





Plataforma para la determinación de reactancias de eje directo transitoria y subtransitoria de máquinas síncronas

Platform for the determination of transitory and subtransient direct axis reactance of the synchronous machines

^aEmerson Joal Ortiz-Castillo, ^bLuis David Pabón-Fernández, ^cEdison Caicedo-Peñaranda, ^dJorge Luis Díaz-Rodríguez, ^eAldo Pardo-García

-  a. Ingeniero eléctrico, emerson.ortiz@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  b. Magíster controles industriales, davidpabon@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  c. Magíster controles industriales, eacaicedop@gmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  d. Maestría en automática, jdiazcu@gmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  e. Posdoctor en ingeniería eléctrica, apardo13@hotmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Recibido: Mayo 22 de 2021 **Aceptado:** Agosto 27 de 2021

Forma de citar: JE.J. Ortiz-Castillo, L.D. Pabón-Fernández, E. Caicedo-Peñaranda, J.L. Díaz-Rodríguez, A. Pardo-García, "Plataforma para la determinación de reactancia de eje directo transitoria y subtransitoria de la máquina síncrona de rotor cilíndrico", *Mundo Fesc*, vol 11, no. S2 pp. 21-227, 2021.

Resumen

Este artículo trata sobre el diseño e implementación de una plataforma por medio de sensores y de una tarjeta de adquisición de datos permite visualizar variables en tiempo real y obtener parámetros de las pruebas aplicadas a las máquinas síncronas en estado dinámico. En particular se utiliza en máquinas síncronas de polos lisos en las cuales, como estudio de caso, se realiza la prueba de apertura de cortocircuito trifásico y una prueba de cortocircuito repentino en los devanados del estator con el fin de calcular las reactancias de eje directo transitoria, sub-transitoria y de estado permanente. Se utilizan sensores de tensión y de corriente los cuales captan y llevan información a una tarjeta NI USB 6009 de la National Instruments que sirve de interfaz con el software de evaluación Labview® en el cual se realizan los cálculos y acciones de control y adquisición necesarias para realizar los cálculos. Se muestra los esquemas de control, diseño e implementación del módulo de trabajo, adicionalmente los algoritmos y pruebas de funcionamiento realizadas al prototipo.

Palabras clave: máquina síncrona, parámetros eléctricos, plataforma, reactancia transitoria, reactancia sub-transitoria.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: apardo13@hotmail.com



Abstract

This paper deals with the design and implementation of a platform by means of sensors and a data acquisition board that allows to visualize real time variables and obtain parameters of the tests applied to synchronous machines in dynamic state. In particular, it is used in smooth-pole synchronous machines in which, as a case study, the three-phase short-circuit opening test and a sudden short-circuit test on the stator windings are carried out in order to calculate the transient direct shaft reactance, sub-transient reactance and permanent state reactance. Voltage and current sensors are used which capture and carry information to a National Instruments NI USB 6009 board that serves as an interface with the Labview® evaluation software in which the calculations and control and acquisition necessary to perform the calculations. The control schemes, design and implementation of the platform are shown, in addition to the algorithms and performance tests carried out on the prototype.

Keywords: synchronous machine, electrical parameters, platform, transient reactance, sub-transient reactance.

Introducción

En la actualidad la máquina síncrona toma un papel relevante en la generación de energía eléctrica presentándose como el eje de la generación hidroeléctrica y termo hidráulica, al igual que para fuentes renovables de energía eléctrica[1], de igual forma sus ventajas como motor la hacen muy llamativa para ser utilizada como dispositivo motriz capaz de actuar como compensador de energía reactiva[2] Todas estas aplicaciones han incentivado el desarrollo de estrategias de control que se fundamentan en el modelo dinámico de la máquina[3]-[7]. Por lo que el conocer con exactitud los parámetros del modelo de la máquina es fundamental para desarrollar estrategias de control [7]-[9].

El presente artículo presenta una plataforma desarrollada para estimar los parámetros eléctricos en estado dinámico de la máquina sincrónica, particularmente las reactancias de eje directo transitoria y subtransitoria, [10] que se hallan con las pruebas de apertura de cortocircuito y test de corto circuito repentino [11]. y que suelen ser utilizados en esquemas de control de velocidad y modelos de este tipo de máquinas.

La característica principal de la máquina síncrona es que la velocidad del rotor es

la misma que la del campo magnético del estator, a esto se le conoce como velocidad de sincronismo, que depende de la frecuencia eléctrica y de los polos de la máquina[12] El variar la frecuencia de la alimentación eléctrica cambiará la velocidad mecánica, sin embargo técnicas avanzadas de control son desarrolladas para controlar además de la velocidad, el torque, la corriente, el flujo y otras variables.

Actualmente se presentan desarrollos en los cuales se presenta formas de calcular las reactancias naturales del eje directo en los estados estable, transitorio y subtransitorio. se establece el modelo dinámico y se simulan características dinámicas en los cuales se tiene en cuenta la asimetría de los parámetros de la máquina debido a su estructura [13]-[16]. De igual forma se presentan desarrollos en la determinación de la reactancia de fuga que se puede determinar con un procedimiento simple y sin riesgo para su estimación llamado excitación constante, en donde se hace posible comparar las reactancias de Potier y subtransitorias. [17]. En otras pruebas realizadas con el mismo método se presenta la determinación de la reactancia síncrona del eje en cuadratura de las máquinas síncronas de polo saliente., propuesto como adecuado para máquinas grandes instaladas. [18]

Pese a estos desarrollos en el área de la determinación de parámetros en estado dinámico de la máquina síncrona no se presenta una plataforma que automatice estas pruebas y que permita determinar los parámetros de forma clara, precisa y rápida, es por esto que este artículo presenta una plataforma que con sensores de tensión y corriente, una interfaz gráfica y los algoritmos requeridos en LabView®, automatiza las pruebas requeridas para la determinación de la reactancia de eje directo transitoria y subtransitoria de la máquina síncrona de rotor cilíndrico.

