

Dispositivo electrónico para controlar la frecuencia en un motor monofásico de corriente alterna

Electronic device to control the frequency in a single-phase AC motor

Juan David Álvarez Castro¹, Oscar Araque de los Rios², Yvonne Merino³,

Facultad de Ingeniería, Universidad de Ibagué, Colombia

Correo-e¹: 2120102028@estudiantesunibague.edu.co

Correo-e²: oscar.araque@unibague.edu.co

Correo-e³: yvonne.merino@unibague.edu.co

Resumen— En los requisitos de las industrias y talleres modernos, un controlador de velocidad ofrece la flexibilidad para mejorar el comportamiento de un motor que los circuitos comunes de encendido / apagado no permiten. En estos escenarios, los tiristores son ampliamente utilizados para controlar la corriente alterna, ya que cuando se activan correctamente su pérdida de potencia es mínima debido a la trayectoria de baja resistencia entre ánodo y cátodo, también los componentes externos son mínimos y menos complejos, lo convierten en el dispositivo perfecto Para una aplicación de bajo coste tal como control de velocidad de un motor universal. Es por eso que implementamos un controlador de velocidad para un motor monofásico de 1200W.

Palabras clave— Diac, motor, potencia, Tiristor, TRIAC, SCR, snubber, variador.

Abstract— In the requirements of modern industries and workshops a speed controller offers the flexibility to improve the behavior of a motor that common on/off circuits doesn't allow. In these scenarios the thyristor are widely used to control the AC, power, because when they are properly activated their power loss is minimal due to the low resistance path between anode and cathode, also the external components are minimal and less complex, make them the perfect device for low cost application such a speed control of an universal motor. That is why we implement a speed controller for an 1200W single-phase universal motor.

Key Word — Diac, motor, power, Tiristor, TRIAC, SCR, snubber, variator.

I. INTRODUCCIÓN

En este documento se describe la implementación de un controlador análogo tradicional para variar la potencia en un motor monofásico universal mediante el ajuste por fase con el uso de un TRIAC (triodo para corriente alterna) [2] como

interruptor AC de corriente alterna, necesario para el control de velocidad en 2 direcciones en una mesa simuladora de sismos. Este circuito electrónico suele estar incorporado en herramientas eléctricas inductivas y resistivas en áreas industriales y domesticas como sierras, taladros y bombillas incandescentes. Sin embargo, algunas herramientas eléctricas monofásicas de bajo costo no poseen este circuito, para ellas es conveniente agregar un circuito variador de potencia que permita pasar de una única velocidad (fully on/fully off) a un rango de velocidades, con este circuito el usuario define la potencia de operación de la carga, para estos casos el variador implementado es una solución económica y confiable.

Las mesas simuladoras de sismos requieren de control independiente en sus grados de libertad para reproducir movimientos sísmicos, de lo contrario, sería imposible reproducir situaciones específicas para efectos de estudio.

En la institución se cuenta con una estructura diseñada para simular sismos con 2 grados de libertad (eje X, eje Y) la cual cuanta con 1 motor para cada eje, como se observa en la Figura 1, 2 motor monofásico de corriente alterna con una potencia máxima de 550W, los cuales, por no poseer un control de velocidad, surge la necesidad del diseño e implementación de un dispositivo capaz de realizar el control de la misma, junto con encendidos individuales y una parada de emergencia.



Figura. 1. Estructura simuladora de sismos

II. CONTENIDO

Uno de los dispositivos electrónicos que permiten controlar la corriente con su paso total o nulo son los tiristores, estos tienen la ventaja de tener pérdidas por calor mínimas, casi nulas en la práctica si se manejan los parámetros adecuados, pues la resistencia entre ánodo y cátodo es mínima en estado encendido, lo cual los hace comportarse como un interruptor ideal para corrientes alternas [8].

