

DISEÑO DE INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL MONITOREO DEL DESBALANCE DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN REDES ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS

Carlos Levi Cartagena Lobos

Ingeniero industrial. Docente Investigador, Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Centro Regional Santa Ana.

Correo electrónico: carlos.cartagena@itca.edu.sv

David Ernesto Cortez

Ingeniero Eléctrico. Docente Coinvestigador, Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Centro Regional Santa Ana.

Correo electrónico: dernesto.cortez@itca.edu.sv

Recibido: 31/05/2024 - Aceptado: 17/07/2024

Resumen

La producción de energía eléctrica es esencial para el desarrollo económico y social de un país. Sin embargo, la calidad de la energía suministrada puede verse afectada por variaciones de carga, perturbaciones externas y desequilibrios entre las fases, para contar con una herramienta para el monitoreo del desbalance, la Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE Centro Regional Santa Ana desarrolló una investigación en automatización e instrumentación virtual, con el objetivo de diseñar un sistema para monitorear el desbalance del voltaje y la corriente entre las fases A, B y C de redes eléctricas trifásicas. El diseño experimental utilizó hardware especializado para el acondicionamiento de señales de voltaje y corriente. El resultado es una aplicación que funciona como un instrumento virtual, con la que se puede monitorear el desbalance de voltaje y corriente. Se demostró que el aumento del desequilibrio de voltaje entre las fases en un sistema trifásico también conduce a un aumento en el desequilibrio de corriente. El diseño incluye el registro de alarmas, visualización de señales de voltaje y corriente en formato rectangular y fasorial. El modelo se puede implementar en el monitoreo del desbalance de voltaje y corriente en subestaciones y generadores trifásicos. También tiene uso académico en el campo de la calidad de la energía, utilizándolo como instrumento virtual en ambientes controlados de un laboratorio de pruebas de sistemas de potencia. El sistema almacena en la nube y de forma local datos de corrientes y voltajes presentes en la red eléctrica, segundos antes de presentar un desbalance para el análisis de las causas de la anomalía. El instrumento virtual incluye sensores, una tarjeta de adquisición de datos, un Dashboard y una plataforma de servicios en la nube. De la investigación se concluye que todo proceso de generación y distribución de energía eléctrica para mantener la calidad debe contar con sistemas de monitoreo periódico de las principales variables eléctricas, utilizando software y hardware especializado como el diseñado, para tomar medidas correctivas en el campo.

Palabras clave

Sistema trifásico, sistemas de potencia, redes eléctricas, sensores remotos, máquinas eléctricas, corrientes eléctricas, instrumentación virtual.

DESIGN OF A VIRTUAL INSTRUMENT FOR MONITORING VOLTAGE AND CURRENT UNBALANCE IN THREE-PHASE POWER NETWORKS

Abstract

Electrical energy production is essential for a country's economic and social development. However, the quality of the energy supplied can be affected by load variations, external disturbances and unbalance between phases. To have a tool for monitoring unbalance, the Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE Centro Regional Santa Ana developed a research on automation and virtual instrumentation to design a system to monitor the voltage and current unbalance between phases A, B, and C of three-phase electrical networks. The experimental design used specialized hardware for voltage and current signal conditioning. The result is an application that functions as a virtual instrument to monitor voltage and current unbalance. It was demonstrated that an increase in voltage unbalance between phases in a three-phase system also increases current unbalance. The design includes alarm logging and displays voltage and current signals in rectangular and phasor format. The model can be implemented to monitor voltage and current unbalance in three-phase substations and generators. It also has academic applications in power quality, using it as a virtual instrument in controlled environments of a power system testing laboratory. The system stores data of currents and voltages in the cloud and locally, captured seconds before an unbalance occurs to analyze the causes of the anomaly. The virtual instrument includes sensors, a data acquisition card, a Dashboard, and a cloud services platform. From the research, it is concluded that every process of generation and distribution of electrical energy, to maintain quality, must have periodic monitoring systems of the main electrical variables, using specialized software and hardware such as the one designed to take corrective measures in the field.

Keyword

Three-phase system, power systems, electricity grids, remote sensors, electrical machines, electrical currents, virtual instrumentation.

