

Diseño de un acondicionador de potencia ferroresonante

Design of ferroresonant power conditioner

Luis David Pabón Fernández, Edison Andrés Caicedo Peñaranda, Jorge Luis Díaz Rodríguez

Aldo Pardo García, Frayn Steevens Monsalve Pabón

Universidad de Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es, edison.caicedo@unipamplona.edu.co, jdiazcu@gmail.com, apardo13@hotmail.com, frayn.monsalve@unipamplona.edu.co

Resumen— Este trabajo trata del diseño de un acondicionador de potencia basado en transformador de tensión ferroresonante, enfatizándose el análisis de circuito eléctrico y circuito magnético equivalente para proponer el diseño de un estudio de caso. Se presentan pruebas experimentales del diseño propuesto teniendo resultados satisfactorios para cambios en la tensión de entrada por encima del valor nominal.

Palabras claves— Acondicionador de potencia, Transformador ferroresonante, calidad de la energía.

Abstract— This work deals with the design of a power conditioner based on a ferroresonant voltage transformer, emphasizing the analysis of the electrical circuit and equivalent magnetic circuit to propose the design of a case study. Experimental test of the proposed design are presented having satisfactory results for changes in the input voltage above the nominal value.

Palabras claves— Power conditioner, Ferroresonant transformer, Power quality.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas actuales debido a la entrada de sistemas de generación distribuida, integración de cargas no lineales, y dispositivos basados en electrónica de potencia han producido perturbaciones en términos de calidad de la energía en la red eléctrica como armónicos, desequilibrios y bajo factor de potencia [1][2][3][4].

Estas perturbaciones de calidad de la energía afectan la óptima operación de cargas sensibles como computadoras de precisión y microprocesadores en la red, y pueden causar accidentes de seguridad y pérdidas económicas [2][5]. Para hacer frente a estas perturbaciones surge una rama de la ingeniería eléctrica conocida como calidad de la energía, de la cual, existen varios estándares desarrollados especialmente por IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ANSI (American National Standards Institute) y NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Estos estándares proveen algunas especificaciones para los sistemas que pueden ayudar a mitigar los problemas de calidad de la energía eléctrica como los equipos acondicionadores de potencia [6].

Dentro de los equipos acondicionadores de potencia que permiten mejorar parámetros como tensión y corriente que afectan la calidad de la energía, se encuentra el transformador ferroresonante, que permite mantener los niveles de tensión a la salida ante variaciones en la tensión de entrada ocasionada por fenómenos electromagnéticos.

Las investigaciones relacionadas con el transformador de tensión constante (CVT) basado en ferroresonancia son muy limitadas en la literatura, siendo así, las últimas referencias en bases de datos convencionales son [7][8].

El transformador de tensión constante (CVT) o ferroresonante utiliza el fenómeno de ferroresonancia y es un elemento que minimizan los problemas de calidad de la energía

eléctrica. La ferroresonancia es un tipo de resonancia irregular, por lo general, caótica en las que se encuentran presentes características no lineales de inductores de núcleo de hierro. Este fenómeno es indeseable en el sistema de suministro de energía, pero es aprovechada en tecnologías como transformadores de tensión constante para aumentar la calidad de la potencia [9].

Los transformadores ferroresonantes suministran una tensión de corriente alterna de magnitud relativamente constante aun cuando la tensión de entrada cambia en un rango determinado [10]. El funcionamiento del CVT es diferente de un transformador convencional en el que la región saturada es un modo de operación normal. Este dispositivo cuenta con una buena supresión de transitorios, alto factor de potencia en entrada y limitación de la corriente en salida [11].

Las características de diseño de los transformadores ferroresonantes tienen propiedades generales con un circuito de resonancia LC, una derivación magnética y un núcleo no lineal. Uno de los diseños convencionales del CVT utiliza un núcleo simétrico, una derivación magnética y una capacitancia conectada en devanado secundario o terciario. El planteamiento común para el cálculo del CVT se basa en ecuaciones de circuito eléctrico y magnético equivalente [12].

Las aplicaciones principales del transformador ferroresonante se encuentran como reguladores de corriente alterna en fuentes de suministro electrónicas para lograr una tensión constante y limitación de corriente [8]. También, se utilizan en inversores, convertidores, en equipos de automatización y control, entre otros [12].

Este artículo enfatiza la metodología de diseño del transformador de tensión constante basado en el circuito eléctrico equivalente y circuito magnético equivalente, luego se realiza un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta y se realizan pruebas experimentales para validar el funcionamiento del transformador ferroresonante como acondicionador de potencia.

II. TRANSFORMADOR FERRORESONANTE

Un modelo de transformador ferroresonante se muestra en la Fig. 1 en donde se observa el núcleo del transformador, un devanado primario, dos devanados secundarios; uno para la carga y otro de compensación para el condensador de resonancia C_t . Además, se observa una derivación magnética inherente de este tipo de dispositivos, el cual separa los devanados primario y secundario [8].