Modelo dinámico de la máquina síncrona
 Con el fin de comprender y diseñar accionamientos es necesario conocer el modelo dinámico de la máquina sometida a control, sin embargo, este modelo debe ser diseñado para sistemas de control que incorporen preferiblemente todos los efectos dinámicos importantes que se producen durante el funcionamiento estable y transitorio de la máquina, también el modelo debería ser válido para cualquier variación de voltajes y corrientes generados por el convertidor que alimenta la máquina, además que describa adecuadamente el rendimiento de la máquina tanto en régimen permanente como en transitorio.[12]

Una forma aceptada para modelar la máquina síncrona ha sido la utilización de la teoría de los fasores espaciales que están estrechamente relacionada con la teoría de dos ejes de las máquinas eléctricas, a continuación se presenta de manera general los principios de dicho modelo [12]

A. Fasor espacial del estator y corrientes del estator.

Si los devanados del estator son alimentados por un sistema de corrientes trifásicas $i_{sA}(t)$, $i_{sB}(t)$, $i_{sC}(t)$, que varían arbitrariamente en el tiempo, teniendo en cuenta que el

punto neutro está aislado no podría existir secuencia cero entonces.

$$i_{s0}(t) = i_{sA}(t) + i_{sB}(t) + i_{sC}(t) = 0 \quad (1)$$

En una máquina de fase en cuadratura, i_{sD} e i_{sQ} son corrientes reales, no transformadas, que fluyen en los dos devanados del estator s_d y s_q que están en cuadratura espacial, matemáticamente el fasor espacial de las corrientes del estator teniendo en cuenta las corrientes de secuencia cero se puede estimar como la adición de estas componentes en cuadratura [19] Sin embargo, si la corriente de secuencia cero no es cero, las corrientes del estator de fase variable se obtienen como muestra a continuación en las siguientes ecuaciones:

$$i_{sA} = Re(\bar{i}_s) + i_{s0} \quad (2)$$

$$i_{sB} = Re(a^2 \bar{i}_s) + i_{s0} \quad (3)$$

$$i_{sC} = Re(a \bar{i}_s) + i_{s0} \quad (4)$$

Simplemente se adiciona el valor de las corrientes en secuencia 0 a las proyecciones correspondientes del fasor espacial en los ejes, para una máquina trifásica se puede establecer las componentes de este fasor espacial mediante las transformadas de Clarke y de Park [20].

B. Fasor espacial del rotor y corrientes del rotor.

Se considera que los fasores espaciales del rotor son similares a las del estator, pero la diferencia es que la fase θ del rotor se desplaza hacia el eje s_a del estator formando un ángulo θ y α que es el ángulo alrededor de la periferia con respecto al eje del devanado del rotor r_a . Si se asume que los devanados tienen un mismo número de vueltas efectivas entonces $N_r = N_r \cdot k_{wr}$, donde N_r es el número de vueltas y k_{wr} es el factor del bobinado del rotor, realizando el mismo análisis que se hizo con el estator se asume que no hay corrientes de secuencia 0

en el rotor, la distribución de f.e.m. del rotor $i_r = (\theta, t)$ producidas por las corrientes de los bobinados del rotor $i_{ra}(t)$, $i_{rb}(t)$ y $i_{rc}(t)$ se obtiene como muestra la siguiente ecuación [12]:

$$\bar{i}_r = \frac{2}{3} [i_{ra}(t) + a i_{rb}(t) + a^2 i_{rc}(t)] = |\bar{i}_r| e^{-j\alpha_r} \quad (5)$$

Se deduce que el fasor espacial de las corrientes del rotor con respecto al marco de referencia rotatorio es:

$$\bar{i}'_r = |\bar{i}_r| e^{j\alpha'_r} = |\bar{i}_r| e^{j(\alpha_r + \theta_r)} \quad (6)$$

donde α es el ángulo del vector espacial de las corrientes con respecto al eje ra , que es estacionario con respecto al movimiento del rotor, por lo cual se deduce de la ecuación (5) el fasor espacial y la corriente del rotor [12].

C. Fasor espacial de voltajes del estator y el rotor

Los fasores espaciales de los voltajes de estator y rotor se pueden definir de manera similar a las cantidades de fasores espaciales definidos anteriormente. Por lo tanto, el fasor espacial de tensión del estator en el marco de referencia estacionario es

$$\bar{u}_s = \frac{2}{3} [u_{sA}(t) + a u_{sB}(t) + a^2 u_{sC}(t)] = u_{sD} + j u_{sQ} \quad (7)$$

Y el fasor espacial de tensión del rotor en el marco de referencia fijado al rotor móvil es:

$$\bar{u}_r = \frac{2}{3} [u_{ra}(t) + a u_{rb}(t) + a^2 u_{rc}(t)] = u_{r\alpha} + j u_{r\beta} \quad (8)$$

En las dos anteriores ecuaciones $u_{sA}(t)$, $u_{sB}(t)$, $u_{sC}(t)$ y $u_{ra}(t)$, $u_{rb}(t)$ y $u_{rc}(t)$ son los valores instantáneos de las tensiones del estator y las tensiones de fase del rotor

respectivamente y u_{sQ} , u_{sD} , $u_{r\alpha}$ y $u_{r\beta}$ son los componentes de eje directo y de cuadratura correspondientes

