

Modelado de transformadores de mediana-baja tensión para subestaciones eléctricas utilizando modelos expertos difusos.

Oscar-Arreola Soria¹, José de Jesús-López Villalobos¹, Manuel-Pérez Ruvalcaba¹, Mario Alberto-Tamez Álvarez¹, Roxana-García Andrade¹.

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Nuevo León; Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Av. Eloy Cavazos 2001, Toluca, Guadalupe, N.L. 67170, México. Email principal: oscar.as@nuevoleon.tecnm.mx

Resumen

En este artículo se utiliza una nueva metodología para la estimación de parámetros en máquinas eléctricas, particularmente se aplica en el diseño de transformadores, siendo parte fundamental de la ingeniería energética de suministro eléctrico, la situación es considerar el efecto operativo no lineal del transformador y el reto es la inclusión de este efecto de los parámetros de entrada en el diseño para el comportamiento de salida, en este caso se parte usando sistemas lineales y sus ecuaciones discretas son de igual manera fácilmente de evaluar, pero en el caso de los efectos no lineales, estas se ven modificadas por diversos factores que afectan el comportamiento y por ende varias ecuaciones se pueden tener para diversos casos particulares.

En el presente trabajo se desarrolla, un algoritmo predictivo basado en inteligencia artificial para evaluar el comportamiento de un transformador de mediana y baja tensión, con el cual se facilita el modelado y diseño de máquinas eléctricas, con el uso del modelo difuso se sustituyen dichas ecuaciones por un modelo parametrizado ajustable que da buenos resultados al diseñador de transformadores, datos que ayuden a predecir el comportamiento operativo no lineal (real) de la máquina eléctrica y aplicable a cualquier diseño propuesto.

Palabras clave— máquinas eléctricas, modelado, sistemas difusos, sistemas eléctricos de potencia, sistemas expertos subestaciones eléctricas.

Abstract

In this article, a new methodology is used for the estimation of parameters in electrical machines, particularly applied in the design of transformers, being a fundamental part of the energy engineering of electrical supply, the situation is to consider the non-linear operational effect of the transformer and the challenge is the inclusion of this effect of the input parameters in the design for the output behavior, in this case we start using linear systems and their discrete equations are equally easy to evaluate, but in the case of non-linear effects, these are modified by various factors that affect the behavior and therefore several equations can be had for various particular cases.

In this work, a predictive algorithm based on artificial intelligence is developed to evaluate the behavior of a medium and low voltage transformer, which facilitates the modeling and design of electrical machines, with the use of the fuzzy model these equations are

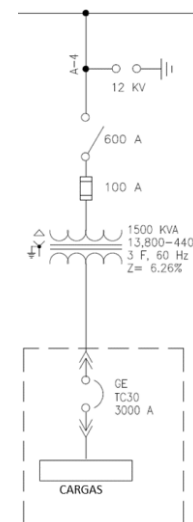
replaced. by an adjustable parameterized model that gives good results to the transformer designer, data that helps predict the nonlinear (real) operational behavior of the electrical machine and is applicable to any proposed design.

Keywords— expert systems, fuzzy systems, modeling, electrical machines, electrical substations, electrical power systems.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas en el sector eléctrico es la predicción del comportamiento de los componentes de una subestación eléctrica, en este sentido existen modelos matemáticos especificados que dan una idea del comportamiento de un transformador eléctrico de mediana-baja tensión [1,2], que es el caso que se estudia aquí. El elemento principal de la subestación eléctrica es el transformador siendo el equipo que transfiere la potencia eléctrica en valores de tensión eléctrica de consumo según la necesidad del usuario sea residencial, comercial, industrial, etc.

Figura 1 Diagrama de los elementos de una subestación eléctrica estándar.



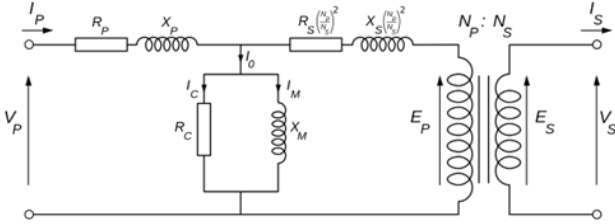
En la figura anterior el elemento más importante es el transformador, que convierte la energía y junto a otros elementos de switcheo componen la subestación eléctrica. De ahí la importancia en su análisis, como se muestra en la figura 1 del diagrama unifilar para una identificación de dichos elementos, además también se presentan los elementos de maniobra (apertura y cierre) del transformador en situaciones de operación normal o en contingencias y fallas, tanto en 13800 V y 440 V de tensión; los elementos de protección del transformador que son el apartarrayos 12 kV para proteger contra descargas atmosféricas y sobre tensión de la red, la cuchilla fusible de 600 A y 100 A respectivamente y el interruptor automático de baja tensión de 3000 A, todas ellas protegen contra cortos circuitos y sobre corrientes que se presenten al transformador.