En la Fig. 2 se muestra a detalle el circuito magnético equivalente de estado estacionario representativo de la configuración del transformador ferroresonante.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.183>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

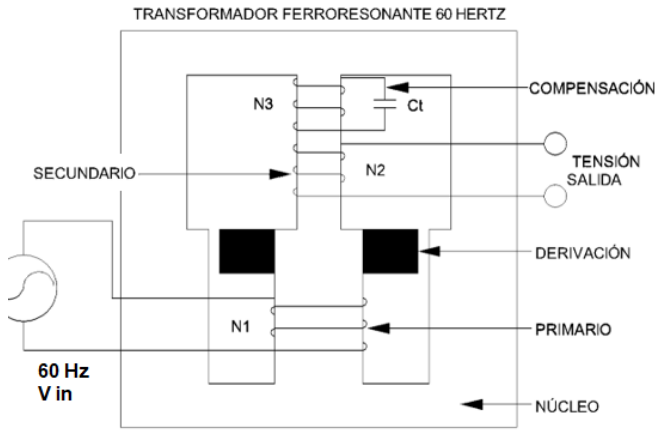


Fig. 1 Modelo transformador de tensión constante.

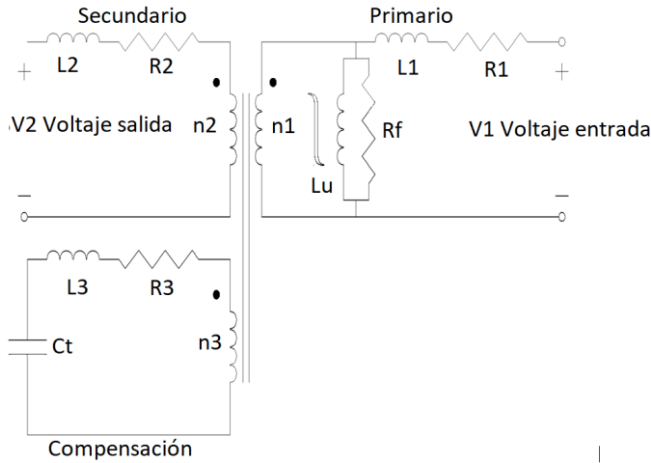


Fig. 2 Circuito equivalente transformador de tensión constante.

III. MODELADO MATEMÁTICO

A. Análisis Circuito Eléctrico Equivalente Transformador de Tensión Constante a 60 Hz

Se simplifica el circuito de la Fig. 2 para determinar el condensador resonante C_t . El circuito simplificado se aprecia en la Fig. 3.

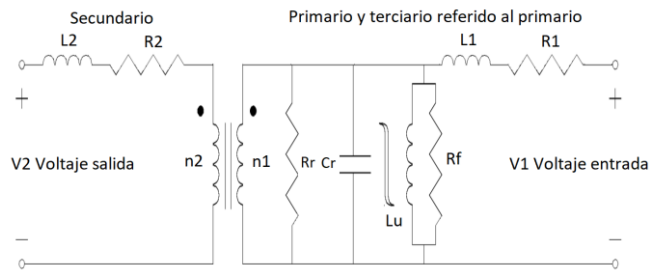


Fig. 3 Circuito equivalente simplificado transformador de tensión constante.

Se determina el condensador C_r y la resistencia R_r de acuerdo con (3), (4) respectivamente. Para fijar la máxima ganancia de tensión se establece la frecuencia de resonancia f_e . También, se determina el condensador de resonancia C_t en (7).

Para calcular el condensador C_r y la resistencia R_r se iguala el circuito terciario en serie de la Fig.2 a su equivalente en paralelo de la Fig. 3 como se aprecia en (1).

$$R_3 + (X_{L3} - X_{Ct}) * i = \frac{R_r * X_{Cr}^2}{R_r^2 + X_{Cr}^2} + \frac{R_r^2 * X_{Cr} * i}{R_r^2 + X_{Cr}^2} \quad (1)$$

Se divide la parte imaginaria en la parte real de (1). Se selecciona la parte imaginaria de (1) para determinar C_r ; conforme a la división de la parte imaginaria en la parte real se extrae R_r , X_{Cr} y $\frac{X_{Cr}}{R_r}$ reemplazando en la parte imaginaria de (1) obteniendo (2).

$$X_{Cr} = \frac{R_3^2 + (X_{L3} - X_{Ct})^2}{(X_{L3} - X_{Ct})} \quad (2)$$

La ecuación (2) se refiere del devanado terciario al devanado primario y se expresa en el dominio de la frecuencia en (3).

$$C_r = \frac{(X_{Ct} - X_{L3})}{2 * \pi * f_e * n_{13}^2 * [R_3^2 + (X_{L3} - X_{Ct})^2]} \quad (3)$$

Se selecciona la parte real de (1) para determinar R_r . Mediante la división de la parte imaginaria en la parte real de (1) se reemplaza en la parte real de (1) para extraer R_r y se refiere del devanado terciario al primario como se examina en (4).

$$R_r' = \frac{n_{13}^2 * [R_3^2 + (X_{L3} - X_{Ct})^2]}{R_3} \quad (4)$$

Para que el circuito este en resonancia se desea que el paralelo de la Fig.3 entre la reactancia del capacitor X_{Cr} y la reactancia de magnetización X_{Lu} tienda al infinito, como se aprecia en (5).

$$L_u * C_r = \frac{1}{(2 * \pi * f_e)^2} \quad (5)$$

El condensador en paralelo C_r se obtiene de (5) y se determina la reactancia del mismo. Esta reactancia se desreferencia debido a que se encuentra en el devanado primario y se reemplaza en (2) obteniendo (6).