A. Tiristores

Teniendo en cuenta la utilidad que se le da a los tiristores para el control de velocidad de los motores eléctricos, a continuación, se pretende mostrar más a fondo varios tipos de estos, los cuales además de su construcción de 4 capas, actúan como circuitos abiertos capaces de soportar cierto voltaje nominal hasta que son disparados. Donde se encienden y se convierten en trayectorias de baja resistencia para la corriente y permanecen así, incluso después de que desaparece el disparo, hasta que la corriente se reduce a un cierto nivel o hasta que son apagados, según el tipo de dispositivo.

Un tiristor es un semiconductor con una configuración de cuatro capas (p y n) con conexiones externas en tres o dos de sus capas [3]. Un ejemplo de tiristores son el SCR, TRIAC y DIAC entre otros [7]; Su estructura se asemeja a un arreglo de un transistor PNP con un NPN como se muestra en la Figura. 2.

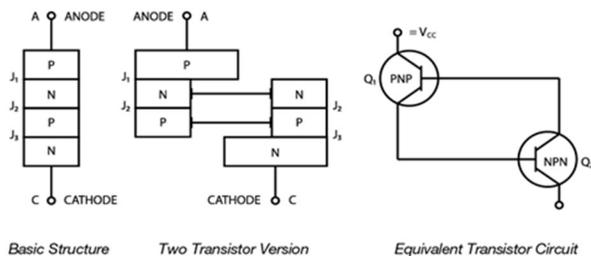


Figura. 2. Estructura de un SCR [3]

El diodo de 4 capas

El tiristor básico es un dispositivo de 4 capas con dos terminales: ánodo y cátodo. Está construido con cuatro capas semiconductoras que forman una estructura pnpn. El dispositivo actúa como un interruptor y permanece apagado hasta que el voltaje en directa alcanza cierto valor; luego se enciende y conduce. La conducción continúa hasta que la corriente se reduce por debajo de un valor específico. Aun cuando el diodo de 4 capas rara vez se utiliza en diseños nuevos, los principios forman la base de otros tiristores mencionados a continuación [8].

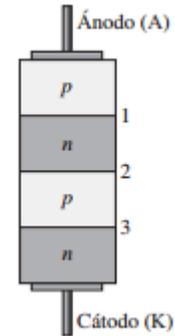


Figura. 3. Diodo de 4 capas [8]

El rectificador controlado de silicio (SCR)

Del mismo modo que el diodo de 4 capas, el SCR tiene dos estados posibles de operación. En el estado apagado, actúa idealmente como circuito abierto entre el ánodo y el cátodo; en realidad, en lugar de una abertura, existe una resistencia muy alta. En el estado encendido, el SCR actúa idealmente como un cortocircuito del ánodo al cátodo; en realidad, existe una pequeña resistencia en el estado encendido (en directa). El LASCR opera como SCR excepto cuando es activado por luz.

Un SCR (rectificador controlado de silicio, silicon-controlled rectifier) es un dispositivo PNP de 4 capas similar al diodo de 4 capas, pero con tres terminales: ánodo, cátodo y compuerta, como se muestra en la figura 4.

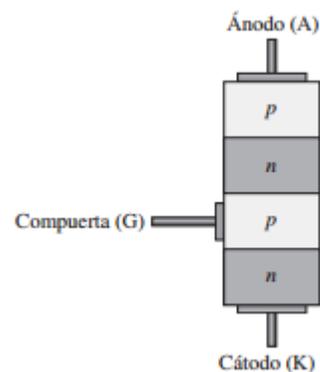


Figura. 4. Rectificador controlado de silicio (SCR) [8]

El interruptor controlado por silicio (SCS)

El interruptor controlado de silicio (SCS) es similar en construcción al SCR. El SCS, sin embargo, tiene dos terminales compuerta, la compuerta cátodo y la compuerta ánodo. El SCS puede ser encendido o apagado con cualquiera de las terminales compuerta. Recuerde que el SCR sólo puede ser encendido por su terminal compuerta. Normalmente, el SCS está disponible en valores nominales de potencia menores que las del SCR.