Introducción

Uno de los indicadores de la calidad de la energía eléctrica es el desbalance de tensión y corriente, que se produce cuando el valor eficaz de tensiones de fase o desfases entre fases no son iguales [1]. El desbalance de tensión y corriente puede causar pulsaciones de par, sobrecalentamiento, vibraciones, ruido y daños en las máquinas eléctricas, entre otros efectos negativos.

Para evitar o minimizar estos problemas, es necesario contar con un sistema de monitoreo que permita medir y registrar el desbalance de tensión y corriente en las redes eléctricas, así como generar alarmas cuando se detecten anomalías que superen los límites establecidos por las normas técnicas. El sistema de monitoreo debe ser capaz de integrarse con otros sistemas de control y supervisión, como los sistemas SCADA y de utilizar servicios en la nube para facilitar el acceso remoto y el almacenamiento de datos.

El instrumento virtual tuvo como objetivo diseñar un sistema para el monitoreo del desbalance de tensión y corriente entre las fases A, B y C en redes eléctricas trifásicas, utilizando una red de sensores de voltaje y corriente con registro de datos en la nube. El sistema se basa en el uso de una tarjeta de adquisición de datos, una aplicación desarrollada en el entorno de LabView y una plataforma de servicios en la nube.

El artículo presenta el estado de la técnica referente al desequilibrio de tensiones y normas que regulan el desbalance de voltaje y corriente. Se presenta el diseño y los componentes del sistema para el monitoreo del desbalance, el registro en la nube y las alertas predictivas.

Desarrollo

A. Caracterización histórica del desequilibrio de tensiones

El primer estudio sistemático y generalizado para el estudio de sistemas de tensión desequilibrados lo propuso, en 1918, Fortescue en su clásico artículo "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks" [2], el cual fue desarrollado precisamente cuando estudiaba la operación del motor de inducción, en estado estacionario, alimentado con tensiones desequilibradas.

En este artículo Fortescue propone descomponer el sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas de tensiones trifásicos, cada uno de ellos con componentes de igual magnitud: el sistema de secuencia cero, el sistema de secuencia 1 (secuencia positiva), y el sistema de secuencia 2 (secuencia negativa); el efecto total sobre el motor se encuentra sumando el efecto de cada sistema.

Asimismo, Fortescue muestra que el sistema de secuencia cero no produce campo resultante en el entrehierro, por lo que no debe considerarse en la conversión de potencia.

Es interesante precisar que en el "método de coordenadas simétricas" [2], los sistemas de secuencia positiva y negativa son, desde el punto de vista geométrico, sistemas simétricos pues presentan una simetría rotacional de 120 grados. Por lo tanto solo es necesario calcular una componente de cada sistema pues las otras componentes se obtienen desplazando la primera componente en 120 y 240 grados. Este hecho dio lugar a que posteriormente se usara el nombre de "método de componentes simétricas" y se popularice el término de "componentes simétricas" ó "componentes de secuencia" [3], [4]. Igualmente es importante mencionar que el método fue propuesto por Fortescue para el análisis de sistemas eléctricos en estado estacionario.

B. Definición de la norma IEC para el Desequilibrio de Tensiones

La International Electrotechnical Commission adopta el factor de desequilibrio de tensiones propuesto en el método de componentes simétricas, en su norma IEC 61000-4-27 [5], define el desequilibrio de tensiones mediante el índice VUF (Voltage Unbalance Factor) de la siguiente forma "la relación de la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva medida a la frecuencia del sistema (50 Hz o 60 Hz) tal como lo define el método de las componentes simétricas". La definición verdadera del factor de desbalance de tensiones corresponde a la relación entre los módulos de las componentes de secuencia inversa y directa de la tensión [6], [7], [8], [9], se muestra en (1):

$$VUF = \text{Voltage Unbalance Factor} = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (1)$$

Donde:

$|V_2|$ es el valor r.m.s. de la componente de secuencia negativa del voltaje aplicado.

