

Análisis de un modelo para la evaluación de una subestación eléctrica de mediana tensión y baja capacidad en estado estable-transitorio.

Oscar-Arreola Soria^a, J. Jesús López Villalobos^a, Manuel-Pérez Ruvalcaba^a, Raúl Acosta Landín^a

^aTecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Nuevo León, Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, Guadalupe, N.L., México.

Resumen

Como necesidad de una estrategia de evaluación de una respuesta transitoria en el diseño de nuevas subestaciones eléctricas de bajo consumo (< 75 KVAs), se requiere modelar un sistema que pueda ser evaluado previamente y con fines de apoyo de la verificación normativa de la subestación. Adicionalmente en el estudio se implementó una herramienta de modelado de sistemas dinámicos como lo es Modélica®, y se procedió a llevar a cabo el desarrollo de dicho estudio y evaluando los resultados obtenidos de algunos proyectos nuevos de diversos sectores comerciales, en este caso una carnicería y una tienda de conveniencia.

Palabras clave— Modelado, sistemas dinámicos, subestaciones eléctricas, validación.

Abstract

Due to the need for an evaluation strategy of a transient response in the design of new low-consumption electrical substations (<75 KVAs), it is necessary to model a system that can be previously evaluated and with the purposes of supporting the normative verification of the substation. Additionally, there is a possibility of implementing said model with the use of a dynamic systems modeling tool such as Modelica®, therefore, the implementation of said model was carried out to evaluate the results of the new projects to develop for various commercial sectors, in this case a butcher shop and a convenience store.

Keywords—Dynamic systems, electrical substations, modeling, validation.

1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente diagrama unifilar se muestran los elementos que componen a una subestación eléctrica de distribución (SED) que son los equipos y alimentadores de potencia, dispositivos de interrupción y control, dispositivos de protección y tierras, instrumentos de medición; en este trabajo el estudio se centra en los elementos de alimentación y transformación de la potencia [1,2].

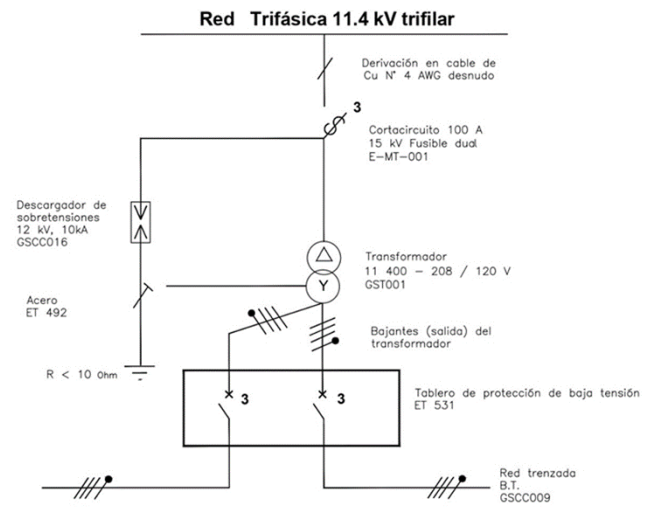


Fig. 1. Diagrama unifilar de subestación eléctrica de mediana tensión de baja capacidad y sus elementos [1].

Los transformadores son equipos que tienen un comportamiento no lineal en su funcionamiento debido al núcleo ferromagnético [2], el cual presenta efectos como histéresis y saturación como se muestra en la figura 2, por lo tanto, sus ondas de corrientes se distorsionan y hay presencia de armónicos, lo que conlleva a dar un suministro de energía con un cierto factor de calidad y también provoca pérdidas propias.

