño de fuentes de corriente directa, Universidad Autonoma de Mexico, 2003.
- [9] A. P. Alamos, Analisis de perdidas del convertidor buck sincrono para aplicaiones moviles., Cuernavaca,Morelos, 2007.