$$(X_{L3} - X_{Ct})^2 + \frac{X_{Lu} * (X_{L3} - X_{Ct})}{n_{13}^2} + R_3^2 = 0 \quad (6)$$

La ecuación (6) se asemeja a una ecuación cuadrática de una variable, por lo tanto, se encuentran las raíces y se expresa en el dominio de la frecuencia para determinar el condensador resonante C_t en (7).

$$C_t = \frac{n_{13}^2}{\pi * f_e * (X_{Lu} + 2 * n_{13}^2 * X_{L3} + \sqrt{X_{Lu}^2 - 4 * n_{13}^4 * R_3^2})} \quad (7)$$

Donde,

$$X_{L3} = 2 * \pi * f_e * L_3,$$

$$X_{Lu} = 2 * \pi * f_e * L_u,$$

$$n_{13} = \frac{n_1}{n_3}.$$

B. Análisis Circuito Magnético Equivalente Transformador de Tensión Constante a 60 Hz

En la Fig. 4 se observa la estructura del transformador de tensión constante. La letra N indica el ancho de las trayectorias del núcleo, la letra L, la longitud media de las partes del núcleo en sus respectivos devanados. En la Fig. 5 se analiza el circuito magnético equivalente del CVT como base de partida del circuito magnético equivalente de Thévenin mostrado en la Fig. 6.

Para lograr el circuito magnético equivalente de Thévenin del transformador de tensión constante, el circuito magnético equivalente se debe analizar como un circuito magnético simétrico como se aprecia en la Fig. 7. El circuito de la Fig. 7 se analiza mediante leyes de Kirchhoff tanto LVK (Ley de Tensión de Kirchhoff) como LCK (Ley de Corriente de Kirchhoff) y por medio de caídas de potencial de la fuerza magnetomotriz se determinan las respectivas reluctancias del núcleo del circuito equivalente de Thévenin dadas en (12), (13) y (14).

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

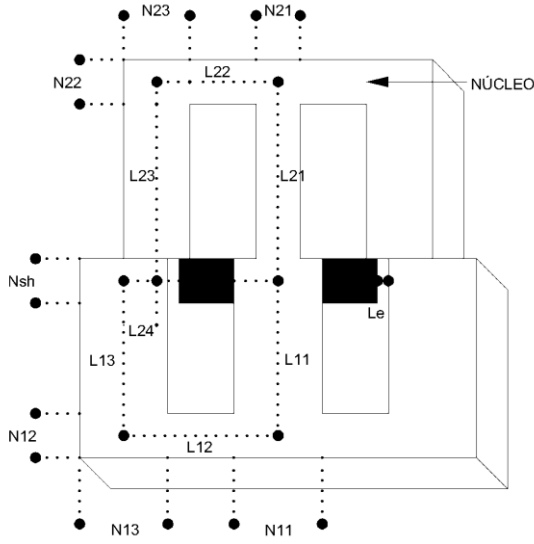


Fig. 4 Estructura transformador de tensión constante.

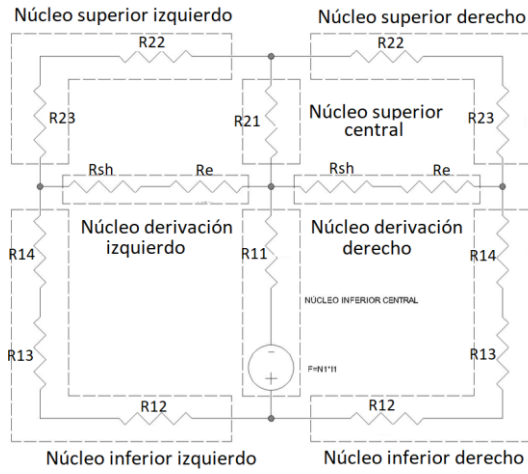


Fig. 5 Circuito magnético equivalente del transformador de tensión constante.

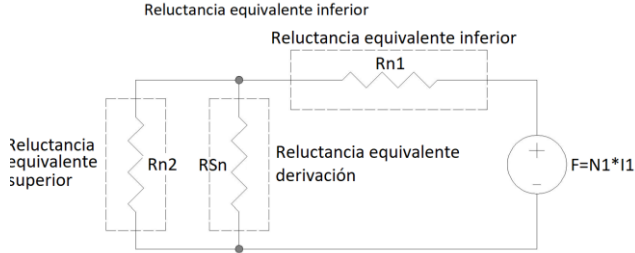


Fig. 6 Circuito magnético equivalente de Thévenin transformador de tensión constante.