Existen ciertos parámetros normalizados que definen las características del transformador a modelar, previo diseño y

construcción, que de acuerdo con la potencia aparente se ajustan los mismos, estos son:

- Xp : Reactancia Inductiva del Primario
- Xs : Reactancia Inductiva de secundario
- Rp : Resistencia del Primario
- Rs : Resistencia de secundario
- Rc : Resistencia del Núcleo
- Rm : Reactancia de Magnetización de núcleo

Figura 2 Diagrama lineal del transformador de mediana-baja tensión con sus parámetros indicados dentro del circuito.



Dichos parámetros ayudan a tener una estimación del comportamiento de la máquina eléctrica en cuestión y ayuda al profesional a estimar en forma lineal cómo será su desempeño general en el campo.

El transformador de acuerdo con lo presentado en la figura 2, tiene elementos de comportamiento lineal, es decir elementos resistivos e inductivos presentes; aplicando la ley de tensiones de Kirchoff a ese circuito en el lado primario que es donde se tienen todos los elementos que afectan al comportamiento de la máquina eléctrica, se obtiene una ecuación diferencial que describe su comportamiento y además vincula a todos los elementos a considerar dentro del modelado del transformador, la ecuación es:

$$v(t)_p = R_p i(t)_p + L_{ip} \frac{di(t)_p}{dt} + R'_s i(t)'_s + L'_{is} \frac{di(t)'_s}{dt} + v(t)'_s \quad (1)$$

En donde, tomando en cuenta la relación del primario versus el secundario se tienen las siguientes consideraciones:

$$R'_s = R_s \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \quad X'_s = X_s \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \quad (2)$$

$$v(t)'_s = e(t)_p = v(t)_s \left(\frac{N_p}{N_s}\right) \quad i(t)'_s = i(t)_p = i(t)_s \left(\frac{N_p}{N_s}\right) \quad (3)$$

Por otro lado, al obtener mediante la ley de corrientes de Kirchoff en la rama de excitación del primario, que es donde están los parámetros, se obtiene la siguiente ecuación diferencial que define el comportamiento de este:

$$e(t)_p = G_c e(t)_\phi + b_m \frac{de(t)_\phi}{dt} + i(t)'_s \quad (4)$$

Como parte del presente trabajo, se planteó la posibilidad de obtener un sistema experto que ayude a predecir el comportamiento real del transformador en lugar de usar los sistemas de ecuaciones diferenciales tradicionales, dando pauta a

un sistema experto basado en lógica difusa tipo I, que ayude al ingeniero proyectista a conocer mejor la condición operativa no lineal del transformador, así obteniendo un modelo más real considerando su efecto de histéresis, existen otros trabajos de estimación de parámetros reproduciendo la histéresis magnética por medio de modelo matemático y teoría Preisach [3,4], también hay modelado de circuitos magnéticos equivalentes de múltiples devanados combinado con estudio de funciones matemáticas [5] y otro incluyendo programa de simulación DSPICE y función hiperbólica para modelar la no linealidad [6].

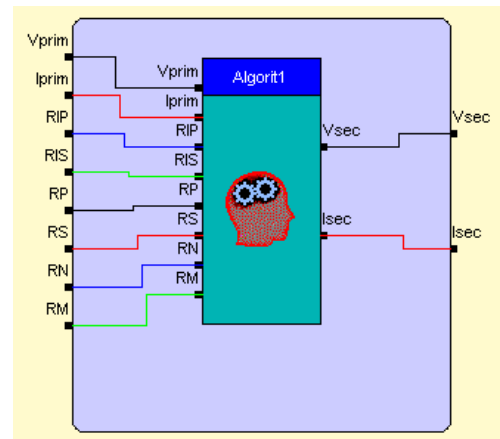
2. DESARROLLO

2.1 Metodología

Como resultado, las dos ecuaciones que definen primordialmente el cómo va a funcionar nuestro transformador, es la ecuación 1 y 4, que mediante el uso de herramientas computacionales algunas más complejas como *Matlab*®, *Scilab*® y otras un poco más simplificadas como *Modelica*® ayudan a obtener una descripción del comportamiento lineal estimado del diseño previo del transformador [7].

