

Tabla de Contenidos

| | |
|---|------------|
| LISTA DE FIGURAS | VII |
| NOMENCLATURA | IX |
| ABREVIACIONES | XI |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 1 |
| 1.2. TRABAJOS PREVIOS | 3 |
| 1.2.1 Equipos Comerciales..... | 3 |
| 1.2.2 Estado del arte..... | 4 |
| 1.2.3 Devanados | 5 |
| 1.2.4 Núcleos | 5 |
| 1.3. DISCUSIÓN | 6 |
| 1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO | 6 |
| 1.5. OBJETIVOS | 6 |
| 1.5.1 Objetivo General | 6 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos..... | 6 |
| 1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES | 7 |
| 1.7. TEMARIO..... | 8 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA | 10 |
| 2.2.1 Ley de Gauss del Magnetismo | 10 |
| 2.2.2 Ley de Faraday de la Inducción Electromagnética | 10 |
| 2.2.3 Ley de Ampere | 11 |
| 2.2.4 Energía en el Campo Magnético | 11 |
| 2.3. CIRCUITOS MAGNÉTICOS..... | 12 |
| 2.4. EL TRANSFORMADOR | 13 |
| 2.4.1 Principio Básico de Funcionamiento de un Transformador..... | 13 |
| 2.4.2 Transformador Real..... | 16 |
| 2.4.3 Circuito Equivalente de un Transformador Real..... | 18 |
| 2.4.4 Rama de magnetización..... | 20 |
| 2.5. TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA..... | 21 |
| 2.6. EFECTOS EN UN TRANSFORMADOR EN FRECUENCIAS POR SOBRE 1 KHZ | 22 |
| 2.6.1 Corrientes de Eddy en los Devanados | 23 |
| 2.6.2 Efecto Piel..... | 23 |
| 2.6.3 Efecto Proximidad | 27 |
| 2.7. PÉRDIDAS MAGNÉTICAS Y ELÉCTRICAS EN TRANSFORMADORES | 27 |
| 2.7.1 Pérdidas Magnéticas | 28 |
| 2.7.2 Pérdidas Eléctricas..... | 30 |
| 2.8. ENSAYOS DE TRANSFORMADORES | 31 |
| 2.8.1 Ensayo de Circuito Abierto..... | 32 |
| 2.8.2 Ensayo de Corto Circuito | 33 |
| 2.8.3 Ensayo con Carga Resistiva | 34 |
| 2.9. RENDIMIENTO | 34 |
| 2.10. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 35 |
| CAPÍTULO 3. DISEÑO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL | 36 |
| 3.1. INTRODUCCIÓN | 36 |
| 3.2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE TRANSFORMADORES EN FRECUENCIAS ALTAS | 37 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.3. | MÉTODO DE DISEÑO DEL TRANSFORMADOR..... | 39 |
| 3.3.1 | <i>Método del Producto de Áreas</i> | 39 |
| 3.3.2 | <i>Selección del Núcleo Magnético</i> | 41 |
| 3.4. | PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE ALTA FRECUENCIA POR EL MÉTODO DE PRODUCTO DE ÁREAS | 42 |
| 3.4.1 | <i>Procedimiento de Diseño</i> | 43 |
| 3.5. | DISEÑO DE TRANSFORMADOR DE 5 KHZ PARA MODELO EXPERIMENTAL | 49 |
| 3.5.1 | <i>Selección del Núcleo</i> | 49 |
| 3.5.2 | <i>Diseño Paso a Paso del Transformador Monofásico para Desarrollo Experimental</i> | 50 |
| 3.6. | CONDUCTORES PARA DEVANADOS EN ALTA FRECUENCIA. | 56 |
| 3.6.1 | <i>Cable Litz</i> | 56 |
| 3.6.2 | <i>Conductor de Cobre Plano</i> | 57 |
| 3.7. | DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE ALTA FRECUENCIA (5 KHZ)..... | 58 |
| 3.7.1 | <i>Disposición de los Núcleos</i> | 58 |
