

Armario para la formación en automatización y control de subestaciones eléctricas de tracción

M. Balboa, S. Alonso, J.J. Fuertes, A. Morán, M.A. Prada, D. Pérez, M. Domínguez

Grupo de investigación SUPPRESS, <https://suppress.unileon.es>,
Escuela de Ingenierías, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24007, León, España.
{mbalf, saloc, jj.fuertes, a.moran, ma.prada, dperl, manuel.dominguez}@unileon.es

Resumen

En este trabajo, se propone el diseño de un armario para la formación en automatización y control de subestaciones eléctricas de tracción mediante el estándar IEC 61850. Este armario incorpora diversos dispositivos electrónicos inteligentes, comunicados mediante protocolos como MMS y GOOSE, con el propósito de supervisar y controlar de forma local y remota las maniobras, así como el estado de las líneas de entrada y salida de la subestación. Los equipos son configurados para comunicarse en una red redundante, demostrando ser capaces de realizar las distintas maniobras en la subestación y asegurando en todo momento la alimentación a la catenaria, si se produce un fallo en cualquiera de las líneas. Además, se proponen un conjunto de tareas prácticas para la formación en el ámbito de la automatización y control de subestaciones de tracción, que los alumnos pueden realizar con el armario propuesto.

Palabras clave: automatización, subestación eléctrica de tracción, dispositivos electrónicos inteligentes, IEC61850.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de digitalización en las subestaciones eléctricas ha supuesto una reducción notable del número de equipos o componentes, sustituyendo dispositivos electromecánicos por dispositivos electrónicos inteligentes (IEDs) que se comunican entre sí [1]. Estos dispositivos permiten la medición y protección del sistema eléctrico, así como el control y la supervisión a través de protocolos como IEC 61850, IEC 60870 ó DNP 3 [2]. La interoperabilidad de estos protocolos, junto con el despliegue de redes de alta velocidad, ha permitido lograr una reducción del espacio físico de las instalaciones y conseguir un suministro eléctrico fiable y un mantenimiento eficaz.

Las universidades y centros de formación profesional deben adaptarse a los cambios requeridos por este proceso de digitalización, proporcionando herramientas adecuadas para la adquisición de habilidades y destrezas en el ámbito de la automa-

tización y control de subestaciones eléctricas. La formación en nuevas tecnologías requiere la realización de prácticas y experiencias atractivas con sistemas físicos para asentar y afianzar el conocimiento adquirido, siendo este uno de los grandes retos para lograr una educación universitaria eficaz en disciplinas de ingeniería [3].

En este trabajo, se propone el diseño de un armario para la formación en automatización y control de una subestación eléctrica de tracción bifásica con dos líneas de entrada mediante la norma IEC 61850. Esta subestación se encuentra modelizada en un armario eléctrico en baja tensión, en vez de trabajar con líneas de alta tensión, por motivos de seguridad y viabilidad. Los dispositivos principales del armario son: dos relés de protección, un controlador de bahía, una pasarela de comunicaciones, un controlador de subestación y un ordenador industrial con el SCADA local. Con este armario, los alumnos de ingeniería pueden realizar, desde tareas básicas de configuración y programación de equipos, redes de comunicaciones, conversión de protocolos (e.g. de IEC 61850 a IEC 60870-5-104), etc., hasta tareas más avanzadas, como la implementación de funciones de transferencia automática (*Automatic Transfer Scheme* -ATS-).

La estructura de este documento es la siguiente: En el apartado 2 se hace una introducción de las subestaciones eléctricas de tracción y el estándar de comunicaciones IEC 61850. En el apartado 3 se explica la estructura del armario propuesto. En el apartado 4 se enumeran las actividades formativas que se pueden realizar con el mismo. Finalmente, las conclusiones y líneas futuras se describen en el apartado 5.

2. ESTACIONES DE TRACCIÓN

Las subestaciones eléctricas de tracción son aquellas subestaciones adecuadas para su uso en el ferrocarril, donde se transforman los niveles de tensión de la red trifásica en niveles de tensión que alimentarán la catenaria. Las distintas subestaciones se pueden clasificar en dos tipos según su alimentación: de corriente continua y de corriente alterna.

En este trabajo se describe un sistema eléctrico de tracción bifásico 2x25kV de corriente alterna, óptimo para el ferrocarril de alta velocidad. Este sistema es más eficiente debido al uso de tensiones de transmisión más altas (50kV) que se reducen mediante autotransformadores a una tensión inferior (25kV) para la alimentación de la locomotora, logrando una reducción de las caídas de tensión y las perturbaciones electromagnéticas [4]. Esta configuración eléctrica emplea dos conductores, uno es la catenaria con un potencial de 25kV y otro es el feeder de retorno de 25kV o feeder negativo que se encuentra desfasado 180° respecto a la catenaria [4]. El secundario del transformador de una subestación tiene una toma intermedia donde se conecta el carril, mientras que la catenaria y el feeder negativo se conectan al resto de tomas del secundario.