Esta teoría de los fasores espaciales ha sido ampliamente utilizada en el modelamiento de la máquina y en los esquemas de control permitiendo llegar a una representación matricial de la máquina como se muestra en la ecuación (9) y (10)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_a}{dt} \\ \frac{d\psi_b}{dt} \\ \frac{d\psi_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{amf} \\ L_{bmf} \\ L_{cmf} \end{bmatrix} i_f \quad (10)$$

En donde Ψ representa enlaces de flujo, i corriente y L inductancias. Como se puede observar este modelo depende de parámetros propios de la máquina que deben ser determinados, como lo son las inductancias, este hecho muestra la necesidad de hallar parámetros eléctricos propios que permitan obtener el modelo con el fin de poder proponer técnicas de control precisas

Un ejemplo de esto se muestra en la figura 1, en donde se presenta un control orientado del flujo del estator de una máquina síncrona de imanes permanentes (IPMSM) en donde aparecen inductancias del estator referenciados al eje directo y cuadratura como muestra [21]

El control orientado al flujo de estator de máquinas síncronas de imanes permanentes interiores (IPMSM) en coordenadas cartesianas, está representado por un diagrama de bloques como muestra la anterior figura 1, el cual si se observa detalladamente se aprecia en el procesador de señales retroalimentadas, inductancias

propias de la máquina, que a su vez hace parte del estimador de flujo ayudando a los bloques de corriente del lazo de control. [12]

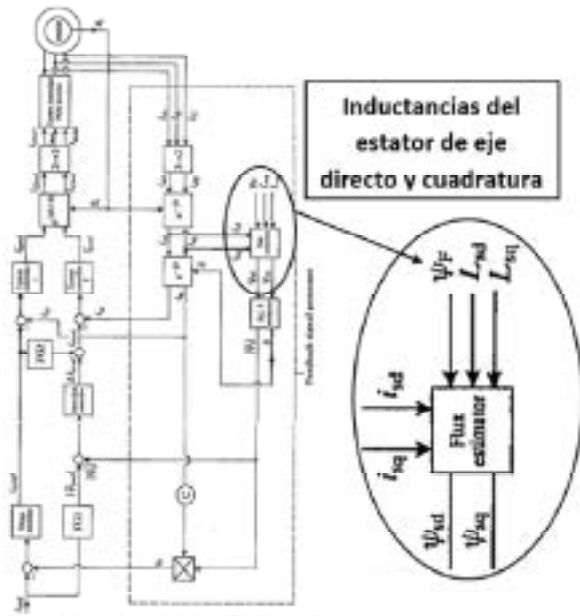


Figura 1. Diagrama de bloques de control del IPMSM orientado al flujo del estator. Fuente: Vas, P. (1.998).[12].

Profundizando de control orientado al flujo de estator en coordenadas cartesianas, se deriva una parte que es la región de debilitamiento de los flujos, en el cual se puede observar que para hallar las tensiones del estator en el marco de referencia directo y cuadratura en una máquina de polos salientes se necesita de la resistencia estática como se muestra a continuación.

$$U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_1 \psi_{sq} \quad (11)$$

$$U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_1 \psi_{sd} \quad (12)$$

Además, para hallar la tensión máxima del estator se requiere de las reactancias estáticas de eje directo propias de la máquina que dependen de las impedancias por lo tanto $X_{sd} = \omega_1 L_{sd}$ y $X_{sq} = \omega_1 L_{sq}$ para la tensión máxima como se muestra a continuación[12]:

$$|\bar{u}_s|^2 = (R_s i_{sd} - X_{sq} i_{sq})^2 + (R_s i_{sq} + X_{sd} i_{sd} + \omega_1 \psi_F)^2 \quad (13)$$

Este es un ejemplo sencillo de la utilización de los parámetros de la máquina síncrona en las técnicas avanzadas de control de velocidad para la máquina síncrona

Metodología para la determinación de los parámetros

Para determinar la reactancia de eje directo transitoria y subtransitoria de una máquina de rotor cilíndrico se utilizarán las pruebas de apertura de cortocircuito y test de corto circuito repentino

La prueba de apertura de cortocircuito se realiza sobre una máquina sincrónica de polos lisos la cual se acciona bajo el régimen de generador, a frecuencia nominal, se cortocircuitan sus bornes y se ajusta la excitatriz de la máquina para que la corriente emergente sea la corriente nominal. Se adquieren las ondas de voltaje y de corriente mediante la utilización de sensores de tensión e intensidad, luego con la ayuda de un relé se abre el cortocircuito de manera repentina y se obtiene el oscilograma de la respuesta de la máquina, con el cual se hallan las reactancias de eje directo en estado subtransitorio y transitorio de la máquina síncrona, X_d'' y X_d' respectivamente. La figura 2 muestra la metodología de cálculo utilizada.

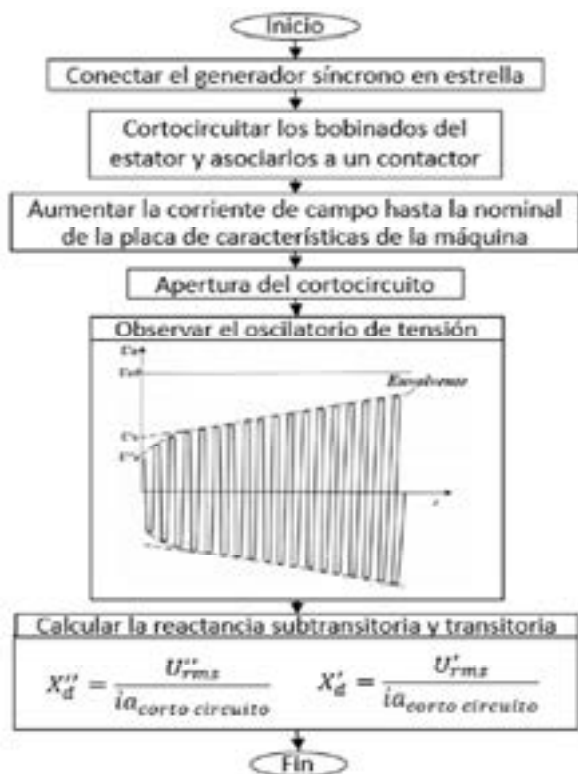


Figura 2. Proceso prueba de apertura de corto circuito en los devanados de la máquina sincrónica de polos lisos