| 3.7.2 | <i>Disposición de los Devanados</i> | 60 |
| 3.7.3 | <i>Ensamble</i> | 62 |
| 3.7.4 | <i>Prototipo Experimental</i> | 64 |
| 3.7.5 | <i>Aplicación de Conexión a Bobina de Inducción</i> | 65 |
| 3.8. | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 66 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES | | 67 |
| 4.1. | INTRODUCCIÓN | 67 |
| 4.2. | RESULTADOS EXPERIMENTALES | 68 |
| 4.2.1 | <i>Ensayo de circuito Abierto</i> | 69 |
| 4.2.2 | <i>Ensayo de corto – circuito</i> | 75 |
| 4.2.3 | <i>Ensayo con Carga Resistiva</i> | 80 |
| 4.2.4 | <i>Rendimiento</i> | 84 |
| 4.2.5 | <i>Variables Magnéticas</i> | 85 |
| 4.2.6 | <i>Capacitancias Parásitas</i> | 85 |
| 4.3. | COMPROBACIÓN DE RESULTADOS | 86 |
| 4.4. | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 87 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES | | 88 |
| 5.1. | SUMARIO | 88 |
| 5.2. | CONCLUSIONES..... | 88 |
| 5.3. | TRABAJOS FUTUROS | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 92 |
| ANEXO A. INFORMACIÓN TÉCNICA | | 95 |
| A.1. | NÚCLEOS DE FERRITA EPCOS..... | 96 |
| A.2. | MEDIDOR LCR BK – PRECISION | 98 |
| A.3. | OSCILOSCOPIO AGILENT 4 CANALES | 99 |
| A.4. | TERMÓMETRO INFRARROJO DE PRECISIÓN FLUKE..... | 100 |
| A.5. | FUENTE DE PODER PROGRAMABLE AMETEK CSW5550 | 101 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1 Modelo genérico de un Transformador..... | 9 |
| Fig. 2.2 Principio básico de funcionamiento de un transformador. | 14 |
| Fig. 2.3 Circuito Transformador Ideal. | 15 |
| Fig. 2.4 Esquema representativo de un transformador real..... | 17 |
| Fig. 2.5 Circuito equivalente referido al primario..... | 18 |
| Fig. 2.6 Circuito equivalente referido al secundario. | 19 |
| Fig. 2.7 Circuito equivalente aproximado de un transformador. | 19 |
| Fig. 2.8 Representación de rama de magnetización de un transformador..... | 20 |
| Fig. 2.9 Modelo Planteado de Transformador a Frecuencias Superiores a 1 kHz. | 21 |
| Fig. 2.10 Efecto Piel y corrientes de Eddy en el conductor | 24 |
| Fig. 2.11 Vista del conductor que muestra el área utilizada del conductor debido al efecto piel | 26 |
| Fig. 2.12 Esquema de un Transformador Real y sus pérdidas. | 27 |
| Fig. 2.13 Circuito equivalente de la rama serie y de magnetización..... | 31 |
| Fig. 2.14 Ensayo de Circuito en Vacío..... | 32 |
| Fig. 2.15 Ensayo de Corto Circuito en un Transformador..... | 33 |
| Fig. 2.16 Esquema de conexión de Transformador con carga resistiva..... | 34 |
| Fig. 3.1 Definición gráfica de Áreas del núcleo para obtener el producto de áreas..... | 40 |
| Fig. 3.2 Núcleo de Ferrita tipo U | 50 |
| Fig. 3.3 Núcleo de Ferrita Tipo I..... | 50 |
| Fig. 3.4 Cable Litz Confeccionado Manualmente..... | 56 |
| Fig. 3.5 Barra de Cobre Utilizada para Devanado Secundario | 57 |
| Fig. 3.6 Vista superior, Disposición de Núcleos de Ferrita..... | 59 |