$|V_1|$ es el valor r.m.s. de la componente de secuencia positiva del voltaje aplicado

Así, dado un conjunto de tensiones desequilibradas V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} , las tensiones de secuencia positiva y negativa viene dado por (2):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Con:

$$a = -0.5 + j0.866 \quad (3)$$

$$a^2 = -0.5 - j0.866 \quad (4)$$

C. Definición de la norma NEMA para el Desequilibrio de Tensiones

La National Electrical Manufacturer Association en su Norma MG1 [10], acepta el índice VUF del método de componentes simétricas. Sin embargo, entre los años 1969 y 1970 la sección de Motores y Generadores de NEMA propuso el índice Percent Voltage Unbalance PVU como un método alternativo al VUF para el cálculo del desequilibrio de tensiones. Este nuevo índice PVU no requiere el uso del álgebra vectorial para calcular las componentes de secuencia pues usa solo el valor r.m.s. de las tensiones línea-línea, y calcula la relación entre la máxima desviación respecto a la tensión de línea promedio entre la tensión de línea promedio. Así, sean V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} , los valores r.m.s. de las tensiones línea-línea del sistema trifásico de tensiones, el índice PVU se observa en (5).

$$PVU = \text{Percent Voltage Unbalance} = \frac{MDV}{VP} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

$$MDV = \max \{ |VP - V_{ab}|, |VP - V_{bc}|, |VP - V_{ca}| \} \quad (6)$$

$$VP = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (7)$$

Este nuevo índice PVU fue adoptado por NEMA desde la Norma NEMA MG1- 1972 y también aparece en su versión la MG1-2003 [10]. El uso del índice PVU está muy difundido en las prácticas industriales debido a que no requiere el uso del álgebra compleja como si lo necesita el cálculo del VUF que está basado en el método de componentes simétricas.

D. Definición de la norma IEEE para el Desequilibrio de Tensiones

En 1969 el IEEE Power System Engineering Committee, al discutir la IEEE Std. 141 [11], Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plant, propone una definición, adicionalmente al índice VUF, donde se usa solo la magnitud de las tensiones de fase del sistema que se muestra en (1).

$$PVUR = \text{Phase Voltage Unbalance Rate} = \frac{MDVF}{VFP} \times 100 \quad (8)$$

$$MDVF = \max \{ |V_a - VFP|, |V_b - VFP|, |V_c - VFP| \} \quad (9)$$

$$VFP = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (10)$$

Así, el índice PVUR (Phase Voltage Unbalance Rate) fue incluido en la norma IEEE Std. 141 [11] desde 1969 y tiene la característica de expresar el desequilibrio a partir de la medición de la magnitud de las tensiones fase-neutro. Por lo tanto, para calcular este índice no es necesario usar el método de las componentes simétricas. Si se desea aplicar este índice para la desclasificación del motor es necesario conocer las tensiones r.m.s. línea-neutro del motor. Como las tensiones línea-neutro del motor son difíciles de medir en la práctica industrial pues generalmente el neutro del motor no está disponible, es más práctico usar el índice PVU que solo requiere conocer las tensiones línea-línea aplicadas al motor [12].

E. Efectos del desequilibrio de tensiones en máquinas eléctricas.

Cuando el motor de inducción está alimentado por un sistema de tensiones trifásico desequilibrado, las corrientes del motor también serán desequilibradas y una tensión de secuencia negativa pequeña puede producir grandes corrientes en los bobinados que excedan considerablemente la corriente nominal del motor. Por lo tanto, para evitar que un calentamiento excesivo pueda afectar el tiempo de vida del motor es necesario reducir la potencia de operación del motor, este proceso se conoce como desclasificación de la potencia del motor debido al desequilibrio de tensiones [12].

En 1978 la National Electrical Manufacturers Association incluye en la NEMA Standard MG1 un método para calcular los factores de desclasificación. NEMA construye una curva basada en resultados experimentales, que indican que el porcentaje de incremento de la temperatura del motor debido al desequilibrio de tensiones es aproximadamente igual a dos veces el PVU elevado al cuadrado [13], la curva de desclasificación propuesta por NEMA da una relación entre el factor de desclasificación y el índice PVU, ver Fig. 1

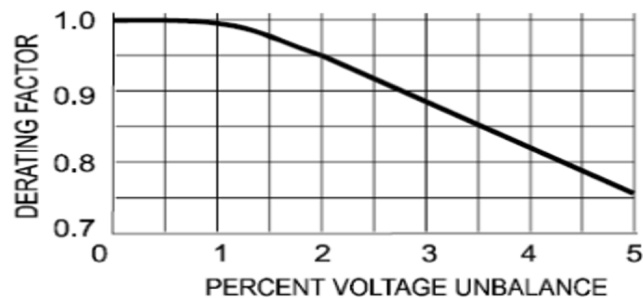


Fig. 1. Curva NEMA para la desclasificación de la potencia del motor de inducción de mediana potencia en condiciones de desequilibrio de tensiones [14].

