UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SISTEMAS DE RECUPERACION DE ENERGIA EN MOTORES DE INDUCCION DE ROTOR DEVANADO CON REGULACION DE VELOCIDAD

POR
ING. EMILIO GONZALEZ ELIZONDO

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEON
JUNIO DEL 2000

SISTEMAS DE RECUPERACION DE ENERGIA EN MOTORES DE INDUCCION DE ROTOR DEVANADO CON REGULACION DE VELOCIDAD

E. G. E.

2000

TM
TK2785
.G66
2000
c.1

1080092543

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SISTEMAS DE RECUPERACION DE ENERGIA EN MOTORES DE INDUCCION DE ROTOR DEVANADO CON REGULACION DE VELOCIDAD

POR

ING. EMILIO GONZALEZ ELIZONDO

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEON
JUNIO DEL 2000

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO CON REGULACIÓN DE VELOCIDAD

POR

ING. EMILIO GONZÁLEZ ELIZONDO

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.,

JUNIO DEL 2000

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO CON REGULACIÓN DE VELOCIDAD

POR

ING. EMILIO GONZÁLEZ ELIZONDO

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.,

JUNIO DEL 2000

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO CON REGULACIÓN DE VELOCIDAD", realizada por el alumno Ing. Emilio González Elizondo, matrícula 38804 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis

M.C. Armando Páez Ordóñez

Asesor

M.C. Guadalupe I. Cantú Garza

Coasesor

M.C. Luis Manuel Martínez Villarreal

Coasesor

M C. Roberto Villarreal Garza

Vo.Bo.

División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N.L., a_1__de_Junio_ de 2000.

DEDICATORIAS

Quiero dedicar este trabajo a mi esposa e hijos que me dieron el amor, cariño y el apoyo necesario para lograr esta meta que me he propuesto.

Quiero dedicar también este trabajo a la memoria de mis padres ya que ahora los recuerdo con mucho cariño, respeto y admiración y a la vez agradecer lo mucho que hicieron por mí.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme realizar este trabajo. Por darme la fuerza de seguir adelante, por superarme día a día, por iluminar mi camino y llenarme de tu gracia.

A todos los maestros que me brindaron sus conocimientos, sus consejos de una manera desinteresada.

A mis amigos que me apoyaron con equipo, tips, en el llenado de solicitudes,etc. Así como también a los asesores quienes me orientaron en el desarrollo del mismo trabajo de tesis.

Al igual quiero agradecer el gran esfuerzo que realizaron mis hijas Linda Janneth y Laura Judith al mecanografiar y dar formato al trabajo realizado.

PRÓLOGO

Considerando los grandes avances tecnológicos que se tienen gracias a la generación de energía y pensando en las grandes necesidades de energía eléctrica que se tienen en el mundo, en la gran infraestructura que se tiene que considerar para los sistemas de generación, hay la necesidad de pensar en la forma de cómo ahorrar la energía eléctrica, por ejemplo evitando los picos de demanda que se tienen en algunos procesos, corrigiendo el factor de potencia, fabricando máquinas eléctricas mas eficientes, aplicando sistemas de regulación de velocidad a máquinas eléctricas con ahorro de energía.

Actualmente la electrónica de potencia del estado sólido a crecido a pasos agigantados como resultado del desarrollo de dispositivos de potencia en estado sólido con capacidades de miles de volts y miles de amperes.

Una de las distinciones de la electrónica de potencia es la eficiencia, debido a que el costo de la energía disipada es muy significativo con respecto al costo del equipo; y será de mayor importancia en lo futuro.

Otro punto que se considera en este trabajo es ver la aplicación de dispositivos de electrónica de potencia sobre máquinas eléctricas para el control de velocidad con ahorro de energía, estos temas en la actualidad son más comunes.

Considerando lo anterior en el presente trabajo se tratarán los sistemas de regulación de velocidad con ahorro de energía, tanto los tradicionales como los electrónicos, estos sistemas son: Regulación de velocidad por medio de resistencias en el motor de inducción de rotor devanado, Sistema Kramer o Rectiflow, Sistema Scherbius o Kramer Estático y Sistema Scherbius supersincrónico.

Este trabajo se ha desarrollado como apoyo a alumnos y maestros de las áreas de electrónica, electromecánica, así mismo quiero agradecer al M.C. Armando Páez Ordoñez, al M.C. Guadalupe Ignacio Cantú Garza y al M.C. Luis Manuel Martínez Villarreal por la asesoría que me han brindado en el desarrollo de este trabajo de tesis.