El interruptor controlado de silicio (SCS) es similar en construcción al SCR. El SCS, sin embargo, tiene dos terminales compuerta, la compuerta cátodo y la compuerta ánodo. El SCS puede ser encendido o apagado con cualquiera de las terminales compuerta. El SCR sólo puede ser encendido por su terminal compuerta. Normalmente, el SCS está disponible en valores nominales de potencia menores que las del SCR [8].

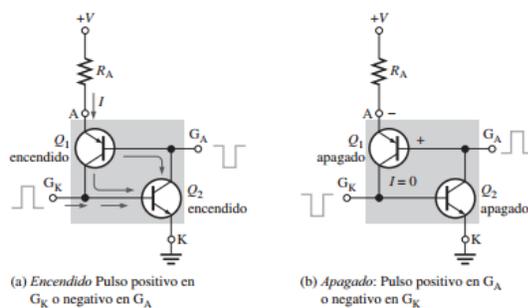


Figura. 5. Operación de un SCS [8]

El DIAC y el TRIAC

Tanto el DIAC como el TRIAC son tipos de tiristores que conducen corriente en ambas direcciones (bilateral). La diferencia entre los dos dispositivos es que el DIAC tiene dos terminales, mientras que el TRIAC tiene una tercera terminal, la cual es la compuerta para disparo. El DIAC funciona básicamente como dos diodos de 4 capas en paralelo dispuestos en direcciones opuestas. El TRIAC funciona básicamente como dos SCR en paralelo dispuestos en direcciones opuestas con una terminal compuerta común [8].

El DIAC

Un DIAC es un dispositivo semiconductor de cuatro capas y dos terminales (tiristor) que conduce corriente en una u otra dirección cuando se activa. La construcción básica y símbolo esquemático de un DIAC se muestran en la figura 11-24. Observe las dos terminales, designadas A1 y A2. Las capas superior e inferior contienen tanto materiales n como p. El lado derecho de la pila se considera como una estructura pnpn con las mismas características de un diodo de cuatro capas,

mientras que el lado izquierdo es un diodo de cuatro capas invertido que tiene una estructura npnp.

El TRIAC

Un TRIAC es como un DIAC con una terminal compuerta. Un TRIAC puede ser disparado por un pulso de corriente en la compuerta y no requiere voltaje de ruptura para iniciar la conducción, como el DIAC. Básicamente, se puede pensar en un TRIAC simplemente como dos SCR conectados en paralelo y en direcciones opuestas con una terminal común, la compuerta. A diferencia del SCR, el TRIAC puede conducir corriente en una u otra dirección cuando es activado, según la polaridad del voltaje a través de sus terminales A1 y A2. La figura 6 muestra la construcción básica y el símbolo esquemático de un TRIAC.

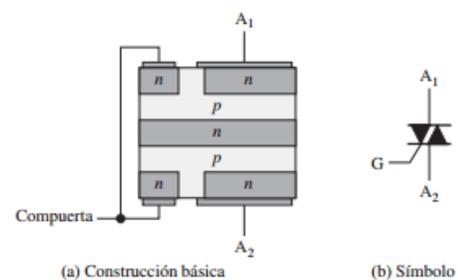


Figura. 6. Estructura de un TRIAC [6]

Un rectificador controlado de silicio (SCR) difiere con el diodo de corriente alterna (DIAC) y el tríodo para corriente alterna (TRIAC), en que los dos últimos son tiristores bidireccionales pues pueden conducir corriente en ambas direcciones. Las Diferencias entre el TRIAC y DIAC es que el TRIAC permite ser disparado por una señal en la puerta (gate) y está compuesto por dos SCR en paralelo, mientras que el DIAC se dispara automáticamente, tras haberse superado su tensión de disparo.