Otro efecto del desbalance de tensiones se presenta en rectificadores con tecnología PWM se aumenta la distorsión de corriente armónica, incrementan los reactivos de la carga y se generan rizados de corriente en la etapa de continua. (c.c.) [15].

F. Normas que regulan el desbalance de voltaje y corriente.

La norma NTC 5001 es una norma técnica colombiana que establece las metodologías de evaluación y los valores de referencia de los parámetros asociados a la calidad de la potencia eléctrica en el punto de conexión común entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión, bajo condiciones normales de operación [15].

Los valores de referencia para el voltaje definidos en la norma NTC 5001 [15], se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I. Porcentaje máximo de desbalance de tensión.

Rango de Tensión	Valor de Referencia
$V_n < 69 \text{ kV}$	2,0 %
$V_n \geq 69 \text{ kV}$	1,5 %

La norma mexicana CFE L000-45 [16], define los valores de referencia para el desbalance de voltaje y corriente que se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla II. Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida.

Tensión (kV)	Desequilibrio (%)
Menor de 1	3
Mayor o igual de 1	2

Tabla III. Desbalance máximo permitido en la corriente en el punto de acometida.

Impedancia relativa (I_{cc} / I_L)	Desbalance (%)		
	Menor a 1 kV	De 1 kV a 35 kV	Mayor a 35 kV
< 20	5	2.5	2.5
$20 \leq (I_{cc} / I_L) < 50$	8	4	3
$50 \leq (I_{cc} / I_L) < 100$	12	6	3.75
$100 \leq (I_{cc} / I_L) \leq 1000$	15	7.5	4
> 1000	20	10	5

Según el estándar IEEE 1159. El desbalance de voltaje en un sistema trifásico se define como la relación de la magnitud del componente de secuencia negativa respecto a la magnitud del componente de secuencia positiva, expresado en porcentaje. Típicamente, el desbalance de voltaje de un servicio trifásico es menor al 3%. El desbalance de corriente puede ser considerablemente mayor, especialmente cuando hay cargas monofásicas presentes. Matemáticamente, el desbalance de voltaje está representado por la ecuación (1) [17].

METODOLOGÍA

El proyecto se ejecutó utilizando el diseño experimental; se analizaron diferentes conceptos y normas para el desequilibrio de tensiones y para la implementación del instrumento virtual se utilizó la norma CFE L000-45. La metodología incluyó:

A. Diagnóstico

Se realizaron mediciones en una estación de prueba en los laboratorios de ITCA-FEPADE Centro Regional Santa Ana, utilizando instrumentos físicos para poder tener un marco de referencia de las variables eléctricas involucradas en el sistema a diseñar.

B. Diseño del sistema para el monitoreo del desbalance.

Se diseñó el instrumento tomando en cuenta el acondicionamiento de señales analógicas y digitales, creación de la interfaz de usuario (HMI) y programación de los algoritmos para el cálculo del desbalance, visualización y almacenamiento de datos mediante el entorno de desarrollo LabView. Se realizó la calibración del sistema ejecutando experimentos con hardware de National Instruments (NI), sensores de corriente y voltaje genéricos en los laboratorios de ITCA.

El sistema se basó en dos etapas principales: la etapa de adquisición de datos y la etapa de procesamiento de datos. La etapa de adquisición de datos requiere de la atenuación y acondicionamiento de señales; para ello se utilizaron sensores de voltaje y corriente y una tarjeta de adquisición de datos NI 6009. Los datos adquiridos se transfieren a la etapa de procesamiento conformada por una aplicación desarrollada con LabVIEW, en la que se integran módulos de visualización, módulos de almacenamiento, generación de informes y módulos de comunicación para compartir datos con otros dispositivos como PLC y poder integrarse en un sistema más amplio como un ESCADA, la arquitectura del sistema se muestra en la Fig. 2.

En la etapa de sensores para medir la corriente se utilizó el sensor de la serie SCT-013 que trabajan como transformadores, la corriente que circula por el cable que deseamos medir actúa como el devanado primario (1 espira) e internamente tiene un devanado secundario que dependiendo del modelo pueden tener hasta más de 2000 espiras [18].