$$F = \Phi_1 \left(R_{11} + \frac{R_{12}+R_{13}+R_{14}}{2} \right) + \Phi_{Sh} \left(\frac{R_{Sh}+R_e}{2} \right). \quad (8)$$

$$F = \Phi_1 \left(R_{11} + \frac{R_{12}+R_{13}+R_{14}}{2} \right) + \Phi_2 \left(\frac{R_{23}+R_{22}}{2} + R_{21} \right). \quad (9)$$

$$\Phi_{Sh} \left(\frac{R_{Sh}+R_e}{2} \right) = \Phi_2 \left(\frac{R_{23}+R_{22}}{2} + R_{21} \right). \quad (10)$$

$$\Phi_1 = \Phi_{Sh} + \Phi_2. \quad (11)$$

$$R_{n1} = R_{11} + \frac{R_{12}+R_{13}+R_{14}}{2}. \quad (12)$$

$$R_{Sn} = \frac{R_{Sh}+R_e}{2}. \quad (13)$$

$$R_{n2} = \frac{R_{23}+R_{22}}{2} + R_{21}. \quad (14)$$

Se dimensionan las reluctancias R_{n1} , R_{Sn} y R_{n2} conforme a la ecuación de reluctancia magnética R como se aprecia en (15), (16) y (17) respectivamente.

$$R_{n1} = \frac{L_{11}}{\mu \cdot (N_{11} \cdot t)} + \left[\sum_{i=2}^3 \frac{L_{1i}}{\mu \cdot (2 \cdot N_{1i} \cdot t)} \right] + \frac{L_{24}}{\mu \cdot (2 \cdot N_{Sh} \cdot t)}. \quad (15)$$

$$R_{Sn} = \frac{L_{Sh}-L_e}{\mu \cdot (2 \cdot N_{Sh} \cdot t)} + \frac{L_e}{\mu_0 \cdot (2 \cdot N_{Sh} \cdot t)}. \quad (16)$$

$$R_{n2} = \frac{L_{21}}{\mu \cdot (N_{21} \cdot t)} + \left[\sum_{i=2}^3 \frac{L_{2i}}{\mu \cdot (2 \cdot N_{2i} \cdot t)} \right]. \quad (17)$$

Donde,

i es el i^{th} de la trayectoria magnética.

L_{1i} es la longitud de la trayectoria magnética primaria vía i .

L_{2i} es la longitud media de la trayectoria magnética secundaria vía i .

L_{24} es la longitud media de la trayectoria magnética primaria vía 4.

L_e es la longitud del entrehierro magnético en derivación.

L_{Sh} es la longitud media de la trayectoria del *shunt* magnético.

N_{1i} es el ancho de la trayectoria magnética del núcleo vía i .

N_{2i} es el ancho de la trayectoria magnética del núcleo vía i .

N_{Sh} es el ancho de la trayectoria *shunt* magnético.

t es el grosor del núcleo.

μ es la permeabilidad del núcleo.

μ_0 es la permeabilidad del vacío.

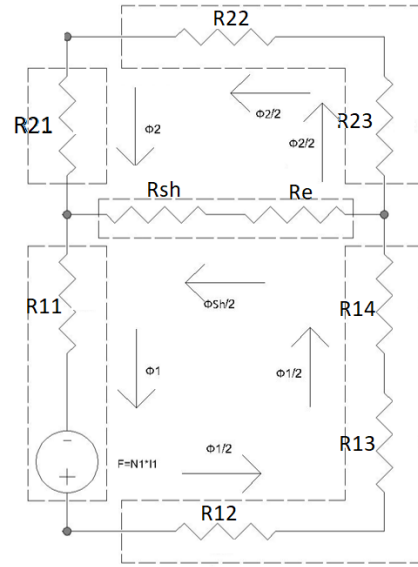


Fig. 7 Circuito magnético equivalente simétrico transformador de tensión constante.

Conforme la ley de Faraday [13], se establece la tensión nominal secundaria V_{2rod} y por medio de la relación de transformación V_{1rod} . Se obtiene el punto (V_{1rod}, V_{2rod}) en la curva de magnetización que separa la sección lineal de la sección de saturación [8].

$$V_{2rod} = \frac{N_2 \cdot 4.44 \cdot B_{\max} \cdot f_e \cdot N_{2t}}{10^4}. \quad (18)$$

$$V_{1rod} = \frac{N_1}{N_2} \cdot V_{2rod}. \quad (19)$$

Donde,

$$N_{2t} = N_{21} \cdot t.$$

En la Fig. 8 se analiza la trayectoria del flujo del transformador de tensión constante operando en la sección lineal de la curva de magnetización cuando la tensión de entrada V_1 es menor a la tensión nominal primaria V_{1rod} . De igual manera, en la Fig. 9 se analiza la trayectoria del flujo cuando el transformador opera en la sección de saturación debido a V_1 es mayor a la tensión nominal primaria V_{1rod} [8].

En la Fig. 10 se aprecia el circuito magnético equivalente de Thévenin del CVT operando en la región lineal, por otra parte, en la Fig. 11 operando en zona de saturación [8].

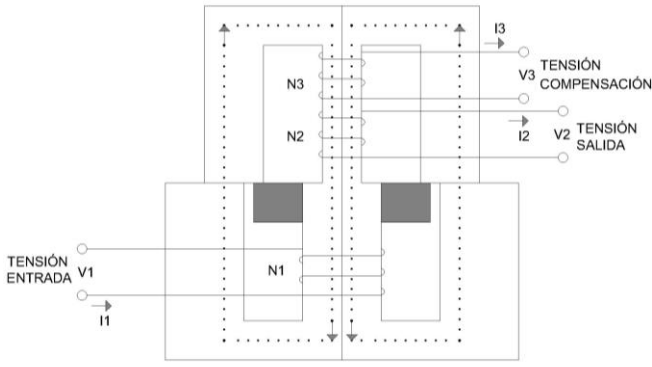


Fig. 8 Trayectoria de flujo de un transformador de tensión constante operando en sección lineal.