En un TRIAC cuando la corriente y voltaje en la compuerta (gate) es igual o supera el nivel de disparo (50 mA y 1.3 V para el BTA41) [4] se enciende y la conexión ánodo-cátodo pasa de alta impedancia a baja resistencia y se mantienen así, incluso después de remover los niveles de disparo. Para un apagado del TRIAC se pueden usar varios métodos como la desconexión de la fuente, cortocircuito entre ánodo – catado y voltaje negativo en la compuerta [7].

B. El control por fase

El control por fase es la forma más común de un control de potencia con tiristores, consiste en disparar el tiristor en determinados momentos de la onda, a diferentes ángulos como se muestra en la Figura. 7; Estas fases de disparo resultan en conducción (parte sombreada) que se ve reflejado

en el motor como una variación de potencia y por ende de velocidad [1].

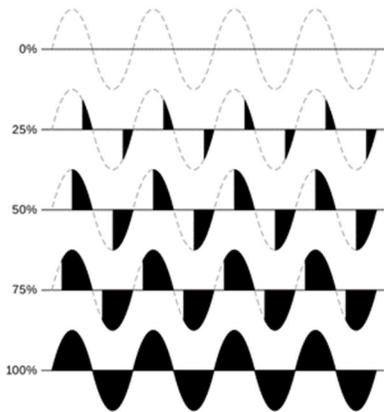


Figura. 7. Disparo con cruce por cero para un PFC

C. Red de Snubber

Los interruptores son el corazón de cada convertidor de potencia, su funcionamiento determinará directamente la fiabilidad y la eficiencia del producto. Para mejorar el rendimiento del circuito de conmutación de los convertidores de potencia, los snubbers se colocan a lo largo de los interruptores para suprimir los picos de voltaje y amortiguar la oscilación transitoria provocada por la inductancia del circuito cuando se abre un interruptor [2]. Por lo tanto se requiere de una red de snubber que es un circuito que absorbe energía, suprime las transientes de voltaje generadas por cargas inductivas en la desconexión eléctrica o mecánica, los cuales son implementadas mayormente en cargas inductivas.

La red de snubber implementada es de tipo RC, esta se conecta en paralelo al tiristor para prevenir activaciones erróneas y daños potenciales en el mismo. Esta red de snubber fue diseñada teniendo en cuenta lo planteado en [2].

En la cual se asume una fuente con impedancia despreciable y una corriente máxima de corriente por la red de snubber, con esto se aproximan los cálculos a la ley de ohm.

D. Aplicación de un tiristor para el control de potencia

Un circuito para el control de potencia usando tiristores es mostrado en Figura. 8. este circuito ofrece un control de onda completa y posee cuatro componentes entre ellos dos tiristores, el primero es el DIAC el cual dispara el TRIAC acorde al voltaje del DIAC seleccionado, el segundo es el TRIAC encargado de conducir y conectar la carga principal. Además, incluye dos resistencias variables R1 y R2 y un capacitor C1 para modificar el ángulo de disparo.

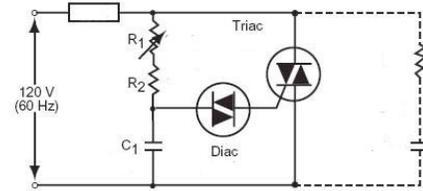


Figura. 8. Diagrama esquemático del controlador básico de potencia con una red de snubber; La red de snubber se puede remover si la carga es resistiva [2].

E. Funcionamiento básico

Los componentes R1, R2 y C1 forman una red de atraso. Cuando el voltaje a través de C1 alcanza la tensión de disparo del DIAC, C1 se descarga parcialmente a través del DIAC hacia la compuerta del TRIAC (gate). El TRIAC entra en modo de conducción y se mantiene en el semi-ciclo positivo y luego en el negativo, cumpliendo el modo de control por fase [7].

III. IMPLEMENTACIÓN

El circuito es implementado con la adición de un inductor toroidal en serie a la carga como recomendación de [1], sin embargo, se determinó que las características que este elemento ofrecía al circuito eran despreciables y por ende se retiró.