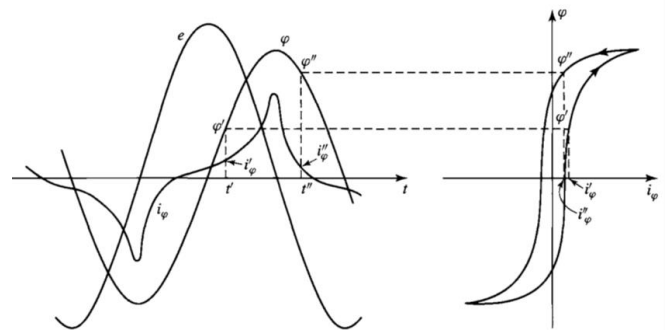


Fig. 2. Distorsión en corriente de excitación debido a curva de histéresis y saturación de un transformador a considerar, que se agrega al modelo.

El estudio tiene la finalidad de conocer los valores a través del simulador de la plataforma de software para modelado de sistemas dinámicos en la SED [3,4], es con el fin de conocer las siguientes características operativas en tiempo real de regulación de voltaje, eficiencia y factor de calidad; éstas características son de interés relevante para los comerciantes o negocios de tiendas de conveniencia con baja demanda de energía eléctrica, pero a nivel total o global es una cantidad grande de consumidores y que es importante en el ahorro de energía, así contribuir en reducir el problema del cambio climático.

Un transformador de distribución es un transformador que suministra la última etapa de transformación en la red de distribución de energía eléctrica, al reducir la tensión usada en los circuitos de distribución al nivel de tensión usado por el cliente.

En el proceso de selección de la herramienta computacional para el modelado del transformador, el cual está basado en ecuaciones diferenciales, sabemos que hay opciones clásicas que pueden ayudar (Matlab y Scilab), pero su implementación hace complejo la especificación misma, tomando en cuenta [5,6], se ve otra opción pensada en un lenguaje basado en descripción de ecuaciones diferenciales a resolver, que son nuestro caso de análisis directo y de ahí que se considere su uso para el análisis que requerimos hacer del transformador, la herramienta se trata es Modelica®.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo de un circuito eléctrico equivalente referido al lado de la fuente del transformador.

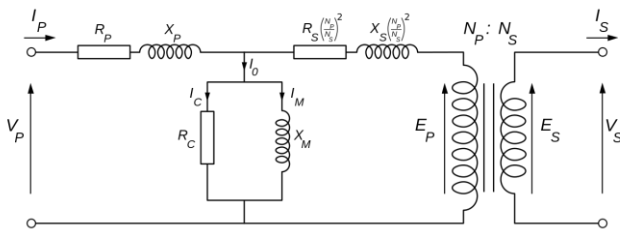


Fig. 3. Diagrama de circuito eléctrico equivalente para el análisis del transformador.

Aplicando la ley de tensiones de Kirchhoff al circuito equivalente simplificado referido al lado primario, de la figura 3 se obtiene la siguiente ecuación diferencial.

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

donde

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

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

Obtener la ecuación diferencial aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff, en la rama de excitación, referida al lado primario, de la figura 3.

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

2.2 Simulación con Modélica

Partiendo de las ecuaciones anteriores, se implementaron varios modelos para aplicar las ecuaciones diferenciales descritas anteriormente con el fin de proceder a crear una librería que nos ayude validar el comportamiento de la máquina eléctrica en cuestión, teniendo como resultado que la especificación del sistema de ecuaciones diferenciales de 2 variables, 2 ecuaciones y de naturaleza trivial para que se pueda obtener un modelo que se pueda simular y ser usado como modelo en otros proyectos. El modelo del sistema de ecuaciones diferenciales implementado se muestra en la figura 4, note en la parte referente a ecuaciones del código mostrado la implementación directa de las ecuaciones diferenciales.

```
// Constantes
constant Real pi=Modelica.Constants.pi;
constant Real frec=60;

// Parametros
parameter Real Xp=43.2 "Reactancia Inductiva Primario";
parameter Real Rp=5.93 "Resistencia Primaria";
parameter Real Rs=3.39 "Resistencia Secundaria";
parameter Real Xs=40.6 "Reactancia Inductiva Secundario";
parameter Real Rc=244000 "Resistencia de Nucleo";
parameter Real Xm=114000 "Resistencia de Magnetizacion";

//Especificacion de ecuaciones
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput Vsec annotation( ... );
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput Isec annotation( ... );
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Iprim annotation( ... );
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Vprim annotation( ... );

equation
  Iprim = (1/Rc)*Vsec + (1/Xm)*der(Vsec) + Isec;
  Vprim = Rp*Iprim + (Xp/(2*pi*frec))*der(Iprim) + Rs*Isec + (Xs/(2*pi*frec))*der(Isec) + Vsec;
```