Ahora bien, teniendo como referencia diversos casos prácticos en donde se busca una estrategia de modelado ya sea menos complejo, simplificado o bien con ahorro computacional, utilizados en diversos campos de aplicación ingenieril, se tiene el uso de las herramientas de la inteligencia artificial como lo es la lógica difusa, de aquí la posibilidad de implementación de un sistema experto con conocimiento previo del comportamiento, como es este el caso, se tiene en el desarrollo de unos modelos difusos una oportunidad para tener una primera aproximación al modelado utilizando esta técnica que puede ser fácilmente ajustada de acuerdo a las capacidades del transformador en cuanto a potencia, y poder obtener un estimado de su comportamiento exacto discriminando todos aquellos factores que no impacten al comportamiento del transformador dentro de la subestación eléctrica.

Figura 3 Sistema de control difuso implementado con Xfuzzy de 8 entradas y 2 salidas de tipo I.



En el caso de la figura 3, se tienen como entradas las variables que definen el comportamiento del sistema y como salida sus respectivas

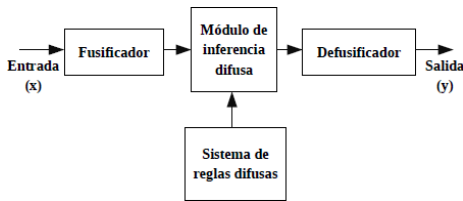
“consecuencias” de dichas variables de entrada; lo anterior se puede aplicar a diversos tipos de sistemas, como es este el caso, un modelo que pueda de igual manera decirnos cómo estimar el comportamiento de un transformador en la subestación a diseñar. Un aspecto interesante es la facilidad de implementar modelos difusos mediante una herramienta específica para el desarrollo de dichos sistemas, en este caso se utilizó *Xfuzzy*© desarrollada por [8], la cual sirvió para el desarrollo de los modelos propuestos a continuación.

2.2 Modelo complejo

En esta aproximación del modelo se tienen como referencia que la parte de fusificación en cada una de las variables en este caso ocho, las que son los seis parámetros del transformador y dos de valores de entrada a través del primario, en este caso voltaje y corriente, para esto se toma en cuenta un modelo de implicación difuso de tipo *min-max* y con una defusificación de tiempo de centroide, en un primer modelo.

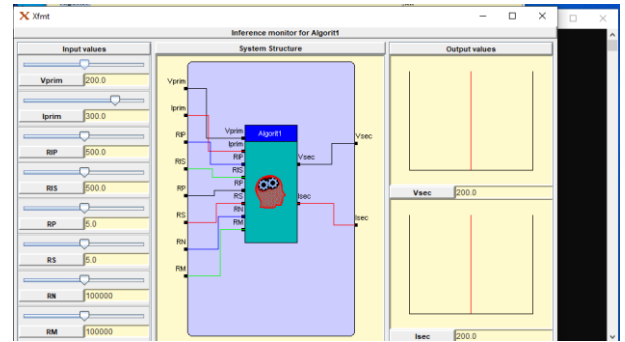
El reto principal en esta propuesta es la alta integración de variables de entrada, lo que ocasiona que el desarrollo e integración del algoritmo difuso para el modelo sea complejo, aunque se pueda implementar, se tiene que tomar en cuenta la múltiple comparación entre 8 variables y la cantidad de reglas que eso involucra, que aunque se tiene una herramienta de simplificación queda una cantidad importante de reglas a cumplir (27 reglas), para fines de análisis e interpretación resulta complicado.

Figura 4 Elementos de un Sistema difuso tipo 1 analizado en este caso.



Para la figura anterior, en este caso se tiene que las 8 variables de entrada, las referentes en esta aproximación son funciones de membresía de 3 elementos en cada una de las variables lingüísticas de entrada, y para las 2 salidas se utilizan funciones de membresía similares. En inicio, se hicieron pequeños ajustes en los valores de asíntotas de las funciones de membresía adaptándolas a lo más parecido a las condiciones reales de operación. En el caso de las reglas se tienen expresiones con conectores tipo *and* y ya seleccionadas las reglas activadas se usa un conector tipo *or*, lo cual involucra aún con la herramienta de simplificación de reglas, una cantidad de reglas importantes con muchas entradas a valorar y ajustar de acuerdo con el modelo esperado a obtener equivalente.

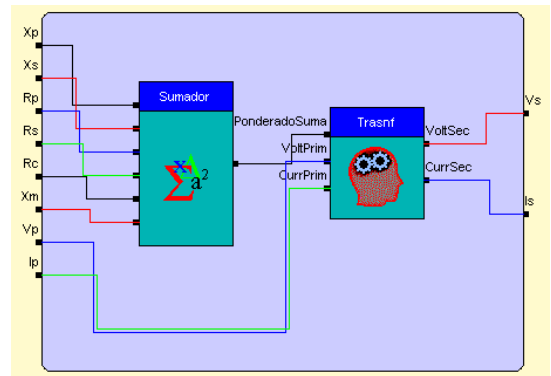
Figura 5 Prueba del sistema difuso variando sus parámetros de entrada.