La cantidad de espiras representa la relación entre la corriente que circula por el cable y la que el sensor nos entrega, esta relación o proporción es la que diferencia entre los diferentes modelos de sensores SCT-013, adicionalmente pueden tener una resistencia de carga en la salida de esta forma en lugar de corriente se trabaja con una salida de voltaje [18].

Para medir el voltaje se utilizó un transformador reductor en cuyo devanado secundario proporciona una salida de 12Vrms, garantizando que el voltaje pico no sobrepase los 20V.

En la etapa de adquisición de datos se utilizó la tarjeta NI USB 6009, que se muestra en la Fig. 3, es un dispositivo DAQ multifunción de bajo costo. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6009 brinda funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. El dispositivo tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para fácil portabilidad. Puede conectar fácilmente sensores y señales al USB-6009 con conectividad de terminal de tornillo. El controlador NI-DAQmx y la utilidad de configuración que están incluidos simplifican la configuración y las medidas [19], [20].

La etapa de procesamiento de datos está conformada por una aplicación desarrollada en ambiente LabVIEW. La interfaz de usuario diseñada muestra las variables eléctricas en formato lineal (honda senoidal) y polar (representación fasorial), el porcentaje de desbalance de voltaje y corriente con letras resaltadas para que el usuario pueda monitorear cómodamente la variable de interés para el proyecto, como se observa en Fig. 4. Para complementar la información de interés se han incorporado tablas en donde se registran los valores máximos y mínimos de voltaje y corriente. También se incorpora el registro de eventos de alarma cuando el desbalance esta fuera de los estándares permitidos (Fig.6), para alertar al operador o usuario se incorpora un elemento visual que indica con texto y cambio de color al activarse una alarma por desbalance fuera de rango, al presionar el botón "SALIR", se genera automáticamente un reporte con las alarmas registradas durante la sesión en formato Excel, para que el operador o usuario las almacene de forma permanente.

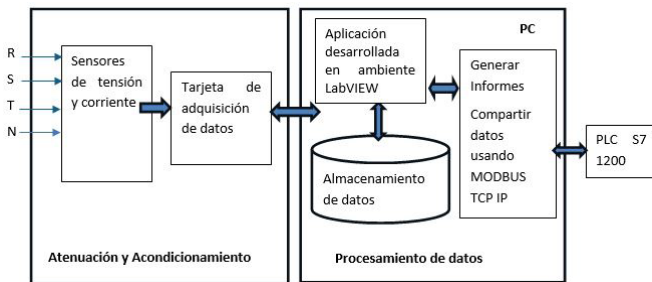


Fig. 2. Arquitectura del sistema de monitoreo.

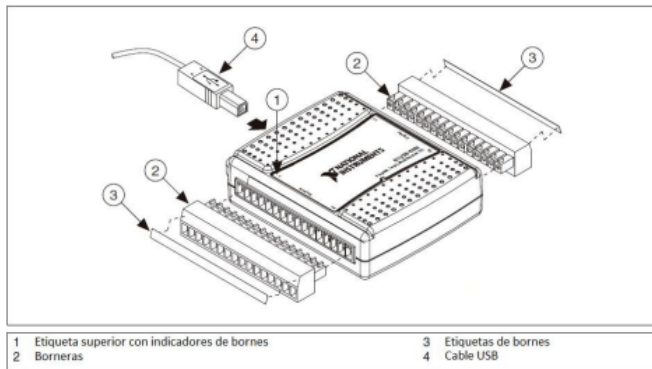


Fig. 3. Tarjeta NI DAQ-6009 [20]

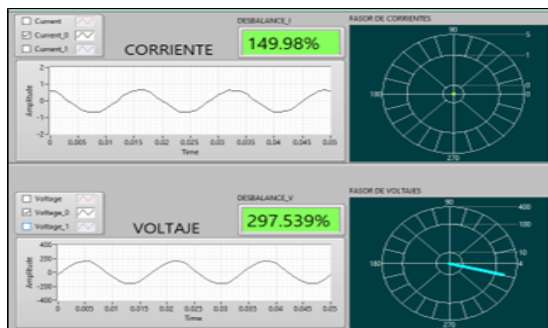


Fig. 4. Monitor de desbalance.