A través de la prueba de test de cortocircuito repentino se determinan las reactancias de eje directo subtransitorias y transitorias, la máquina sincrónica en régimen de generador se hace girar a velocidad nominal y se establece mediante el control de la excitatriz la mitad de la tensión nominal en la salida; se conectan los sensores de tensión para captar los voltajes de línea y una sonda de corriente en el estator con el fin de observar el oscilograma de las variables cuando se genera un corto en el devanado del estator y de acuerdo a este oscilograma se extrae la envolvente y se trazan curvas que ayudan a distinguir los estados subtransitorio, transitorio y estado estable para hallar las respectivas reactancias. La figura 3 muestra el procedimiento de cálculo:

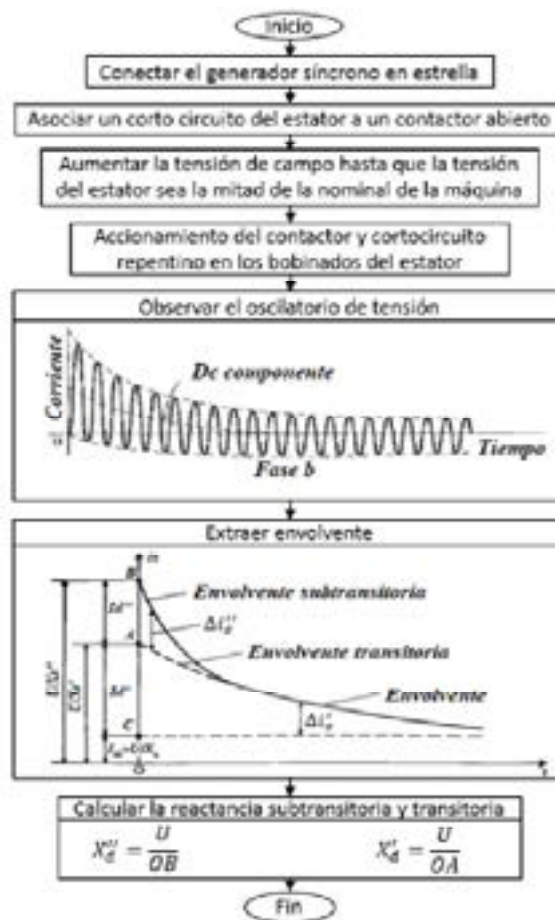


Figura 3. Proceso prueba de test de corto circuito repentino en los devanados de la máquina sincrónica de polos lisos

Diseño e implementación de la plataforma

La plataforma desarrollada consta de un motor de inducción de 5 hp como motor primario del generador a parametrizar, cuyo accionamiento de la etapa de potencia de la máquina consta de dos contactores, un relé térmico, dos variadores de frecuencia marca ABB ACS-143 y ACS-800, estos variadores son de gran importancia para las pruebas ya que regularán la velocidad de rotación del generador asegurando la permanencia de la frecuencia nominal en todos los instantes de las pruebas. De igual forma la plataforma consta de las diferentes etapas de adquisición y control que se describen a continuación.

A. Sistema de sensores

Los sensores de tensión utilizados son transformadores lineales diseñados teniendo en cuenta que el número de vueltas y área del núcleo garanticen la no saturación y la operación este en la zona lineal hasta con una tensión de dos veces la nominal, para esto se tuvo en cuenta que el codo de la curva de saturación para lamina ferromagnética de grano orientado es de 1,3T, por lo que se toma un valor de 0.8T como parámetro de diseño, para que los sensores trabajen por debajo del codo de saturación, el calibre utilizado para la construcción es 30 que soportará una corriente de hasta 0.15 A. Bajo estas características se diseñaron, y construyeron 3 sensores de tensión idénticos cuyo salida pico no superara en ningún momento 5 voltios pico que suporta la tarjeta de adquisición.

Una vez construido los sensores de tensión se tomaron las medidas requeridas para la caracterización de la respuesta del sensor, con ayuda de Excel se calcula la pendiente que sirve en los escalonamientos para la programación del algoritmo, a continuación la figura 4 muestra la caracterización del sensor de tensión de una fase:

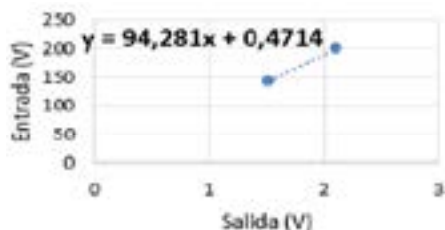


Figura. 4. Escalonamiento sensor de tensión 1.

Cabe resaltar que, en la instalación de los sensores de tensión, fue necesario construir un circuito electrónico divisor de tensión para garantizar que el voltaje obtenido a las salidas sea menor a 10V que es la tensión máxima permitida para trabajar con la tarjeta lógica de adquisición de datos.

Para los sensores de corriente se utilizaron tres sondas de corriente AC/DC Fluke referencia 80i-110s con salida BNC aislada de 600v, estas sondas amperimétricas cuentan con un rango entre 0.1A a 100A para corriente DC y en AC además tiene un ancho de banda (-3 dB) de 100 kHz y dos escalas de 10mV/A y 100mV/A que pueden ser empleadas ya sea el caso, además de una perilla para la calibración del cero (0).