2.3 Modelo ponderado

En este caso se tiene otra estrategia para plantear el modelo del transformador, en la cual las variables de la máquina eléctrica, que es a través de una ponderación de variables, 6 en este caso, con el fin de reducir el modelo difuso para aplicar; lo anterior conlleva a que el número de entradas difusas se reduzca a 3, con sus respectivas salidas se dejen igual con 2, como consecuencia se tiene un algoritmo difuso más pequeño, más fácil de ajustar y un número más pequeño de reglas en este caso 7 que el algoritmo de simplificación redujo de 14, que es más pequeño que de nuestra primer propuesta. En ambos casos las variables a analizar son iguales, pero cambia la estrategia mediante un peso estimado de los parámetros que afectan al sistema eléctrico. Un aspecto importante para comentar en el modelado con la herramienta *Xfuzzy*, su modificación y adaptación fue sencilla para lo cual se puede adaptar el modelo anterior haciendo este ajuste de manera muy rápida.

Figura 6 Modelo difuso ponderando las 8 entradas para simplificar el sistema.



En la figura anterior se muestra la ponderación de los parámetros del transformador y se ajusta su peso en la respectiva entrada del algoritmo difuso en la variable lingüística correspondiente en sus respectivas funciones de membresía, en este caso resultó

conveniente usar la forma trapezoidal con tres funciones, las otras dos variables, voltaje y corriente del primario del transformador, se quedaron en forma triangular, así mismo las salidas del algoritmo difuso. En este caso se tiene una reducción importante en el aspecto de computación en la aplicación del modelo, con resultados para la prueba de la estimación de valores más rápidos y de más fácil sintonización y ajuste de las funciones de membresía del modelo.

Figura 7 Reglas difusas para el modelo ponderado ya reducidas por la herramienta de reducción.

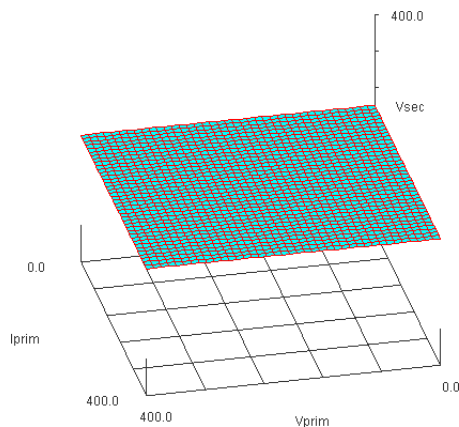
Rule			Premise	Conclusion
0	1.0	if	((PonderadoSuma == Bajo & VoltPrim == Bajo & CurrPri...	VoltSec = Bajo, CurrSec = ...
1	1.0	if	((PonderadoSuma == Bajo & VoltPrim == Medio & CurrPri...	VoltSec = Bajo, CurrSec = ...
2	1.0	if	((PonderadoSuma == Bajo & VoltPrim == Alto & CurrPri...	VoltSec = Medio, CurrSec = ...
3	1.0	if	((PonderadoSuma == Medio & VoltPrim == Bajo & CurrP...	VoltSec = Medio, CurrSec = ...
4	1.0	if	((PonderadoSuma == Medio & VoltPrim == Medio & Cur...	VoltSec = Medio, CurrSec = ...
5	1.0	if	((PonderadoSuma == Medio & VoltPrim == Alto & CurrP...	VoltSec = Alto, CurrSec = ...
6	1.0	if	((PonderadoSuma == Alto & VoltPrim == Alto & CurrPri...	VoltSec = Alto, CurrSec = ...

En este caso se tiene una reducción importante en el aspecto de computación en la aplicación del modelo, con resultados para la prueba de la estimación de valores más rápidos y de más fácil sintonización y ajuste de las funciones de membresía del modelo.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de la implementación de ambos modelos resultó de manera rápida y funcional de acuerdo con la idea de ambos modelos de aproximación en donde los parámetros del transformador se pueden ajustar de acuerdo con la necesidad del modelo mismo, en otras palabras, ajustar las respectivas funciones de membresía. Evidentemente, el modelo complejo tomó más tiempo en sus respectivos ajustes con respecto al ponderado, aunque los resultados más o menos parecidos con efecto lineal en ambos casos, aunque en el ponderado se muestra una pequeña distorsión que en función a los efectos de saturación del núcleo se puede interpretar de esa manera.