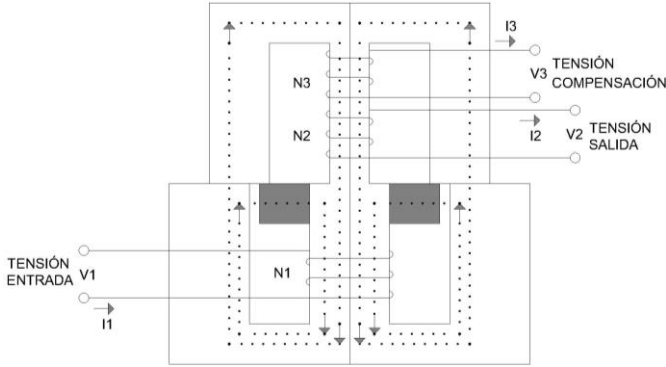


Fig. 9 Trayectoria de flujo de un transformador de tensión constante operando en sección de saturación.

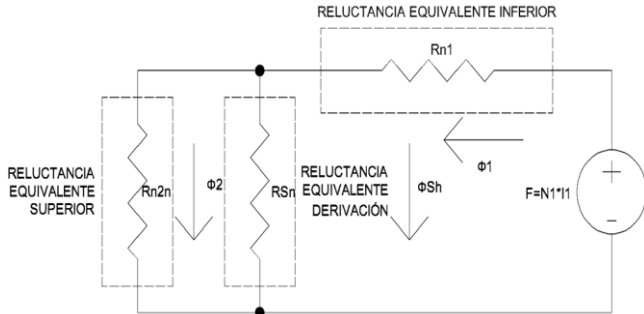


Fig. 10 Circuito magnético equivalente de Thévenin de un transformador de tensión constante operando en la sección lineal.

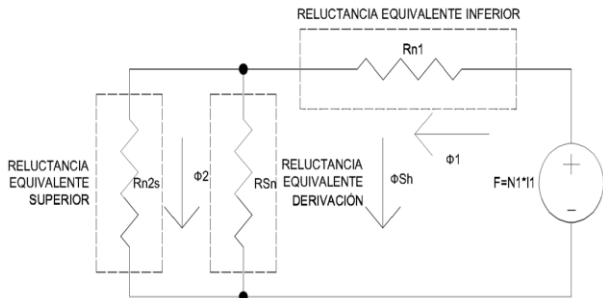


Fig. 11 Circuito magnético equivalente de Thévenin de un transformador de tensión constante operando en la sección de saturación.

La relación de división Q_{ns} del flujo magnético Φ_1 y Φ_2 se contempla en (20), para el caso el transformador CVT su núcleo secundario no opera en saturación y en el caso contrario cuando el núcleo secundario opera en saturación se tiene la relación de división Q_{ss} en (21). Las relaciones de división se determinan mediante las leyes de Kirchhoff aplicadas en la Fig. 7.

$$Q_{ns} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{R_{Sn}}{R_{Sn} + R_{n2n}} \quad (20)$$

$$Q_{ss} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{R_{Sn}}{R_{Sn} + R_{n2s}} \quad (21)$$

Donde, R_{n2n} es la reluctancia magnética R_{n2} con la permeabilidad μ y μ_o en la sección lineal, y R_{n2s} en la sección de saturación de la curva de magnetización [8].

La relación de conversión de tensión de la sección lineal a la sección de saturación se obtiene dividiendo V_2 sobre V_1 conforme con la ley de Faraday [8].

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} * Q_{ns} * V_1 = S_{ns} * V_1 \quad (22)$$

La pendiente S_{ns} se determina en (23). De igual manera, la relación de división Q_{ns} en (24) por medio de (16) y (17).

$$S_{ns} = \frac{N_2}{N_1} * Q_{ns} \quad (23)$$

$$Q_{ns} = \frac{L_{sh} * \mu_o + L_e(\mu - \mu_o)}{L_{sh} * \mu_o + L_e(\mu - \mu_o) + L_{21} * \mu_o * 2 * m + L_{22} * \mu_o * m + L_{23} * \mu_o * m} \quad (24)$$

Donde,

$$m = \frac{N_{sh} * t}{N_{21} * t} = \frac{N_{shu}}{N_{2t}}$$

$$N_{21} * t = N_{22} * t = N_{23} * t.$$

Se dimensiona la longitud del entrehierro magnético por medio de (24) en (25), la pendiente en la zona lineal mediante (23) y (24) en (26). Además, el área de la sección transversal N_{2t} , N_{shu} , N_{1t} en (27), (28) y (29) respectivamente.