Por otro lado, el tablero de sensores también cuenta con 4 bornes para el uso de relés marca SONGLE referencia SRD-05VDC-SL-C, de 10A a 250VAC - 125VAC y en tensión DC es de 30VDC a 28VDC para poder accionar los contactores con ayuda de las señales digitales de la tarjeta de adquisición de datos.

B. Tarjeta de adquisición de datos (Interfaz)

Para la realización del acople entre los sensores y el software se utiliza una tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments referencia NI USB – 6211, que cuenta con 16 entradas análogas y 16 digitales, la cual además es compatibles con el software Labview.

La conexión de los sensores de tensión y de corriente a las entradas de la tarjeta de adquisición de datos se realizó de la siguiente manera: 6 entradas análogas, 3 utilizadas para los sensores de tensión y otras 3 para las sondas de corriente, todos conectados de forma referencial, además de otra entrada para el sensor de velocidad, como las conexiones son referenciales se construyó una circuito con varias entradas comunes para el puerto de conexión a tierra, de igual forma se utilizaron 2 salidas digitales para el accionamiento de los relés de control.

La figura 7 muestra el diagrama de distribución de sensores:

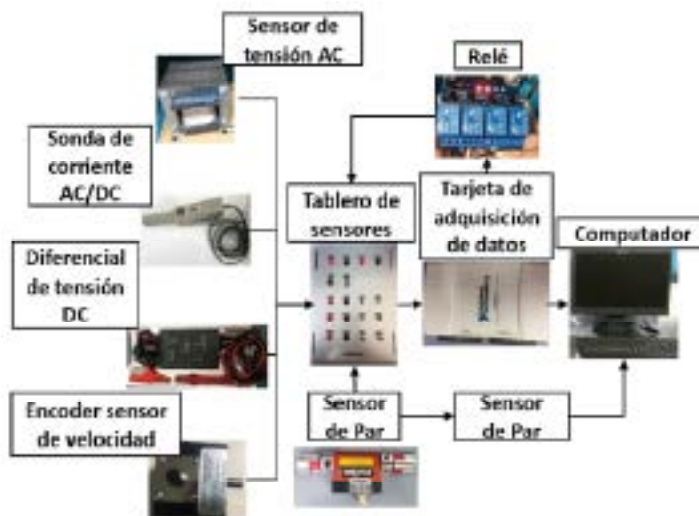


Figura 5. Conexión de los sensores y tarjeta de adquisición para la interfaz.

C. Algoritmos

Los algoritmos asociados a la interfaz gráfica y adquisición de datos se desarrollaron en LabView. En el caso de la prueba de apertura de corto circuito se exige captar las señales que llegan de un sensor de tensión y de las 3 sondas de corriente; esto se realiza con el bloque DAQ en donde se agregaron las señales con configuración referencial, estas señales se filtran para eliminar el posible ruido de alta frecuencia que pueda aparecer. Los datos adquiridos se almacenan en memoria par su posterior análisis. La figura 6 muestra la estructura del algoritmo.

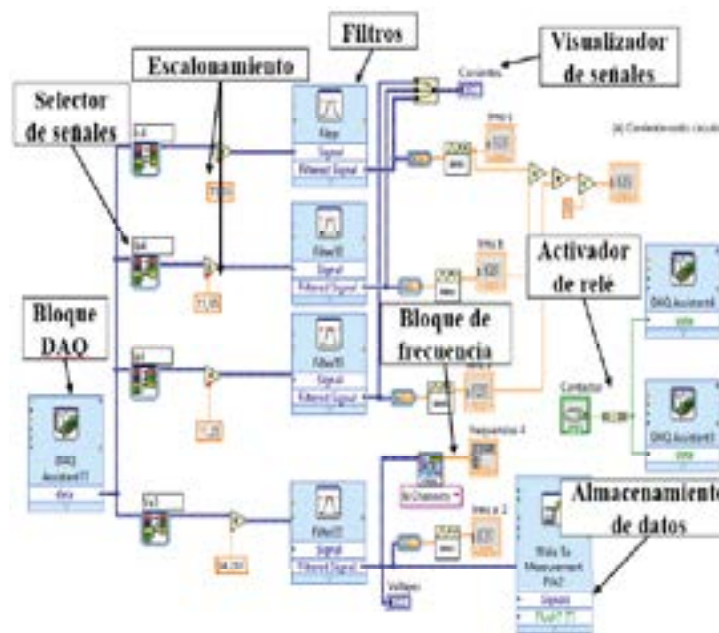


Figura. 6. Algoritmo prueba apertura de cortocircuito motor sincrónico de polos lisos.

Dentro del algoritmo de adquisición también se incluye un botón y un bloque DAQ con salidas digitales para activar el relé y así mismo poder accionar el contactor que físicamente realizará el cortocircuito, igualmente y para todas las pruebas se realiza el escalonamiento de las señales provenientes de los sensores.

Una vez realizada la adquisición el valor de la corriente promedio se anota en el cuadro de cálculos y con ayuda del bloque de almacenamiento de datos se gráfica en Excel para así por medio de está observar el oscilatorio en la onda de tensión y de esta manera calcular las reactancias de eje directo subtransitorias y transitorias de la prueba de apertura de corto circuito, fuera del ciclo While de adquisición se encuentra el algoritmo de operaciones, en donde se pueden calcular las reactancias de eje directo transitorias y subtransitorias.