ÍNDICE

Síntesis 1

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema 4

1.2 Objetivo de la tesis 5

1.3 Hipótesis 5

1.4 Límites de Estudio 5

1.5 Justificación del trabajo de Tesis 6

1.6 Metodología 6

1.7 Revisión bibliográfica 7

2 Antecedentes

2.1 Regulación de velocidad por medio de resistencias en el circuito del rotor 9

2.2 Sistema Kramer 14

2.3 Sistema Scherbius 19

2.4 Clasificación, caracteristicas, aplicación y selección de los sistemas electrónicos de velocidad ajustable. 25

2.4.1 Clasificación de los sistemas de velocidad variable ajustable. 25

2.5 Sistema Rectiflow. 27

2.6 Sistema Scherbius o Kramer Estático. 28

2.7 Sistema Scherbius Supersoncrónico. 29

3 Análisis de la teoría de operación del motor de inducción de corriente alterna

3.1 Teoría básica del motor de inducción 32

3.1.1 Partes principales del motor de inducción 32
3.1.2 Campo magnético giratorio 36
3.1.3 Principio de operación del motor de inducción 37
3.2 Devanados de corriente alterna polifásicos 41
3.2.1 Clasificación de devanados polifásicos 44
3.2.2 Cálculo y desarrollo de un devanado trifásico doble capa, paso completo y acortado. 45
3.2.3 Voltaje inducido en un devanado de corriente alterna 51
3.2.3.1 Factor de distribución 54
3.2.3.2 Factor de paso 56
3.2.3.3 Problema 58
3.3 Fuerza magnetomotriz de los devanados de corriente alterna 61
3.3.1 FMM alterna 61
3.3.2 FMM giratoria 66
3.4 Conexiones de un devanado trifásico 71
3.4.1 Conexión estrella y doble estrella 71
3.4.2 Conexión delta y doble delta 73

4 Determinación de los parámetros de motor de inducción de corriente alterna

4.1 Motor de inducción en reposo en circuito abierto 75
4.2 Motor de inducción en reposo en circuito cerrado 79
4.3 Motor de inducción cuando gira 83
4.4 Diagrama vectorial del motor de inducción 86
4.5 Circuito equivalente del motor de inducción 88
4.6 Determinación de los parámetros a partir de las pruebas de vacío y de rotor frenado 92
4.6.1 La prueba de vacío 92
4.6.2 Prueba de corto circuito (rotor frenado) tensión reducida 95

4.6.3 Influencia de los parámetros en el funcionamiento del motor 97
4.6.4 Influencia de la saturación sobre los parámetros del motor de inducción 101
4.6.5 Cálculo de los parámetros del motor de inducción 102
4.7 Relaciones de potencia y par motor 104
4.7.1 Cálculo del par de arranque, par de funcionamiento, eficiencia y par Máximo. 109

5 Análisis de circuitos rectificadores polifásicos
5.1 Circuitos rectificadores 114
5.2 Circuitos rectificadores monofásicos de media onda 118
5.2.1 Circuito rectificador de media onda con carga RL 122
5.2.2 Circuito rectificador de media onda con carga de una batería 123
5.3 Rectificador monofásico de onda completa con un transformador de derivación central 125
5.4 Circuitos rectificadores de m fases 130
5.5 Rectificador trifásico de media onda 136
5.6 Circuito rectificador trifásico tipo puente con carga resistiva 141

6 Análisis de circuitos rectificadores polifásicos y convertidores regenerativos estáticos con rectificadores controlados de silicio
6.1 Convertidores monofásicos 147
6.1.1 Semiconvertidores monofásicos con carga resistiva 148
6.1.2 Convertidores monofásicos completos 151
6.1.3 Convertidores monofásicos duales 157
6.1.4 Convertidor monofásicos en serie 160
6.1.4.1 Semiconvertidor monofásico en serie. 160
6.1.4.2 Convertidores completos monofásicos conectados en serie. 163

6.2 Convertidor trifásico 166
6.2.1 Convertidor trifásico de media onda 166
6.2.2 Semiconvertidores trifásico 170
6.2.3 Convertidores trifásicos completos 174
6.2.4 Convertidor trifásico dual 179
6.3 Cicloconvertidores 181
6.3.1 Cicloconvertidores monofásicos. 181
6.3.2 Cicloconvertidores trifásicos. 183
6.3.3 Cicloconvertidores de fase controlada. 188
6.4 Características para la selección de sistemas de velocidad variable 196

7 Sistemas de recuperación de energía para motores de inducción de rotor devanado
7.1 Regulación de velocidad por medio de resistencias en el motor de inducción de rotor devanado. 198
7.2 Regulación de la velocidad por medio de un Sistema Rectiflow 201
7.3 Regulación de la velocidad por medio de un sistema Scherbius 211

8 Conclusiones y recomendaciones
8.1 Regulación de velocidad por medio de resistencias del motor de inducción de rotor devanado 226
8.2 Regulación de velocidad por medio del sistema Rectiflow 226
8.3 Regulación de velocidad por medio del sistema Scherbius 227
8.4 Conclusión de la hipótesis formulada 227

Bibliografía 228
Glosario 230
Indice de Tablas 234

Indice de Figuras 236

Indice de Gráficas 242

Autobiografía 243

SÍNTESIS

El análisis que se presenta en el siguiente trabajo de tesis es sobre que sistema de control de velocidad para los motores de inducción de rotor devanado es más eficiente, empleando el método de recuperación de la energía de deslizamiento.