$$L_e = \frac{L_{sh} * \mu_o - Q_{ns}(L_{sh} * \mu_o + L_{21} * \mu_o * 2 * m + L_{22} * \mu_o * m + L_{23} * \mu_o * m)}{Q_{ns} * (\mu - \mu_o) - (\mu - \mu_o)} \quad (25)$$

$$S_{ns} = \frac{N_2}{N_1} * \frac{L_{sh} * \mu_o + L_e(\mu - \mu_o) + L_{21} * \mu_o * 2 * m + L_{22} * \mu_o * m + L_{23} * \mu_o * m}{L_{sh} * \mu_o + L_e(\mu - \mu_o)} \quad (26)$$

$$N_{2t} = N_{21} * t \quad (27)$$

$$N_{shu} = N_{sh} * t \quad (28)$$

$$N_{1t} = N_{11} * t \quad (29)$$

Se calcula la inductancia de magnetización por medio del circuito de la Fig. 6.

$$L_u = \frac{N_1^2}{R_{n1} + R_{Sn} \parallel R_{n2n}} \quad (30)$$

IV. EJEMPLO DE DISEÑO A 60 HERTZ

Se determinan el número de vueltas de los devanados del transformador de tensión constante N_1 , N_2 y N_3 mediante el área del núcleo del transformador, las tensiones V_{1rod} , V_{2rod} , V_3 y la ley de Faraday.

$$N_1 \approx 282 \text{ vuelta} \quad (31)$$

Donde,

$$B_{\max} = 0.8 \text{ T},$$

$$N_{1t} = (2 \text{ cm} * 10 \text{ cm}) = 20 \text{ cm}^2,$$

$$V_{1rod} = 120 \text{ V},$$

$$\text{Vuelta} = 2 * \pi * \text{rad}.$$

Se dimensiona la corriente del devanado primario en (32).

$$I_p = \frac{S}{V_{1rod}} * 1,25 = 1.04 \text{ A} \quad (32)$$

Donde,

$$S = (2 \text{ cm} * 5 \text{ cm})^2 = 100 \text{ VA}.$$

Se dimensiona la sección transversal de los conductores teniendo en cuenta la máxima densidad de corriente permisible. Para un transformador con una potencia aparente igual a 100 volt-ampere la densidad de corriente σ es igual a 3.5 $\left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}\right)$.

$$A(\text{mm}^2) = \frac{1.04 \text{ A}}{3.5 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}\right)} = 0.29 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

De acuerdo con la tabla de hilos de cobre y aluminio esmaltados se selecciona un conductor calibre 22 AWG (*American Wire Gauge*) [14]. Se estima la longitud del conductor primario mediante (34), donde a es el ancho del núcleo del devanado primario y p la profundidad del mismo.

$$l_p = N_1(2a + 2p) * 1.4 \approx 95 \text{ m} . \quad (34)$$

Se aplica el procedimiento realizado en el devanado primario para los devanados secundario y terciario.

$$N_2 \approx 326 \text{ vuelta} . \quad (35)$$

$$l_s \approx 78 \text{ m} . \quad (36)$$

$$N_3 \approx 126 \text{ vuelta} . \quad (37)$$

$$l_t \approx 30 \text{ m} . \quad (38)$$

Donde,

$$B_{\text{máx}} = 1.5 \text{ T},$$

$$N_{2t} = 10 \text{ cm}^2,$$

$$V_{2\text{rod}} = 130 \text{ V},$$

$$B_{\text{máx}} = 1.5 \text{ T},$$

$$N_{3t} = 10 \text{ cm}^2,$$

$$V_3 = 50 \text{ V}.$$

Se dimensiona la longitud del entrehierro magnético L_e por medio de (25).

$$L_e = 1.13 \text{ cm} . \quad (39)$$

Conforme al núcleo del transformador se puede establecer,

$$L_{\text{sh}} = 12,5 \text{ cm},$$

$$L_{21} = 20 \text{ cm},$$

$$L_{22} = 10 \text{ cm},$$

$$L_{23} = 20 \text{ cm},$$

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

Se asumen las chapas magnéticas del transformador de tensión constante son de material grano no orientado de acero eléctrico, fijando la permeabilidad magnética del núcleo en (40).

$$\mu = \frac{B}{H} = 1.15 \times 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{m}} . \quad (40)$$

Se determina la relación de división Q_{ns} del flujo magnético, de igual manera se calcula m .

$$Q_{ns} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{B_{\text{máx}} * N_{2t}}{B_{\text{máx}} * N_{1t}} = 0,93. \quad (41)$$

$$m = \frac{N_{\text{sh}}}{N_{21}} = 1. \quad (42)$$

Se realiza el ensayo de vacío y ensayo de cortocircuito del CVT para dimensionar el condensador resonante C_t .

A. Ensayo de Vacío

Se conecta el transformador en vacío preferiblemente por el lado de baja tensión, de tal forma que la tensión aplicada sea la nominal y manteniendo en circuito abierto del devanado secundario y terciario. Se toman medidas de voltaje en vacío V_o , potencia en vacío P_o y corriente en vacío I_o . Se calcula la resistencia de pérdidas en el hierro R_f y reactancia magnetizante X_{lu} [15].

$$V_o = 120.4 \text{ V} . \quad (43)$$

$$P_o = 20 \text{ W} . \quad (44)$$

$$I_o = 1.65 \text{ A} . \quad (45)$$

$$R_f = 725.3 \Omega . \quad (46)$$

$$X_{lu} = j 73.3 \Omega . \quad (47)$$

B. Ensayo de Cortocircuito 12

Se conecta el transformador por el devanado primario y se cortocircuita el devanado secundario, se incrementa la tensión hasta que circule la corriente nominal primaria, se mide

corriente, tensión y potencia activa [15]. Se refiere la corriente nominal secundaria del devanado secundario al primario.