| Fig. 3.7 Vista Lateral, Disposición de Núcleos de Ferrita en paralelo..... | 59 |
| Fig. 3.8 Vista superior, Núcleos de Ferrita con Cartón Aislante | 59 |
| Fig. 3.9 Vista Lateral, Núcleos de Ferrita con Aislante para los Devanados..... | 59 |
| Fig. 3.10 Número de Vueltas dispuestas en Núcleo de Ferrita | 60 |
| Fig. 3.11 Barra de Cobre plegada de acuerdo a forma de núcleo magnético..... | 61 |
| Fig. 3.12 Número de Vueltas en el Secundario conectadas entre sí..... | 61 |
| Fig. 3.13 Secundario Montado alrededor de columna de Núcleo de Ferrita..... | 62 |
| Fig. 3.14 Secundario del Transformador con perfil de pultrusión (separador de fibra de vidrio) | 62 |
| Fig. 3.15 Secundario ensamblado y unido equivalente a dos vueltas sobre el núcleo | 63 |
| Fig. 3.16 Primario y Secundario ensamblado al núcleo Ferrita | 63 |
| Fig. 3.17 Transformador terminado con montaje de Ferrita tipo I, Cerrando Circuito Magnético.... | 63 |
| Fig. 3.18 Vista de separación del secundario con separador de fibra de vidrio | 63 |
| Fig. 3.19 Transformador de Alta Frecuencia Construido en Base a Diseño Teórico | 64 |
| Fig. 3.20 Ejemplo de conexiónado en aplicación a bobina de inducción | 65 |
| Fig. 4.1 Prototipo Experimental Realizado en Laboratorio | 68 |
| Fig. 4.2 Voltaje de Entrada al Transformador en prueba de Circuito Abierto V_{PCA} | 70 |
| Fig. 4.3 Corriente de entrada al Transformador en prueba de Circuito Abierto I_{PCA} | 70 |
| Fig. 4.4 Voltajes en el transformador. | 70 |
| Fig. 4.5 Voltajes Primario y Secundario en Fase. | 70 |
| Fig. 4.6 Forma de Onda de la Potencia de Entrada en ensayo de Circuito Abierto | 71 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 4.7 Circuito Equivalente con la Rama de Magnetización Encontrada por Ensayo de Circuito Abierto y Rama Serie que se Encuentra por Ensayo de Corto Circuito..... | 75 |
| Fig. 4.8 Voltaje de Entrada al Transformador en ensayo de Corto Circuito..... | 75 |
| Fig. 4.9 Corriente de entrada al Transformador en ensayo de Corto Circuito | 75 |
| Fig. 4.10 Desfase de voltaje y corriente de corto circuito en el primario. | 76 |
| Fig. 4.11 Corriente Nominal en el Secundario en ensayo de Corto Circuito | 77 |
| Fig. 4.12 Forma de Onda de la Potencia de Corto Circuito | 78 |
| Fig. 4.13 Esquema de conexionado en ensayo con carga resistiva | 81 |
| Fig. 4.14 Voltaje y corriente de entrada en ensayo con carga resistiva | 82 |
| Fig. 4.15 Voltaje y corriente de salida en ensayo con carga resistiva..... | 82 |
| Fig. 4.16 Potencia activa en el primario..... | 83 |
| Fig. 4.17 Potencia activa en el secundario | 83 |
| Fig. A.1 Prototipo experimental..... | 95 |
| Fig. A.2 Especificaciones técnicas de los núcleos de Ferrita utilizados | 97 |
| Fig. A.3 Medidor LCR Portátil. | 98 |
| Fig. A.4 Osciloscopio Digital Agilent modelo DSO7034A..... | 99 |
| Fig. A.5 Área de operación según rango de trabajo | 102 |
| Fig. A.6 Fuente de Poder Programable AMETEK..... | 102 |