Este análisis se desarrollo comparando los sistemas tradicionales con los nuevos sistemas electrónicos para determinar que sistema es más eficiente.

El presente trabajo de tesis esta compuesto por ocho capítulos. En los cuales trataremos de resolver la problemática de poder impulsar una carga mecánica a velocidad variable con ahorro de la energía eléctrica. Para lograr este propósito se realiza una investigación sobre los sistemas de recuperación de energía en motores de inducción de rotor devanado con regulación de velocidad.

Sobre los sistemas de regulación de velocidad en motores de inducción de rotor devanado con recuperación de energía. La hipótesis formulada es que el equipo electrónico es más eficiente; ya que no consume mucha energía para su operación. Contemplando como límite de estudio el rango de ahorro de energía, la eficiencia y la regulación de velocidad. Se analizarán los siguientes sistemas:

- Motor de inducción de rotor devanado, con resistencia externa
- Sistema Kramer
- Sistema Scherbius
- Sistema Scherbius supersincrónico, no será analizado en el laboratorio.

Considerando que la industria, tiene un consumo del 70 al 80 % de la energía total generada, nos vemos en la necesidad de hacer un análisis comparativo entre los sistemas de recuperación de energía en cuanto a la eficiencia y poder determinar que sistema nos puede brindar mayor ahorro de energía eléctrica. La relación de datos se obtendrá en el laboratorio de máquinas eléctricas y se usará equipo de laboratorio de control eléctrico de motores, se analizaron los diferentes sistemas para comprobar su eficiencia en forma experimental quedando limitada a los recursos que se tengan en el laboratorio. Las mediciones que se realizarán en cada prueba son: el voltaje de alimentación, corriente de carga, potencia de entrada, par, velocidad.

Los instrumentos de medición que se usarán son: el voltímetro de corriente alterna y de corriente directa, amperímetro de corriente alterna y de corriente directa wattmetro trifásico de corriente alterna, dinámometro y tácometro.

En el capítulo de antecedentes se está considerando el principio de operación de cada sistema haciendo un balance de energía. Los sistemas que se analizarán son los que anteriormente fueron mencionados.

Se hace la fundamentación teórica del motor de inducción; considerando partes principales, leyes fundamentales que rigen las máquinas eléctricas, devanados trifásicos, fuerza magnétomotriz, forma de onda del voltaje inducido, calculo de voltaje inducido, conexiones trifásicas. Se determinan las ecuaciones vectoriales que rigen al motor de inducción trifásico, de igual manera se hace el análisis del diagrama vectorial y se obtiene el circuito equivalente. Se realizan las pruebas de vacío, de corto circuito a rotor bloqueado, Se calculan los parámetros del motor de inducción.

Se determinan las relaciones de potencia de campo giratorio, pérdidas, la eficiencia, par motor y se muestran las curvas características de funcionamiento del motor de inducción

Ahora fundamentaremos la parte electrónica de potencia mencionando la función de los circuitos rectificadores, se determinará el rendimiento de los rectificadores de media onda monofásicos, de onda completa monofásicos, tipo puente los de media onda trifásicos , los trifásicos tipo puente de onda completa.

El rendimiento de los rectificadores se evalúan en función de los siguientes parámetros:

- Valor promedio del voltaje de salida
- Valor promedio de la corriente de salida
- El potencial de salida en corriente directa
- El valor medido cuadrático rms, el voltaje de salida
- El valor eficaz rms de la corriente de salida
- El potencial de salida en corriente alterna

Los parámetros que se calcularon son: la eficiencia, el valor efectivo, el factor de componente ondulatoria, el factor de forma, el factor de utilización del transformador, factor de desplazamiento, factor armónico, factor de potencia.

Otro punto importante que trataremos son los convertidores de fase controlada en donde veremos los principios de operación, la clasificación de los convertidores. Se analizarán los parámetros de rendimiento de los convertidores.

En los sistemas de recuperación de energía para motores de inducción de rotor devanado se ve el diagrama de conexión, El procedimiento que se lleva a cabo para realizar las pruebas, y por ultimo se hace la comparación de sistemas en cuanto a la eficiencia y recomendaciones en cada uno de ellos.