La siguiente figura muestra el algoritmo en donde se puede ingresar los valores de la corriente de corto circuito, la tensión subtransitoria y transitoria como muestra la fig. 9:

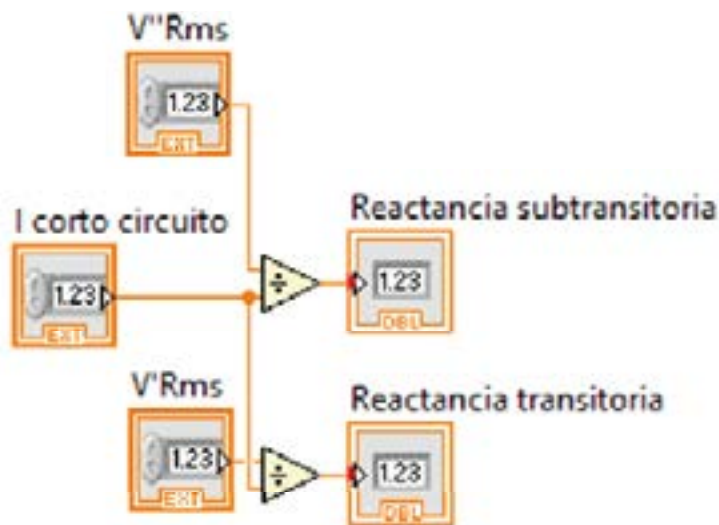


Figura 7. Algoritmo y panel frontal prueba de apertura de cortocircuito.

La prueba de corto circuito repentino del motor síncrono de polos lisos exige captar las señales que llegan de los sensores de tensión y de las sondas de corriente.

De acuerdo a los valores de tensión y con ayuda de los datos de oscilación de la corriente, cuando se realiza el corto circuito, se calculan los parámetros de las reactancias (la señal de corriente de campo se agrega con el fin de observar también la caída de la esta forma de onda).

El algoritmo programado es muy similar al del test presentado anteriormente, sin embargo en este caso se adquieren 2 señales de corriente una para campo y otra para estator y las 3 señales de las tensiones del estator. La figura 8 muestra el algoritmo desarrollado.

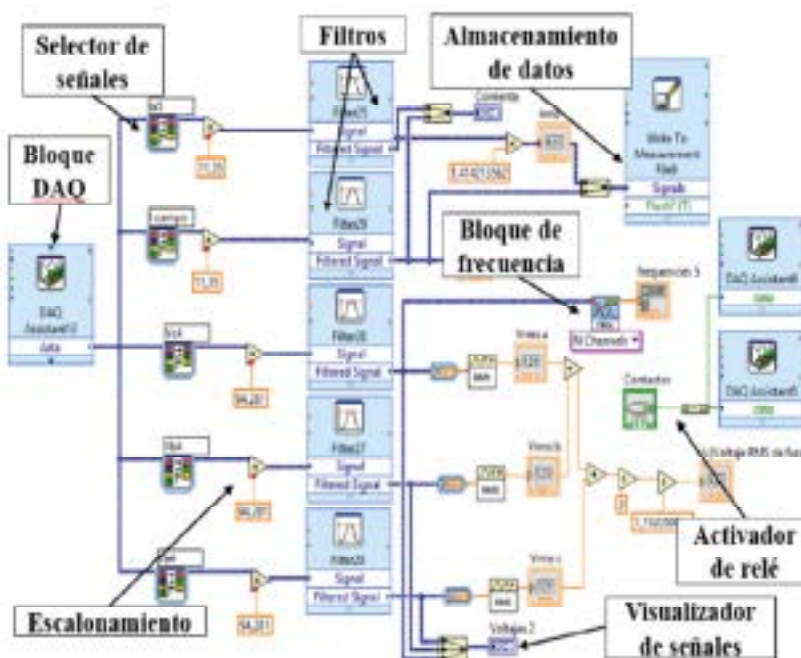


Figura 8. Algoritmo prueba test de cortocircuito repentino motor sincrónico de polos lisos.

El valor de la tensión promedio se anota en el cuadro de cálculos y con ayuda del almacenamiento de datos se gráfica en Excel la señal de corriente, para así por medio de está poder observar el oscilatorio que generó el cortocircuito, con ayuda de la gráfica y el software se calcula la reactancia de eje directo transitorias y subtransitorias. La figura 9 muestra el algoritmo de programación para hallar las reactancias de eje directo.

Pruebas de funcionamiento

Con el ánimo de validar el funcionamiento de la plataforma se realizó un estudio de caso sobre dos máquinas sincronas una de 350 W de 4 polos, 60 Hz, 1800 rpm, rotor cilíndrico y de excitatriz con anillos rozantes. Y otra de 730 W de 4 polos, 60 Hz, 1800 rpm, rotor cilíndrico y de excitatriz con anillos rozantes.

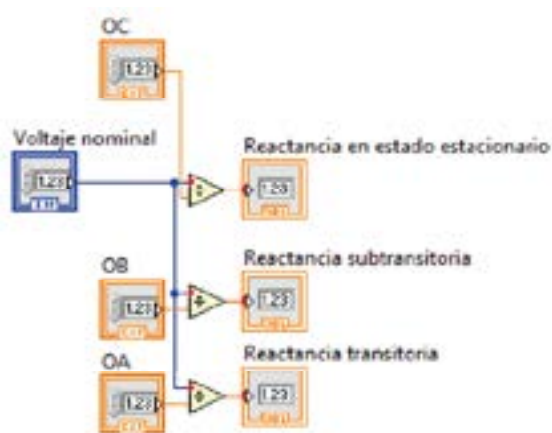


Figura 9. Algoritmo en Labview para hallar las reactancias de eje directo de la máquina sincrónica en la prueba de test de cortocircuito repentino.