Resultados

A. Diseño de la aplicación.

El resultado del diseño es una aplicación que funciona como un instrumento virtual para el monitoreo y el análisis del desbalance del voltaje y la corriente en un sistema trifásico, como se observa en la Fig. 5 y Fig. 6. La aplicación cuenta con un módulo de comunicaciones usando el protocolo de comunicación industrial MODBUS TCP IP, para compartir datos con otras aplicaciones y otras tecnologías que se integran en una red industrial que conforman un modelo basado en el concepto de Industria 4.0, es decir que los datos pueden ser compartidos usando una nube, pueden enviarse a un autómata programable para integrarse a un proceso, se pueden proyectar los datos en una HMI remota que se encuentra en un área diferente al punto de medición, entre otras aplicaciones. En este proyecto se implementó el módulo de comunicaciones para compartir datos con un PLC S7 1200 que está enlazado con un VPN IXON, que permite utilizar una nube segura para conexión remota y compartir datos en la nube. El acceso al módulo se efectúa mediante un botón llamado "EXPORTAR", que se localiza en la pantalla principal.

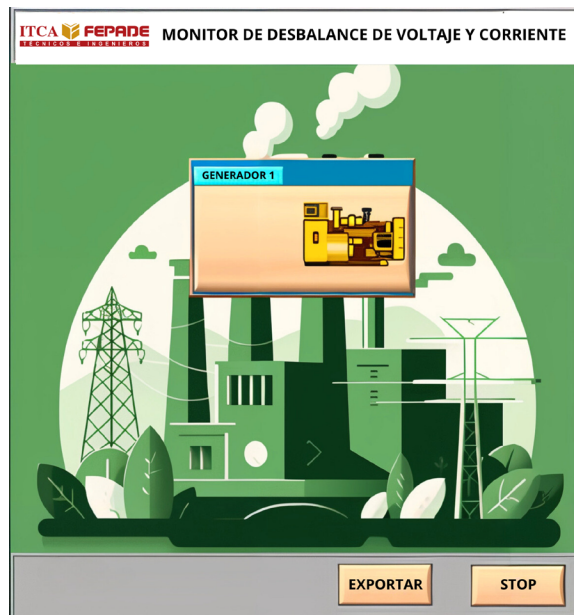


Fig. 5. Pantalla principal de la aplicación.

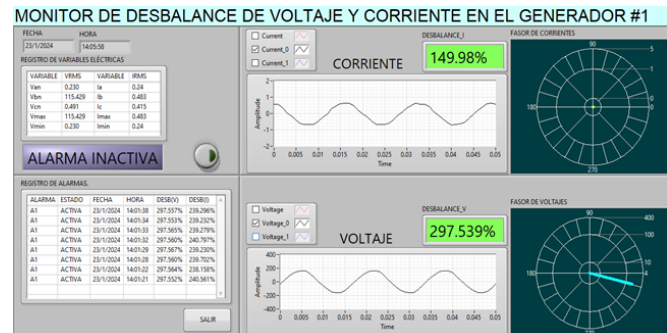


Fig. 6. Vista general del monitor de desbalance.

B. Resultados experimentales.

Para evaluar el desempeño del sistema diseñado y monitorear el desbalance de voltaje y corriente en una red trifásica, se conectaron 2 motores trifásicos de jaula de ardilla con el propósito de determinar la relación entre el desbalance de voltaje y corriente obteniendo los siguientes resultados.

Tabla IV. Lecturas de desbalance de voltaje y corriente.

#	Desbalance V	Desbalance I
1	1.58%	5.28%
2	1.68%	5.37%
3	1.70%	5.40%
4	1.70%	5.36%
5	1.66%	5.61%
6	1.69%	5.60%
7	1.70%	5.57%
8	1.71%	5.64%
9	1.78%	6.40%
10	3.28%	9.27%

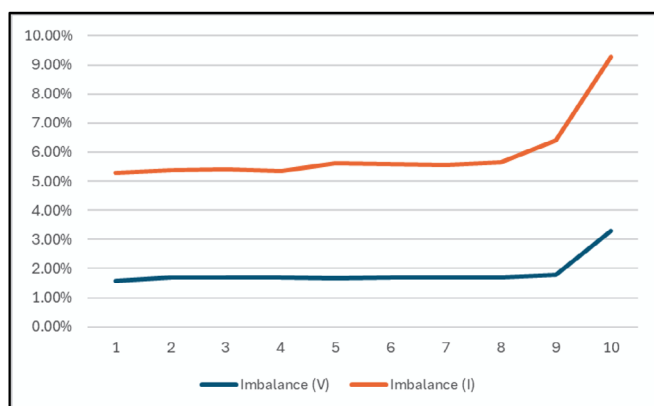


Fig.7. Relación del desbalance entre voltaje y corriente.