$$P_{\text{ccps}} = 5 \text{ W} . \quad (48)$$

$$V_{\text{ccps}} = 33.3 \text{ V} . \quad (49)$$

$$I_{\text{ccps}} = 0.87 \text{ A} . \quad (50)$$

$$Z_{\text{ccps}}^p = 6.51 \Omega + j 37.4 \Omega . \quad (51)$$

C. Ensayo de Cortocircuito 13

Se aplica la misma dinámica de procedimiento descrito en ensayo de cortocircuito 12.

$$P_{\text{ccpt}} = 6 \text{ W} . \quad (52)$$

$$V_{\text{ccpt}} = 34.2 \text{ V} . \quad (53)$$

$$I_{\text{ccpt}} = 0.87 \text{ A} . \quad (54)$$

$$Z_{\text{ccpt}}^p = 7.92 \Omega + j 38.5 \Omega . \quad (55)$$

D. Ensayo de Cortocircuito 23

Se aplica la misma dinámica de procedimiento descrito en ensayo de cortocircuito 12.

$$P_{\text{ccst}} = 4.9 \text{ W} . \quad (56)$$

$$V_{\text{ccst}} = 5.98 \text{ V} . \quad (57)$$

$$I_{\text{ccst}} = 0.82 \text{ A} . \quad (58)$$

Se referencia la impedancia de cortocircuito secundaria terciaria vista desde el devanado secundario al primario.

$$Z_{\text{ccst}}^p = 5.37 \Omega + j 0.68 \Omega . \quad (59)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones (51), (55) y (59) se resuelven de manera fasorial como se aprecia a continuación.

$$Z_p^p = 4.53 \Omega + j 37.63 \Omega . \quad (60)$$

Se diferencian las impedancias secundarias y terciaria, debido a que se encuentran vistas desde el devanado primario.

$$Z_s = 2.64 \Omega - j 0.24 \Omega . \quad (61)$$

$$Z_t = 0.67 \Omega + j 0.17 \Omega . \quad (62)$$

Por medio de ensayos realizados de circuito abierto y cortocircuito, se determina el condensador resonante de (7).

$$C_t = 179.52 \mu\text{F} . \quad (63)$$

V. VALIDACIÓN

Se puede examinar resultados obtenidos experimentalmente en la tabla I y tabla II con el transformador de tensión constante basado en la metodología de diseño de circuito eléctrico y magnético equivalente descritas.

En la Fig. 12 y Fig. 13 se aprecia la división entre la sección lineal y sección de saturación del transformador ferromagnético. Ante variaciones de tensión de entrada por encima de la tensión nominal, la tensión secundaria se mantiene casi constante debido a la saturación presentada en el núcleo secundario.

TABLA I
PRUEBA EN VACÍO CON CONDENSADOR DE 177 MICROFARADIOS A 160 VOLT

TENSIÓN PRIMARIA (V)	TENSIÓN SECUNDARIA (V)
20.7	24.5
40.2	46.9
60.6	69.4
80.6	92.5
100.8	115
120.5	130.1
140.3	134.8
160.6	139.4

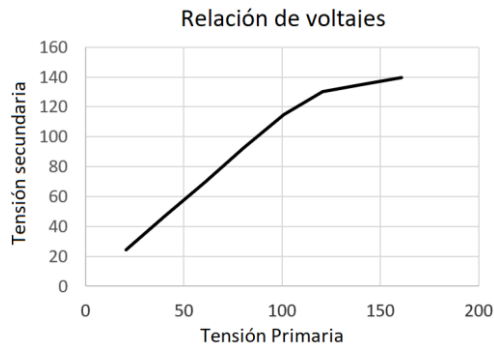


Fig. 12 Tensión primaria vs tensión secundaria transformador de tensión constante en vacío.

TABLA II
PRUEBA CARGA LUMINARIA INCANDESCENTE 70 WATT

TENSIÓN PRIMARIA (V)	TENSIÓN SECUNDARIA (V)
20.4	15
40	34.1
60.2	54
80.6	74
100.7	93.3
120.5	110.8
139.9	124.6
160.5	130.3

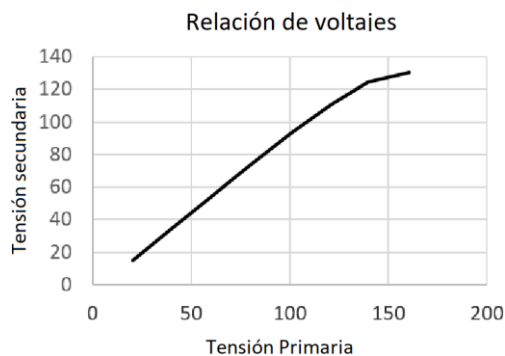


Fig. 13 Tensión primaria vs tensión secundaria transformador de tensión constante con carga.

Como se puede observar en las tablas y en las curvas de relación de voltaje, el nivel de saturación presente en la sección secundaria debido a la resonancia presentada en el terciario, permite la elevación de la tensión ante la presencia de bajos voltajes y la no presencia de sobrevoltajes en la salida, evidenciando un acondicionamiento en la onda de tensión a la salida del dispositivo.