La prueba de apertura de corto circuito trifásico para hallar la reactancia de eje directo transitoria y subtransitoria de la primera máquina de realizó de la siguiente forma: el motor primario de inducción se conecta en delta y se alimenta con el variador de frecuencia, el generador sincrónico se conecta en Y y las bobinas del estator se conectan con el contactor de potencia que es controlado con un relé dependiente de la salida digital de la plataforma, se conectan las tres sondas de corriente en estos mismos devanados, y un sensor de tensión.

Cuando la máquina está en funcionamiento se envía desde el programa una señal digital para activar el relé colocando en

cortocircuito las bobinas del estator, se empieza a variar la tensión de campo hasta que sea la nominal, se escribe en el cuadro de cálculos el promedio de las corrientes y luego se vuelve a oprimir el botón de relé con el fin de abrir el corto, en ese preciso instante se capta el oscilatorio de la tensión y se extrae la envolvente como muestra la figura la figura 10:

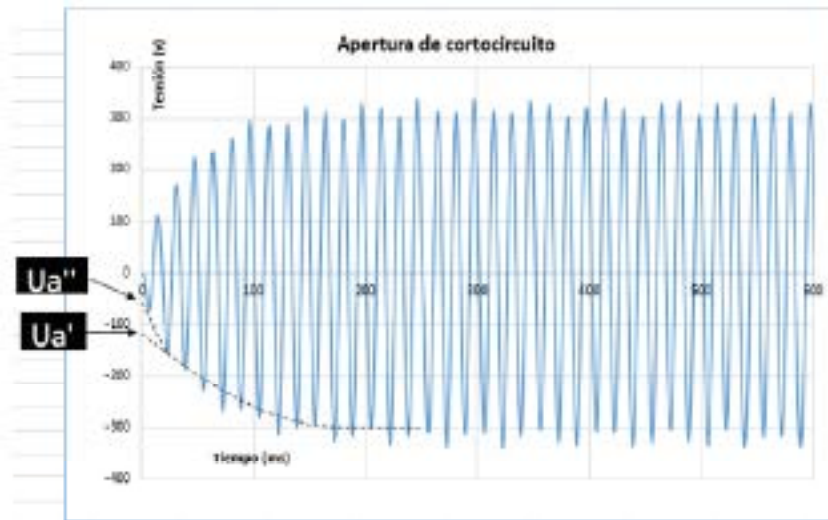


Figura 10. Oscilograma de la prueba de apertura de cortocircuito.

Con ayuda del cuadro de cálculos del algoritmo y teniendo en cuenta las envolventes de la onda se calculan las reactancias transitorias y subtransitorias como se aprecia en la fig. 11:

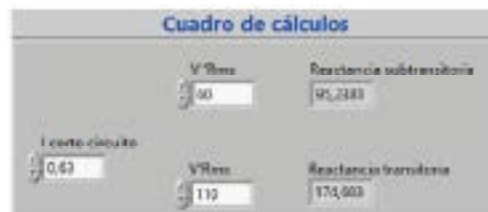


Figura 11. Cuadro de cálculos prueba de apertura de cortocircuito.

Para la prueba de corto circuito repentino trifásico para hallar la reactancia de eje directo transitoria y subtransitoria del segundo motor síncrono descrito. Se realizó un procedimiento similar a la anterior, el motor de inducción se conecta en delta y se alimenta con el variador de frecuencia, el generador sincrónico se conecta en Y y las bobinas del estator se asocian con el contactor y este con un relé, también se conectan los tres sensores de tensión y una sonda de corriente a los devanados del estator, adicional se conecta otra sonda al devanado de campo para observar la caída de corriente.

Cuando la máquina está en funcionamiento se aumenta la tensión de campo de tal manera que la máquina trabaje a tensión nominal, se anota en el cuadro de cálculos la tensión promedio y a partir de allí y con ayuda del programa se envía una señal digital para activar el relé y así mismo el contactor, en ese preciso instante se capta el oscilatorio de la corriente del estator como se aprecia en la figura 12.

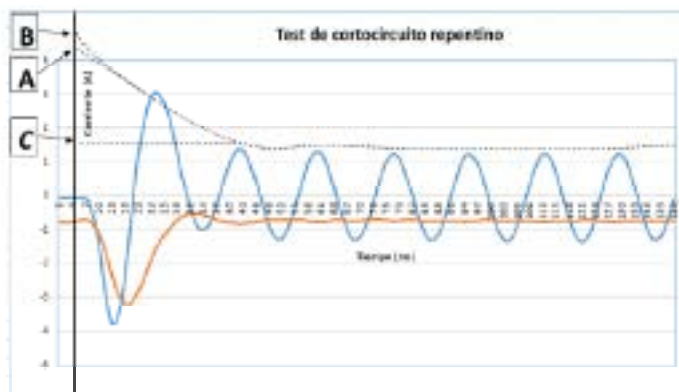


Figura 12. Osciloscopia prueba test de cortocircuito repentino.

Con ayuda de la gráfica se remueve la componente en DC y se traza las envolventes transitoria y subtransitoria, con ayuda del cuadro de cálculos del algoritmo se calculan las reactancias transitoria y subtransitoria como se observa en la figura 13.

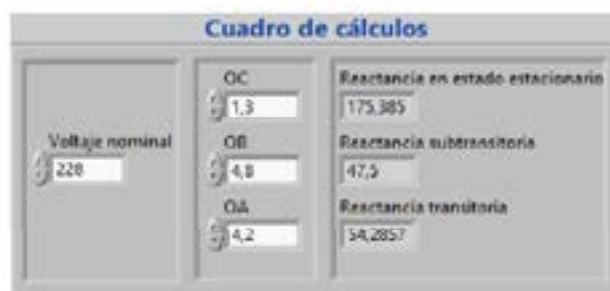


Figura 13. Osciloscopia y cuadro de cálculos prueba de test de corto circuito repentino.