Conclusiones

1. Se demostró que, al aumentar el desbalance de voltaje entre las fases, también se incrementa el desbalance de corriente. Esto sugiere una fuerte correlación entre ambas variables eléctricas.
2. La investigación subraya la importancia de contar con sistemas de monitoreo periódico de las principales variables eléctricas para tomar medidas correctivas y garantizar una generación y distribución de energía eléctrica eficiente y confiable.
3. Para el desbalance de voltaje y corriente, se deben tomar en cuenta los estándares internacionales o nacionales que definen los valores máximos permitidos para mantener la calidad de la energía en la red eléctrica.

4. El diseño del instrumento virtual para medir el desbalance en generadores trifásicos utilizó la norma internacional CFE L000-45.
5. El instrumento permite detectar y alertar sobre las anomalías por desbalance en la red eléctrica, así como almacenar y analizar los datos para identificar las posibles causas y tomar medidas preventivas y correctivas.
6. El sistema contribuye a mejorar la calidad del servicio de generación, reducir las pérdidas de potencia, evitar el sobrecalentamiento, el daño de los equipos y optimizar el mantenimiento de las máquinas eléctricas.

Referencias

- [1] Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, UNE-EN 50160:2011/A2, Mar. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/6z1afa>
- [2] C.L. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Poliphase Networks", AIEE Transaction, Vol. 37, Part II, pp. 1027- 1140, 7 abr. 2009. doi: 10.1109/T-AIEE.1918.4765570 [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4765570/authors#authors>
- [3] C. F . Wagner, R.D. Evans, Symmetrical Components. As Applied to the Analysis of Unbalanced Electrical Circuits, New York, E.E.U.U. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1933, [En línea]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/132876b0#citeas>
- [4] W. B. Lyon, Application of the Method of Symmetrical Components, New York, E.E.U.U. Mc Graw Hill Book Company AIEE, Inc., 1937. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/dli.ernet.476038/page/n4/mode/1up>
- [5] Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-27: Testing and Measurement Techniques – Unbalance, Immunity Test, 61000-4-27:2000, 2000, [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/en/publication/4199>
- [6] A. Robert and J. Marquet. "Assessing Voltage Quality with relation to Harmonics, Flicker and Unbalance". CIGRE WG 36.05, Paper 36-203. 1992
- [7] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Std 141-1993, 1993. doi: 10.1109/IEEESTD.1994.121642
- [8] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std 1159-2019. 1995. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486

[9] Electromagnetic compatibility. Testing and measurement techniques. Power Quality Measurement Methods. IEC 61000-4-30:2015, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/en/publication/21844>

[10] Standard Publication ANSI/NEMA MG1-2003, revisión1-2004, National Electrical Manufacturers Association Nema, 2003. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/cWbJvh>

[11] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plan, IEEE Std 141-1993, 1994. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/398556>

[12] E. C. Quispe Oqueña, "Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico. Énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal," Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/6IH67G>

[13] P. Pillay, P. Hofmann and M. Manyage, "Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.17, No.4, pp.485-491. Dic. 2002. doi: 10.1109/TEC.2002.805228. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1159199>

[14] Motors and Generators, ANSI/NEMA MG1-2001, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.nema.org/standards/view/motors-and-generators>

[15] ICONTEC. Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común, Norma, NTC 5001-2008, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/3nt9x3>

[16] Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica, Especificación CFE L0000-45, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/FbxHqf>

[17] Práctica recomendada de IEEE para monitorear la calidad de la energía eléctrica, Std 1159-2019, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8796486/definitions#definitions>

[18] Naylamp Mechatronics, "Tutorial: Sensor de corriente AC no invasivo SCT-013". Naylamp Mechatronics. Accedido: 24 de julio 2024 [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/qHvR1s>

[19] National Instruments Corp, "Adquisición de datos (DAQ)". NI. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/67rFPj>

[20] National Instruments Corp, "Dispositivo E/E multifunción USB-6009". NI. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/PBh0xh>