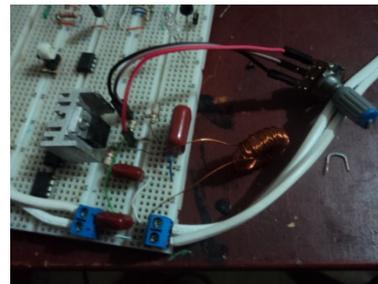


Figura. 9. Primera implementación del circuito

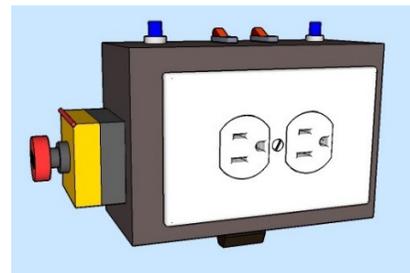


Figura. 10. Diseño 3D del dispositivo

Una vez realizadas las pruebas se determinan y ajustan los valores finales de capacitancia y resistencia. El TRIAC BTA41 se seleccionó teniendo en cuenta la cantidad de corriente RMS (valor eficaz) o corriente efectiva que necesita el motor, la cual es de aproximadamente 10 amperios en voltajes pico y que para el dispositivo es de 41 amperios.

Cantidad	Elemento	Valor
2	R1	250k
2	R2	3.3k
2	C1	0.1uF
2	C2	0.1uf
2	TRIAC	BTA41
2	DIAC	DB4

Tabla. 1. Lista de componentes para el circuito

A. Proceso de construcción

1. Impresión del circuito en la baquelita

En este proceso se utilizó una hoja de acetato transparente, la cual fue grabada con una impresora láser. Para posteriormente agregar calor por medio de una plancha y así lograr que la tinta impregnara el cobre de la baquelita.



Figura. 11. Baquelita de fibra de vidrio con acetato impreso

2. Aplicación de cloruro férrico

Se agregaron 250 gramos de cloruro férrico en 500ml de agua a 50°C para disolver el ácido más rápidamente y así lograr crear el circuito deseado, solo dejando el cobre que está cubierto por la tinta

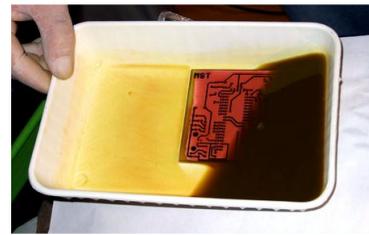


Figura. 12. Disolución de baquelita en ácido férrico [6].

3. Pulido y perforación de la baquelita

Se prepara la tarjeta para permitir la instalación de los componentes, como resistencias, capacitores, potenciómetros, etc. Se hacen las perforaciones con una broca de 1/32"



Figura. 13. Diseño de tarjeta madre impresa

4. Aplicación de película protectora para el circuito

Se aplicó una pintura la cual se activa mediante luz ultravioleta, con el uso de leds. Esta película se aplica con el fin de prevenir la corrosión en el circuito y además agregar más resistencias a las pistas.



Figura. 14. Fijación de película protectora con luz UV

5. Fijación de componentes

Se procedió a soldar algunos de los componentes principales para proceder a instalar el circuito dentro de la caja diseñada.



Figura. 15. Tarjeta madre con componentes instalados

6. Preparación de caja de control

Se agregaron 2 interruptores para el control individual del encendido de cada motor, una parada de emergencia y 2 disipadores de calor para los tiristores, mediante el uso de un Dremel 3000.



Figura. 16. Caja protectora del circuito

IV. RESULTADOS

Mediante la implementación del circuito, se obtuvo una amplia resolución de potencia, sin embargo la variación de está presenta una histéresis en los niveles de disparo, esto sucede cuando el capacitor C1 incrementa su nivel de voltaje hasta que dispara el DIAC a un punto A, al final del ciclo el voltaje del capacitor disminuye a cierto nivel diferente de la condición inicial haciendo que el siguiente disparo suceda en punto B, la diferencia entre A y B no se nota debido a la inercia del motor, sin embargo es notoria cuando la carga es una bombilla.