Figura 8 Gráfica de respuesta a la salida con respecto al voltaje del secundario.

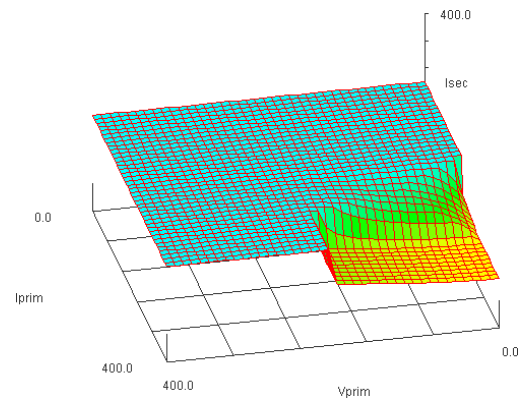


En la figura anterior se muestra la respuesta uniforme de la señal de salida de acuerdo con lo esperado en la etapa de respuesta lineal del transformador, tomando en cuenta el modelo difuso que se implemento. Adicionalmente, en el caso de la figura anterior en

ambos modelos se da una respuesta similar, en donde la forma de entrada de voltaje tanto del primario y del secundario es igual, por ende, el resultado es similar con respecto a ambos modelos propuestos.

En el caso de la corriente si existe una diferencia en cuanto a los resultados, en ambos casos se muestra una distorsión en los límites, siendo considerado como un efecto no lineal debido a la saturación del transformador, en el caso del modelo ponderado, que se muestra en la figura 9, el resultado fue más evidente y certero en cuanto a la distorsión que se puede tener en el secundario del transformador.

Figura 9 Gráfica de corriente de salida del secundario con respecto a los valores de entrada.



En uno de los extremos de la figura anterior se ve el efecto de la no-linealidad debido a la histéresis debido a la saturación del transformador, en este caso se tiene una respuesta cercana a lo desarrollado con el modelado basado en ecuaciones diferenciales, se tiene una exactitud cercana al 97 % siendo aceptable para esta primera aproximación.

Por otro lado, se tiene la facilidad de una rápida implementación de los modelos difusos debido a que se tiene la base de conocimientos previa que facilita la identificación del comportamiento para la predicción del funcionamiento de un transformador antes de ser construido. Vea la figura siguiente del resultado de las señales de prueba del transformador.

Figura 10 Relación de corrientes en el primario y secundario resultantes, en donde la distorsión mínima, dado que no se agrega el efecto de la histéresis.



3.1 Trabajo futuro

Como se menciona es trabajo inicial, por lo que queda aún un proceso de sintonización más enfocada y ajustar de acuerdo con más modelos de transformadores de acuerdo con la potencia de trabajo, por lo que esta parte se tiene contemplada para trabajo complementario posterior a esta línea de modelos expertos para el modelado de transformadores.

4. REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 141-1993, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 345 East 47th Street, New York, NY 10017-2394, USA.
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, "Electric Machinery", McGRAW-Hill, 2003, ISBN 0-07-366009-4.
- [3] Mikhail Andreev¹, Alexey Suvorov¹, Nikolay Ruban¹, Ruslan Ufa¹, Alexander Gusev¹, Alisher Askarov¹, Anton Kievets¹, Development and research of mathematical model of current transformer reproducing magnetic hysteresis based on Preisach theory, IET, Generation, Transmission & Distribution, ISSN 1751-8687, 14 may 2020.
- [4] Alfredo De Blas Del Hoyo (2005). Modelización de la histéresis magnética y su aplicación al cálculo numérico en máquinas eléctricas (Tesis), Departamento de ingeniería eléctrica-Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [5] Yildiz, A. B. (2023). Equivalent Circuit Based Modeling of Multiple Winding Transformers. *Electric Power Components and Systems*, 1-8.
- [6] Chan, J. H., Vladimirescu, A., Gao, X. C., Liebmann, P., & Valainis, J. (1991). Nonlinear transformer model for circuit simulation. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 10(4), 476-482.
- [7] Oscar-Arreola Soria, J. Jesús López Villalobos, Manuel-Pérez Ruvalcaba, Raúl Acosta Landín. Análisis de un modelo para la evaluación de una subestación eléctrica de mediana tensión y baja capacidad en estado estable-transitorio, Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada. ISSN 2007-9478, Vol.10, Núm. 18. Año 2023
- [8] Mendoza, M., Torres-González, M., & Prieto, A. J. (2024). Machine-Learning Algorithms in the Service Life Prediction of Facility Management: Approach in Southern Chile. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 38(2), 04024001