

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Diseño e Implementación de un Sistema de Detección de Fallas de Cortocircuitos en los Bobinados Estatóricos en Motores de Inducción Utilizando Algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA).

Rafael Ángel Barreto Jijón

Proyecto final previo a la
obtención del título de Ingeniero Eléctrico/Electrónico

Quito
Diciembre de 2006

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Diseño e Implementación de un Sistema de Detección de Fallas por Cortocircuitos en los Bobinados Estatóricos en Motores de Inducción Utilizando Algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA).

Rafael Ángel Barreto Jijón

Alberto Sánchez, Ph.D.
Director de Tesis

Bruce Hoeneisen, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Laurent Sass, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Alberto Sánchez, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Santiago Navarro, Ph.D.
Director de Ingeniería Electrónica

Fernando Romo, Ph.D.
Decano del Colegio Politécnico

Quito, diciembre 2006.

© Derechos de autor.

Rafael Ángel Barreto Jijón.

2006

AGRADECIMIENTO

Un infinito agradecimiento fraterno a todos quienes contribuyeron con la culminación de este trabajo: A mi madre, por absolutamente todo lo que ha hecho en mí, a mi hermana Náthali, pilar fundamental de mi fuerza de autosuperación, a Alberto Sánchez por la guía certera, a Nelson Herrera por la orientación y su infinita voluntad de ayudar desinteresadamente, a Bruce Hoeneisen por la formación impartida, a Laurent Sass por el consejo oportuno, a Diego Benítez por las puertas abiertas y a todos mis amigos y amigas, en especial a Luís Miguel, por el acolite.

A mi madre, como siempre, por el amor, el apoyo incondicional, la amistad y la dedicación.

A mi hermana Náthali, por la complicidad, el cariño y las fuerzas (lo logramos!).

RESUMEN

Se ha diseñado e implementado un sistema que detecta espiras cortocircuitadas en los bobinados del estator de motores de inducción monofásicos y trifásicos, aplicando la teoría de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA). Éste sistema utiliza un computador, donde se obtienen señales de corriente y de voltaje de alimentación del motor con una pinza amperimétrica y un transformador respectivamente. Estas señales se filtran para evitar *aliasing* en la digitalización con una DAQ para luego ser enviadas al computador a través de USB 2.0. Éstas son analizadas con un programa en LabVIEW que, filtrando ruido digitalmente y calculando la Transformada Rápida de Fourier de las señales adquiridas, detecta picos en frecuencias de interés y arroja como resultado un diagnóstico y una recomendación. El sistema incluye un exhaustivo estudio de las mejores opciones para la elección de sistemas basados en computadores, transductores, sistemas de adquisición de datos, filtraje analógico y digital y eliminación de ruido. Todos los datos adquiridos y calculados pueden ser almacenados en hojas de cálculo compatibles con MS EXCEL o bases de datos como MS Access y MySQL. Con el resultado del proceso se puede generar reportes automáticamente en formato de documento portátil (*.pdf). El sistema fue probado en un motor de inducción monofásico con cortocircuitos controlados.

ABSTRACT

A system for detecting shorted turns in stator windings of induction motors has been designed and developed where Motor Current Signature Analysis (MCSA) theory is applied. This system is PC-based, where voltage fed signal is sensed with a transformer and the current fed signal is sensed with a clamp-on current probe. These signals are filtered analogically for avoiding Aliasing and then digitalized with a DAQ. Furthermore, they are sent to a computer trough USB 2.0 for them to be analyzed in a LabVIEW program. They are filtered digitally for noise-rejection and then their Fast Fourier Transforms are calculated. The program detects peak frequencies and then shows a diagnostic and a recommendation. The system includes an exhaustive study of the best options for choosing computer-based systems, transducers, data acquisition systems, analog and digital filtering and noise-rejection. All acquired and calculated data can be saved to spreadsheets MS EXCEL-compatibles and to databases like MS Access and MySQL. An automatic report can be generated in portable-document-format (*.pdf) with the results of the whole process. The system was tested in an induction single-phase motor with controlled shorted-turns.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Métodos de Monitoreo	5
1.3 Análisis espectral de corriente de motor.....	9
1.4 MCSA para detección cortocircuitos.....	14
CAPÍTULO II Arquitectura.....	27
2.1 Motor.....	29
2.2 Transductor.....	37
2.3 Adquisición de señales.....	47
2.4 Procesamiento digital de señales.....	63
2.5 Detección de falla.....	80
2.6 Almacenamiento de datos.....	81
2.7 Reportes.....	83
CAPÍTULO III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	84
3.1 Requerimientos generales.....	84
3.2 Software a utilizar.....	85
3.3 Motor.....	86
3.4 Transductor.....	86