Nomenclatura

| | | |
|----------------------|---|---|
| i_p | : | Corrientes en el primario del transformador. |
| i_r | : | Corrientes en el secundario del transformador. |
| v_p | : | Voltaje de entrada, primario del transformador. |
| v_s | : | Voltaje de salida, secundario del transformador. |
| f | : | Frecuencia de operación del transformador. |
| UI | : | Tipo de Núcleo de ferrita. |
| N_1 | : | Número de vueltas en el primario. |
| N_2 | : | Número de vueltas en el secundario. |
| i_1 | : | Corriente de entrada. |
| i_2 | : | Corriente de salida del transformador. |
| i_m | : | Corrientes de magnetización. |
| J | : | Densidad de Corriente. |
| l_m | : | Largo del camino magnético del núcleo. |
| μ_r | : | Permeabilidad relativa del material. |
| μ | : | Permeabilidad magnética del medio. |
| μ_0 | : | Permeabilidad en el vacío. |
| I | : | Corriente por el conductor. |
| r | : | Distancia entre el punto y el elemento de corriente. |
| \hat{r} | : | Vector unitario en la dirección de la recta del elemento de corriente al punto. |
| $d\vec{l}$ | : | Vector diferencial tangente al elemento de corriente. |
| dl | : | Longitud del elemento considerado. |
| H | : | Intensidad de campo magnético, fuerza de magnetización. |
| H_c | : | Fuerza coercitiva. |
| λ | : | Flujo magnético de enlace. |
| ϕ | : | Flujo magnético total. |
| $\phi_{m\acute{a}x}$ | : | Flujo magnético máximo. |
| w_m | : | Energía en un campo magnético. |
| B | : | Vector densidad de flujo magnético. |
| $B_{m\acute{a}x}$ | : | Densidad de flujo magnético máximo. |
| B_r | : | Flujo remanente. |

| | | |
|------------|---|---|
| B_{rs} | : | Retentividad. |
| B_s | : | Punto de saturación. |
| B_{sat} | : | Flujo de saturación. |
| ∇ | : | Divergencia de un campo vectorial. |
| e_1 | : | Tensión en el devanado primario. |
| e_2 | : | Tensión en el devanado secundario. |
| ω | : | Frecuencia angular del voltaje de entrada. |
| A_e | : | Área efectiva del núcleo del transformador. |
| A_{cu} | : | Área del alambre de cobre desnudo. |
| A_w | : | Área de la ventana del núcleo magnético. |
| A_p | : | Producto de áreas. |
| R_t | : | Relación de numero de vueltas primario y secundario. |
| R_p | : | Resistencia parásita del devanado primario. |
| R_s | : | Resistencia parásita del devanado secundario. |
| X_p | : | Reactancia inductiva en el devanado primario del transformador. |
| X_s | : | Reactancia inductiva en el secundario del transformador. |
| L_p | : | Inductancia de dispersión en el primario. |
| L_s | : | Inductancia de dispersión en el secundario. |
| V_s | : | Voltaje nominal de alimentación del transformador. |
| L_m | : | Inductancia equivalente de magnetización del transformador. |
| k_e | : | Constante determinada por las condiciones de operación eléctrica y magnética. |
| k_f | : | Coefficiente constante que depende de la forma de onda. |
| k_g | : | Constante de forma geométrica del núcleo. |
| k_u | : | Factor de utilización de la ventana. |
| P_{in} | : | Potencia de entrada. |
| P_{cu} | : | Pérdidas en los devanados. |
| δ | : | Profundidad de efecto piel. |
| r_c | : | Radio del conductor. |
| r_δ | : | Radio de la profundidad de penetración. |
| P_N | : | Pérdidas en el núcleo. |
| P_{cu} | : | Pérdidas en los devanados. |

Abreviaciones

Mayúsculas

| | | |
|-----|---|---|
| PCB | : | Tarjeta de circuito impreso (P rinted C ircuit B oard). |
| DC | : | Corriente directa (D irect C urrent). |
| AC | : | Corriente alterna (A ltern C urrent). |
| PCA | : | Prueba de circuito abierto en un transformador. |
| PCC | : | Prueba de corto-circuito en un transformador. |
| RMS | : | Valor eficaz de voltaje (R oot M ean S quare). |
| AWG | : | Medida de clasificación de diámetro de alambres (A merican W ire G auge). |
| HF | : | Alta frecuencia (H igh F requency). |
| VSC | : | Convertidor fuente de voltaje (V oltage S ource C onverter) |
| CSC | : | Convertidor fuente de corriente (C urrent S ource C onverter). |
| FEM | : | Fuerza electromotriz. |