Fig. 4. Código directo de implementación de las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento del transformador unifilar basado en las ecuaciones 1 y 4 respectivamente.

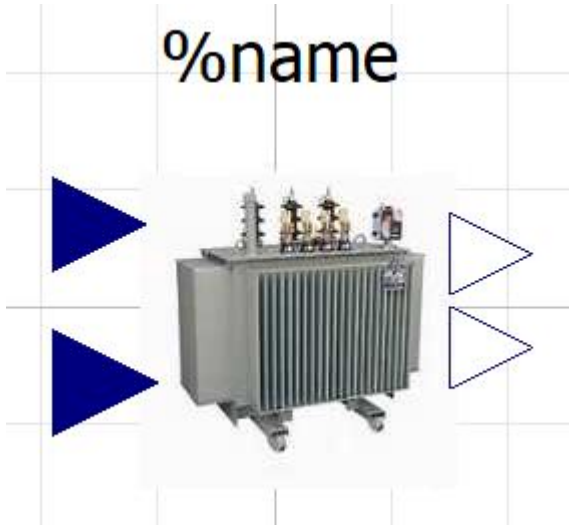


Fig. 5. Bloque de aplicación que puede ser usado en cualquier modelo a desarrollar en Modélica©.

Para fines de aplicación práctica de los casos evaluados en campo se tomó en consideración un transformador de distribución monofásico 75 kVA, 6580 V: 120 V, 60 Hz; tiene los siguientes parámetros referidos al lado alto-voltaje:

$$R_p = 5.93 \Omega \quad X_p = 43.2 \Omega \quad R'_s = 3.39 \Omega \quad X'_s = 40.6 \Omega$$

$$R_c = 244 k\Omega \quad X_m = 114 k\Omega$$

donde

$$L_p = \frac{X_p}{2\pi f} = \frac{43.2}{2\pi 60} = 0.1146 H \quad (5) \quad L'_s = \frac{X'_s}{2\pi f} = \frac{40.6}{2\pi 60} = 0.1077 H \quad (6)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{114000}{2\pi 60} = 320.39 H \quad (7)$$

Asumiendo que el transformador está suministrando 75 kVA en sus terminales de bajo-voltaje para una carga con factor de potencia de 0.87 atrasado; que en este caso se puede aplicar las dos SEDs consideradas para su evaluación. En la siguiente sección se describirán algunos resultados del análisis inicial del modelo.

Dentro del desarrollo del proyecto se tiene primero que establecer que nuestro modelo descriptivo de las ecuaciones diferenciales del transformador unifilar a modelar en la subestación pueda arrojar resultados debido a su propia descripción del mismo, para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados que validan dicha funcionalidad en la figura 6 de corrientes y figura 7 de voltajes.