3.5 Adquisición de datos.....	89
3.6 Procesamiento digital de señales.....	100
3.7 Algoritmo de MCSA.....	104
3.8 Detección de la falla.....	106
3.9 Almacenamiento de datos.....	108
3.10 Generación de reportes.....	109
3.11 Visión general del sistema.....	113
CAPÍTULO IV PRUEBAS Y RESULTADOS.....	125
4.1 Objetivos esperados.....	125
4.2 Configuración de las pruebas y resultados.....	127
4.3 Resumen de las pruebas y resultados.....	139
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
5.1 Conclusiones.....	140
5.2 Recomendaciones.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y TÉRMINOS IMPORTANTES.....	146
ANEXO A. Reporte generado por el programa de un motor con bobinas cortocircuitadas.....	149
ANEXO B. Reporte generado por el programa de un motor en buen estado....	151

ANEXO C. Lista de motores trifásicos y monofásico de inducción comerciales.....	153
ANEXO D. Especificaciones del cambiador de voltaje 70ls07.....	155
ANEXO E. Especificaciones de la Pinza Amperimétrica 80i-600A.....	159
ANEXO F. Manual de usuario.....	161
ANEXO G. Cara principal del software	169
ANEXO H. Mapas circuitales de placas eléctricas.....	172
ANEXO I. Mapa circuital completo.....	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Porcentajes de Fallas en Motores de Inducción de acuerdo al componente constitutivo en el que ocurren.....	3
Figura 1.2. Esquema global para el uso de MCSA.....	13
Figura 1.3. Motores con daño.....	15
Figura 1.4. Representación de la asimetría por cortocircuitado en espiras.....	18
Figura 1.5. Distribución espacial del campo magnético en un motor de inducción. a) Distribución espacial, b) disposición angular.....	19
Figura 1.6. Distribución de un campo magnético debido a espiras cortocircuitadas.....	20
Figura 1.7. Transformación de marco de referencia.....	21
Figura 1.8. Espectros de corriente de dos motores ideales.....	23
Figura 1.9. Diagrama de flujo del algoritmo de MCSA	24
Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema.....	28
Figura 2.2. Estator y Rotor de un motor de Inducción.....	30
Figura 2.3. a) Jaula de Ardilla b) Rotor tipo Jaula de Ardilla.....	31
Figura 2.4. Partes Constitutivas de un Motor de Inducción.....	31
Figura 2.5. Esquema de implementación de la Resistencia Sensora.....	38
Figura 2.6. Pinzas amperimétricas.....	39
Figura 2.7. Esquema de Medición de Corriente usando TC.....	40
Figura 2.8. Medición de Corriente usando pinzas amperimétricas.....	37
Figura 2.9. Sensor de Efecto Hall.....	41

Figura 2.10. Principio de funcionamiento del sensor de Efecto Hall.....	42
Figura 2.11. Esquema de un Divisor de Corriente.....	44
Figura 2.12. Fuentes, medios y transmisión de Ruido.....	58
Figura 2.13. Equivalente circuital del Ruido Capacitivo.....	59
Figura 2.14. Representación Circuital de Ruido Inductivo.....	60
Figura 2.15. Respuestas en frecuencia típicas de filtros tipo: a) Butterworth, b) Chebyshev I, c) Chebyshev II, d) Elíptico.....	69
Figura 2.16. Respuesta en frecuencia típicas de filtros tipo Bessel.....	69
Figura 3.1. Pinza con Resistencia de acondicionamiento.....	87
Figura 3.2. Transformador de voltaje.....	88
Figura 3.3. Respuesta en frecuencia del filtro <i>Anti-Aliasing</i>	89
Figura 3.4. Esquemático del Filtro <i>Anti-Aliasing</i>	90
Figura 3.5. Primera etapa filtro <i>anti-aliasing</i> , a) esquema, b) función de transferencia.....	91
Figura 3.6. Primera etapa filtro <i>anti-aliasing</i>	91
Figura 3.7. Respuesta en frecuencia de cada etapa del filtro <i>anti-aliasing</i>	92
Figura 3.8. Respuesta en frecuencia del filtro <i>anti-aliasing</i>	93
Figura 3.9. DAQ USB-6009.....	94
Figura 3.10. Configuración de la DAQ.....	96
Figura 3.11 Implementación de tarea Voltaje.....	97
Figura 3.12. Conexión de entradas en la DAQ.....	98
Figura 3.13. Implementación de adquisición de datos.....	99
Figura 3.14. Configuración del filtro digital.....	100