Figura. 17. Implementación del circuito junto con el interruptor de seguridad

Se obtuvo el control individual de la velocidad de dos motores monofásicos de corriente alterna de 550 W cada uno, por lo cual se logró tener control sobre esta, mediante el uso de dos potenciómetros como se observa en la Imagen 7.



Figura. 18. Unidad de control para variar la velocidad de los motores

V. CONCLUSIONES

El dispositivo implementado puede ser usado tanto en aplicaciones de motores universales menores o iguales a 1200W como en cargas resistivas de igual potencia como un calentador o plancha.

El control de una carga inductiva requiere selecciones críticas en cuanto circuitos de disparo, el implementado es un ejemplo práctico y funcional de un circuito de disparo sin embargo tiene limitaciones como una realimentación pobre.

Los momentos de disparo están en función de un voltaje y no de un tiempo posterior al cruce por cero. Para solventar esto se propone un controlador digital con detector de cruce por cero para sincronizar los disparos y obtener mejor resolución.

Cuando los dos motores están en su carga máxima, el flujo de corriente hace calentar las pistas de cobre a tal punto que podrían afectar la integridad de estas, por lo cual se hizo necesario reforzar la pista de cobre con estaño y el uso de una baquelita de fibra de vidrio.

El uso del cableado correcto tiene que ser tomado en cuenta si se pretende escalar el circuito, ya sea para aplicaciones de menor o mayor potencia, teniendo en cuenta que se podría producir un corto circuito y posteriormente afectar la integridad de todo el dispositivo.

En un futuro se podría adaptar un panel LCD para los potenciómetros, el cual indique el porcentaje donde se encuentra la resistencia, en lugar del método visual como está funcionando actualmente.

El dispositivo supone una alternativa económica a una necesidad ya resuelta con dispositivos de mayor costo, cumpliendo con lo requerido de una forma eficiente y significando un gran ahorro.

RECOMENDACIONES

Los autores de este trabajo agradecen a la dirección de investigaciones de la Universidad de Ibagué por el apoyo prestado para el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

[1]. Littelfuse. "Phase Control Using Thyristors," *IEEE* [Online]. AN 1003 article, 2013 Available: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/switching_thyristors/littelfuse_thyristor_phase_control_using_thyristors_application_note.pdf.pdf

[2]. T. Ave., Lincolnwood, "INC, RC SNUBBERS (SMPS)," *IEEE* [Online]. Illinois Capacitor, Inc. Available: https://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/RC_snubber.pdf

[3]. J. Noblitt, MAEd, CBET (2013, Dec.). " ICC Prep: Still More Electronics – Thyristors," *IEEE* [Online]. 24x7 Magazine. N.p. Available: <http://www.24x7mag.com/2013/12/icc-prep-still-more-electronics-thyristors/>

[4]. Jameco Electronics "STMicroelectronics, BTA40, BTA41, BTB41 datasheet," *IEEE* [Online]. article, 2005. Available: <http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1384579.pdf>

[5]. Fairchild Semiconductor, contributed, Digi-Key Electronics, "Resistor-Capacitor (RC) Snubber Design for Power Switches," article, 2014 [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/aug/resistor-capacitor-rc-snubber-design-for-power-switches>

[6]. Balbuena. F. (2007) Campus Party - Valencia. Robotic-Lab, "Como fabricar circuitos impresos," [Online]. Available: <http://www.robotic-lab.com/blog/tutoriales/como-fabricar-circuitos-impresos/>

[7]. STMicroelectronics, "TRIAC analog control circuits for inductive loads," AN308 Application note. [Online]. Available: <http://www.datelec.fr/secteur/ST%20AN308.pdf>

Referencias de libros:

[8]. Floyd, T. L. "Electronic devices," *Conventional Current Version*. (9th ed) Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 2002 p. 565 – 590.