Este comportamiento es muy ventajoso para solucionar problemas de calidad de la energía, a consideración de los autores podría vincularse a diferentes aplicaciones novedosas de electrónica de potencia como los presentados en [15]-[18], adicional también para mitigar eventos presentes en los sistemas eléctricos y aportar en la solución de estos [19].

V. CONCLUSIONES

La metodología de diseño del transformador de tensión constante basada en el circuito eléctrico y circuito magnético equivalente se validó mediante pruebas experimentales, logrando una tensión secundaria casi constante ante variaciones de tensión de entrada por encima del valor nominal.

El condensador resonante y la longitud del entrehierro se determinan por medio del análisis de circuito eléctrico equivalente y circuito magnético equivalente respectivamente siendo elementos convencionales en los CVT.

Se recomienda usar una estructura de núcleo especial de transformador de tensión constante compacta con su derivación magnética, con el fin de evitar espacios de aire indeseados en el diseño. De igual manera, el uso de condensadores en corriente alterna.

REFERENCIAS

- [1] S. Ramos-Paz, F. Ornelas-Tellez, and J. J. Rico-Melgoza, "Power quality enhancement through ancillary services provided by power electronic converters," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 209, p. 107934, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107934>.
- [2] Y. Zhang, Y. Zhang, and X. Zhou, "Classification of power quality disturbances using visual attention mechanism and feed-forward neural network," *Measurement*, vol. 188, p. 110390, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110390>.
- [3] K. Suslov, N. Solonina, and D. Gerasimov, "Assessment of an impact of power supply participants on power quality," in *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018, pp. 1–5, doi: [10.1109/ICHQP.2018.8378836](https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378836).
- [4] Y. Xu, X. Chen, M. Liu, F. Tian, and S. Yan, "A Switch-controlled Hybrid Power Quality Compensator for All-day Power Quality Compensation in AC-DC Networks at Different Times of Day," in *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2018, pp. 1–7, doi: [10.1109/POWERCON.2018.8602142](https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8602142).
- [5] V. Kavitha and K. Subramanian, "Investigation of power quality issues and its solution for distributed power system," in *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2017, pp. 1–6, doi: [10.1109/ICCPCT.2017.8074372](https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074372).
- [6] M. Krarti, "Chapter 4 - Utility Rate Structures and Grid Integration," M. B. T.-O. D. and R. of E. E. B. Krarti, Communities, and Urban Centers, Ed. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 189–245.
- [7] A. Abdulhamid, "Design and Construction of a 10 kVA, 220 Volts Constant Voltage Transformer for Line Voltage Conditioning," 2020.
- [8] R.-L. Lin, C.-H. Tsai, and N.-C. Chen, "Design and Implementation of Ferroresonant Transformer for LED Driver Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5978–5987, 2017, doi: [10.1109/TIA.2017.2728783](https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2728783).
- [9] M. A. Sánchez. Cortés, *Instituto Tecnológico de Puebla Calidad de la Energía Eléctrica*. Puebla:México, 2009.
- [10] N. Subramanian, "Analysis and Design of a New Breed of Constant Voltage Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp. 3337–3339, 1997, doi: [10.1109/20.617936](https://doi.org/10.1109/20.617936).
- [11] M. G. J. Lind, W. Xiao, and W. G. Dunford, "Modeling of a Constant Voltage Transformer," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 53, no. 2, pp. 409–418, 2006, doi: [10.1109/TCSI.2005.857550](https://doi.org/10.1109/TCSI.2005.857550).
- [12] Y. Zhilichev, "Models of Ferroresonant Transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 6, pp. 2631–2639, 2014, DOI: [10.1109/TPWRD.2014.2322365](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2322365).
- [13] C. Wm. T. McLyman, "Chapter 11 Constant Voltage Transformer (CVT)," in *Transformer and Inductor Design Handbook*, Fourth., 2011.
- [14] Elementos Magnéticos Navarra S.L., "Hilos de Cobre y Aluminio Esmaltados: Características Físicas y Eléctricas," vol. 1, no. d, p. 1.
- [15] M. Á. R. Pozueta and J. C. L. González, "Máquinas Eléctricas I-G862," España, 2016.
- [16] Meza H.A., Mendoza J., Sepulveda S. MPPT Control Strategies Applied On a Dc/Dc Boost Converter for Photovoltaic Systems. ISSN: 1692-7257 - V 2 - N30 - 2017. <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751>
- [17] Álvarez R., García M., Torregroza A. Convertidores Fotovoltaicos en Módulos Integrados Basados en Inversores de Fuente-Semi-Cuasi -Z: Un Nuevo Esquema de Control Por Modos Deslizantes. ISSN: 1692-7257 - V1 - N23, 2014.
- [18] Kavitha, A., & Uma, G. Comparative study between peak current mode and hysteretic current mode control of a single-ended primary inductance converter. *Power Electronics, IET*, 5(7), 1226–1235. doi:10.1049/iet-pel.2010.0249
- [19] López M., Castrillón O., Cano E., Análisis de Eventos Sobre Transformadores de Distribución en una Empresa del Sector Eléctrico en Colombia. ISSN: 1692-7257 - V2 - N30 - 2017. <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751>