Conclusiones

Las pruebas de apertura de cortocircuito y test de corto circuito repentino son dos pruebas similares la única diferencia es que una utiliza el osciloscopia de tensión y la otra el de corriente, pero de igual manera las dos son iguales de eficientes para hallar las reactancias de eje directo subtransitoria y transitoria de la máquina síncrona de polos lisos.

La plataforma desarrollada es de gran aporte en la determinación de parámetros, ya que primero deja visualizar señales y valores en tiempo real además tiene un bloque de almacenamiento de datos el cual permite observar más detenidamente los osciloscopios de la onda, a parte si se compara económicamente con un analizador de red la plataforma es más asequible.

La determinación de parámetros eléctricos en estado dinámico de la máquina síncrona juega un papel fundamental en el avance investigativo sobre el control avanzado de motores eléctricos ya que actualmente estas investigaciones necesitan de parámetros propios de la máquina, que con ayuda de esta plataforma podrían facilitarse.

Referencias

- [1] M. Ashabani and J. Jung, "Synchronous Voltage Controllers: Voltage-Based Emulation of Synchronous Machines for the Integration of Renewable Energy Sources," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49497-49508, 2020. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976892
- [2] I. Deaconu, A. Chirilă and V. Constantin.

- Maximal reactive power compensation. Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1. pp. 199-202, 2017. Doi: 10.24084/repqj15.272.
- [3] J. S. Lee and G. Choi, "Modeling and hardware-in-the-loop system realization of electric machine drives — A review," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 194-201, Sept. 2021. Doi: 10.30941/CESTEMS.2021.00023
- [4] L. Tao, J. Sun, Z. Tian, M. Huang, X. Zha and J. Gong, "Speed-Sensorless and Motor Parameters-Free Starting Method for Large-Capacity Synchronous Machines Based on Virtual Synchronous Generator Technology," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 6607-6618, Aug. 2021, Doi: 10.1109/TIE.2020.3008383
- [5] W. Chai and B. -i. Kwon, "Design of an asymmetric rotor pole for wound field synchronous machines," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 321-327, Dec. 2021. Doi: 10.30941/CESTEMS.2021.00037
- [6] H. -S. Kim and K. Lee, "Model Predictive Current Control With Online Parameter Estimation for Synchronous Reluctance Machine Controlled by High-Frequency Signal Injection Position-Sensorless," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25267-25277, 2022. Doi: 10.1109/ACCESS.2022.3156694
- [7] Y. Nie, I. P. Brown and D. C. Ludois, "Deadbeat-Direct Torque and Flux Control for Wound Field Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2069-2079, March 2018, Doi: 10.1109/TIE.2017.2739696
- [8] S. -W. Su, C. M. Hackl and R. Kennel, "Analytical Prototype Functions for Flux Linkage Approximation in Synchronous Machines," in *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 265-282, 2022. Doi: 10.1109/OJIES.2022.3162336
- [9] A. Varatharajan, G. Pellegrino, E. Armando and M. Hinkkanen, "Sensorless Control of Synchronous Motor Drives: Accurate Torque Estimation and Control Under Parameter Errors," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 5367-5376, Oct. 2021. Doi: 10.1109/JESTPE.2020.3037792
- [10] N. Amiri, S. Ebrahimi, M. Chapariha, J. Jatskevich, and H. W. Dommel, "Voltage-behind-reactance model of six-phase synchronous machines considering stator mutual leakage inductance and main flux saturation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 138, pp. 155–164, 2016
- [11] S. E. Lyshevski and S. E. Lyshevski, "Synchronous machines," *Electromechanical Syst. Electr. Mach. Appl. Mechatronics*, pp. 559–692, 2018.
- [12] P. Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control," Oxford University Press, New York, 1998.
- [13] V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, and E. C. Bortoni, "Parameter estimation of synchronous machines considering field voltage variation during the sudden short-circuit test," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 114, no. July 2019, p. 105421, 2020.
- [14] M. Malekpour, R. Azizipanah-Abarghooee, M. Zare, A. Kiyoumars, and V. Terzija, "An explicit formulation for synchronous machine model in

- terms of the manufacturer data,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 108, no. November 2018, pp. 9–18, 2019.
- [15] C. G. Bright, “A theoretical derivation of the unsaturated d-axis reactances of synchronous machines from first principles,” in *2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 470–474, 2008.
- [16] S. Xuanfeng, L. Qingfu, and Y. Shiyang, “Analysis on characteristics of permanent magnet linear synchronous machines with large armature resistances and small reactances,” in *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, pp. 434-437, 2005.
- [17] B. T. Araujo, M. S. Han, B. Kawkabani, and E. C. Bortoni, “Estimation of the armature leakage reactance using the constant excitation test,” in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 313–317.
- [18] E. Bortoni, B. Araujo, and J. Jardini, “Estimation of Quadrature Axis Synchronous Reactance Using the Constant Excitation Test,” in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018, p.
- [19] “Modelo dinámico de la máquina sincrónica de polos salientes en vectores espaciales y su aplicación al control directo de par,” 2009.
- [20] A. A. León, A. Bueno, and M. Aller, “Modelo Dinámico de la Máquina Sincrónica de Polos Salientes en Vectores Espaciales y su Aplicación al Control Directo de Par.”
- [21] T. Englert et al., “ScienceDirect Model Predictive Torque Control of Model Torque Model Predictive Predictive Torque Control Control Permanent Magnet Synchronous Machines Permanent Magnet Synchronous Machines Permanent Magnet Synchronous,” vol. 1, pp. 758–763, 2017.