Figura 3.15. Implementación del filtro digital en LabVIEW.....	101
Figura 3.16. Configuración de análisis espectral.....	102
Figura 3.17. Implementación de FFT de corriente y voltaje.....	102
Figura 3.18. DSP y MCSA.....	103
Figura 3.19. Implementación MCSA.....	105
Figura 3.20. Implementación de Detección de falla.....	106
Figura 3.21. Implementación de almacenamiento en Excel.....	109
Figura 3.22. Administrado de orígenes de datos configurado para el sistema..	110
Figura 3.23. Implementación de almacenamiento de datos en MS Access.....	111
Figura 3.24. Implementación de almacenamiento de datos en MySQL.....	112
Figura 3.25. Plantilla de reportes.....	114
Figura 3.26. Implementación de generación de reportes.....	114
Figura 3.27. Función Reporte.....	115
Figura 3.28. Pantalla “Configuración”.....	116
Figura 3.29. Pantalla “Procesamiento y señales en tiempo”.....	118
Figura 3.30. Pantalla “Señales en frecuencia y diagnóstico”.....	119
Figura 3.31. Pantalla “Tablas”.....	120
Figura 3.32. Función Paro de Emergencia	120
Figura 3.33. Esquema general de Hardware.....	123
Figura 4.1. Forma de onda de transductor de corriente.....	127
Figura 4.2. Forma de onda de transductor de corriente.....	127
Figura 4.3. Respuesta en frecuencia práctica del filtro Anti-Aliasing.....	128
Figura 4.4. a) Pantalla inicial del configuración, b) Segunda pantalla con	

“lectura de datos” titilando, c) Segunda pantalla enviando datos a BDD, d) Diagnóstico	129
Figura 4.5. Señales adquiridas.....	130
Figura 4.6. Espectros de frecuencia, diagnóstico y recomendación mostradas por el programa.....	130
Figura 4.7. Espectro de frecuencias.....	132
Figura 4.8. Paletas de diagnóstico y recomendación.....	133
Figura 4.9. Proceso de detección.....	133
Figura 4.10. Señales adquiridas.....	134
Figura 4.11. Espectros de corriente.....	135
Figura 4.12. Espectro de corriente desarrollada en Excel.....	137
Figura 4.13. Datos almacenados en MS Access.....	137
Figura 4.14. Datos almacenados en MySQL.....	138

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación de los métodos de diagnóstico.....	8
Tabla 1.2 Consideraciones administrativas de la implementación de los métodos.....	9
Tabla 2.1 Voltajes nominales de redes trifásicas de Bajo Voltaje.....	34
Tabla 2.2 Características de los sensores de corriente.....	42
Tabla 2.3 Características de los sensores de voltaje.....	46
Tabla 2.4 Características de tipos de Sistemas de adquisición de datos basados en PC.....	49
Tabla 2.5. Características y aplicaciones de Ventanas para FFT.....	78
Tabla 3.1. Comparación de requerimientos de sistema y pinza.....	87
Tabla 3.2. Comparación de requerimientos de sistema y transformador de voltaje.....	88
Tabla 3.3. Parámetros de las etapas del filtro.....	92
Tabla 3.4. Comparación entre requerimientos de sistema y características del equipo a utilizar.....	95
Tabla 3.5. Criterio de selección de falla.....	107
Tabla 3.6. Diagnósticos y recomendaciones que muestra el equipo.....	107
Tabla 3.7. Elementos utilizados en la implementación.....	124
Tabla 4.1 Tablas generadas en Excel.....	136
Tabla 4.2 Resumen de pruebas y resultados.....	137