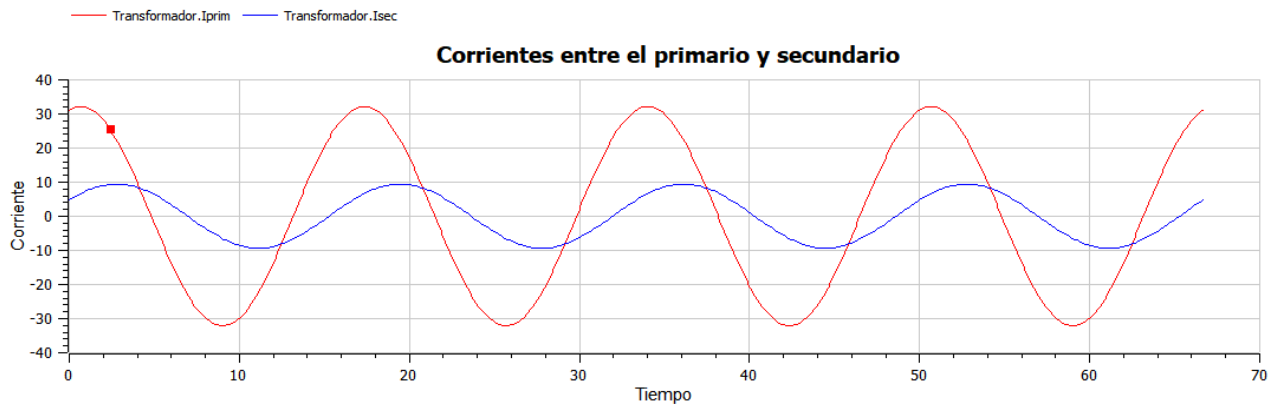


Fig. 6. Resultado de la respuesta de la ecuación de corriente del primario y secundario del transformador, que valida el comportamiento de su ecuación diferencial.

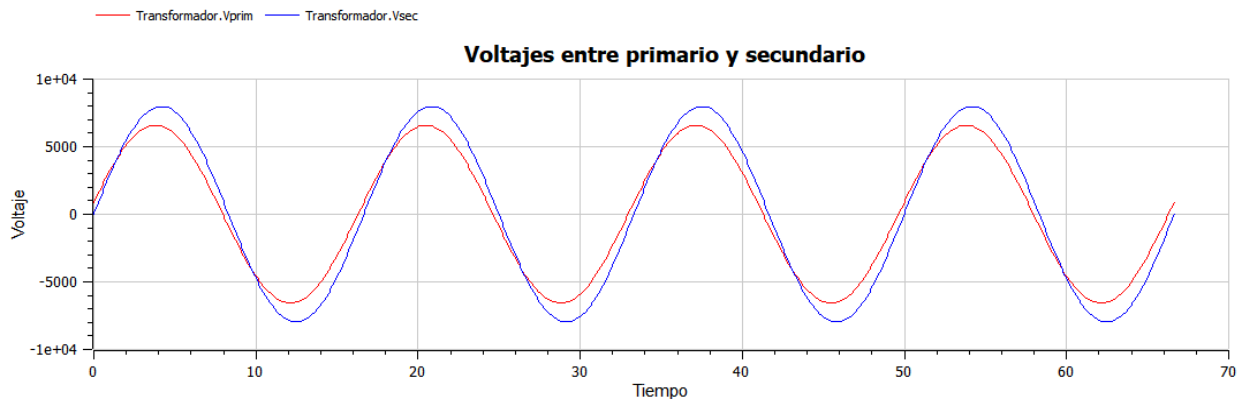


Fig. 7. Respuesta de la derivada del voltaje del primario y primario con fines de validar efecto en el transitorio, validado en Modelica©.

Hecho lo anterior se procede al desarrollo del bloque exportable para ser usado en cualquier otro modelo de sistema eléctrico en cual el efecto de las cargas y de los voltajes de alimentación puedan ser ajustados bajo las diversas condiciones que nos ayuden a estudiar el comportamiento transitorio y estable de una SED. El resultado del desarrollo de la propuesta se pudo validar y hacer pruebas iniciales en donde se pudo variar el voltaje aplicado y poder hacer mediciones de sus efectos de corriente, quedando el siguiente esquema de prueba:

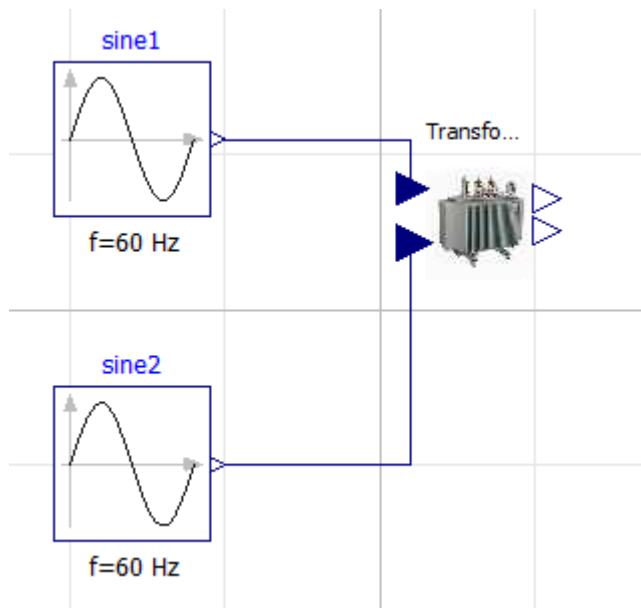


Fig. 8. Modelo de ambiente de prueba de la SED con ajuste de carga en corriente y voltaje de secundario, especificado a manera de módulos de prueba.

Como se muestra en la figura 8, se muestra solo el análisis al aplicar fuentes de voltaje que ayuden a conocer las respuestas transitorias iniciales, en el entendido que aún falta desarrollar

más pruebas de las diversas condiciones de alimentación de cargas que se conectan a través de la subestación en cuestión.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como proyecto en su etapa inicial, se consideran que los resultados al momento son parciales y todavía requieren un trabajo adicional, que está en desarrollo, pero en la especificación de un modelo que cumpla las expectativas matemáticas de las ecuaciones diferenciales se cumplieron al 100 % dando la posibilidad del desarrollo de los bloques funcionales que se aplican en las SEDs de las características de mediana y baja tensión; otro aspecto interesante fue la creación de una herramienta computacional que nos ayuda a analizar el efecto transitorio de nuestra máquina eléctrica, que otras herramientas solo hacen el desarrollo de un análisis en estado estacionario o estable, con lo anterior se abre la posibilidad de poder contar con un análisis completo desde el momento que se energiza nuestra subestación.

Por otro lado, se tiene la creación de un modelo “exportable” a otros modelos que la herramienta modelica ofrece mediante su interface gráfica facilitando la variación de condiciones como lo son la carga y la alimentación del transformador de una manera funcional y práctica, adecuando su aplicación de acuerdo al cliente a quien abastecer energía, en este caso una carnicería y una tienda de conveniencia.

3.1 Trabajo futuro y agradecimiento

Como se comentó anteriormente, este trabajo está en su etapa inicial de desarrollo, por lo tanto, se tendrán otros resultado adicionales sobre las diversas condicionantes de trabajo de la SED, así también, una implementación y análisis de resultados obtenidos para obtener una base de conocimientos, que ayuden a la predicción de comportamientos de acuerdo a cargas y alimentación.

Se agradece el desarrollo del proyecto a las empresas que facilitaron su acceso para apoyar en el diseño de sus proyectos

de subestación y al Tecnológico Nacional de México las facilidades para el desarrollo del presente proyecto.

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] Michael M. Tiller, “Introduction to Physical Modeling with Modelica”, Klumer Academic Publishers, 2004, ISBN 978-0-7923-7367-4
- [4] Burhenne, S., Wystreil, D., Elci, M., Narmsara, S., & Herkel, S. (2013, August). Building performance simulation using Modelica: Analysis of the current state and application areas. In Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August (pp. 26-28).
- [5] Casella, F. (2015). Simulation of large-scale models in modelica: State of the art and future perspectives. In the 11th International Modelica Conference (pp. 459-468).
- [6] Galicia Castro, M. A. (2015). Desarrollo de un módulo didáctico para la enseñanza de diseño de subestaciones eléctricas.