Para el correcto funcionamiento del sistema, es necesario el empleo de centros de autotransformación a lo largo del trazado cada cierta distancia (60-80 Km), con el objetivo de evitar el retorno de la corriente por el carril en los tramos por donde no circula el tren. En la figura 1 se puede observar un esquema del sistema bifásico comúnmente empleado para suministrar energía a la catenaria.

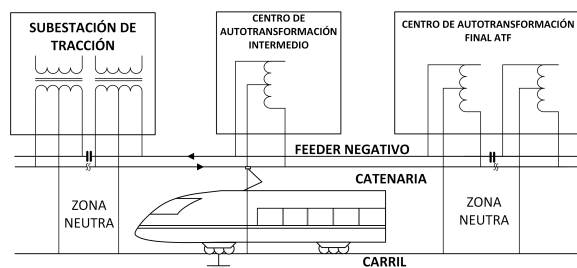


Figura 1: Sistema bifásico 2x25kV [4]

El estándar IEC 61850 [5] se está posicionando como una referencia en el ámbito de la automatización y control de sistemas eléctricos de potencia en estas subestaciones. Este estándar establece tres niveles de automatización: el nivel de proceso, el nivel de bahía y el nivel de estación. En el nivel de proceso se alojan equipos primarios como transformadores de potencia y medida, interruptores y equipos de medición y protección como los IEDs. En el nivel de bahía se encuentran los IEDs que controlan y supervisan todos los equipos de cada bahía. En el nivel superior, el nivel de estación, se ubican las estaciones de trabajo donde la información es supervisada y gestionada en centros de control [6].

El estándar IEC 61850 consiste en un modelo de datos que tiene como propósito modelar la infor-

mación de los equipos físicos de una subestación. Es un protocolo flexible, autodescriptible y que favorece la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes. El modelo de datos se estructura jerárquicamente en distintos niveles: dispositivo físico (PHD), dispositivo lógico (LD), nodo lógico (LN), objetos de datos (DO) y atributos de datos (DA). La concatenación de todos los nombres de estos niveles, formará una referencia de objeto, que estará asignada a un valor determinado. Los nodos lógicos representan las distintas funciones de los equipos físicos (funciones de control, medición, supervisión, protección etc.) [7].

El estándar IEC 61850 establece diferentes protocolos de comunicación para la transmisión de mensajes. Los mensajes con datos de medidas sin procesar, críticos en el tiempo, serán transmitidos como Sampled Values (SV). Los mensajes para el control y la protección, ya sean disparos u órdenes críticos en el tiempo, serán enviadas a través del protocolo GOOSE. Sin embargo, los mensajes no críticos, como órdenes de maniobra, medidas, estados o eventos que se desean enviar hacia un SCADA, son mapeados al protocolo MMS [8]. La sincronización de tiempo de los IEDs es imprescindible y se lleva a cabo por medio del protocolo SNTP.

3. ESTRUCTURA DEL ARMARIO

3.1. Estructura eléctrica

El armario propuesto modeliza una subestación de tracción bifásica con una configuración de interruptor y medio. Por motivos de seguridad, en lugar de una alimentación 2x25kV, se ha reducido la tensión a 2x230V. El armario dispone de cuatro transformadores monofásicos: dos para cada línea. Cada pareja de transformadores en la práctica equivalen a un transformador con una entrada primaria y un secundario con una toma intermedia. La entrada primaria se alimenta con dos fases a 400V de tensión compuesta, y la toma intermedia divide al secundario en dos secundarios de 230V (la catenaria con un potencial de 230V y el feeder negativo a 230V desfasado 180° respecto a la catenaria).

Existen dos posibles zonas de alimentación al tren: la zona 2-1 y la zona 2-2 (ver figura 2). Estas zonas pueden ser alimentadas por dos líneas: la línea D o la línea F. De esta manera, es posible alimentar la zona 2-1 con la línea F o la línea D, y alimentar la zona 2-2 con la línea D o la línea F.

Las maniobras de la subestación se realizan mediante cinco contactores. Por razones de viabilidad

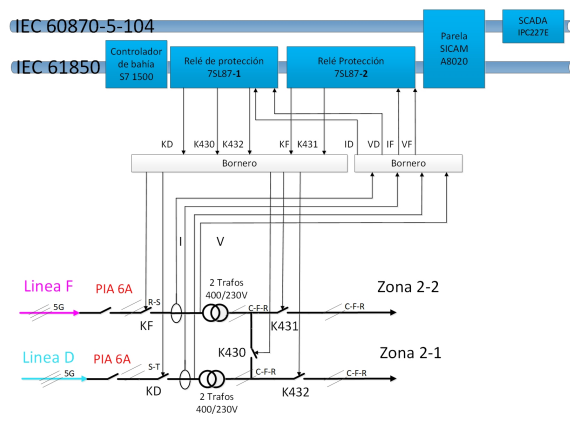


Figura 2: Esquema eléctrico

en este, se emplean contactores, en lugar de los interruptores biestables empleados en las subestaciones. El contactor KD conecta la alimentación línea D y el contactor KF conecta la línea F. El contactor K432 conecta la zona 2-1 y el contactor K431 conecta la zona 2-2. Por último, se utiliza el contactor K430 para conectar una zona con la otra línea de respaldo.

3.2. Arquitectura de control

El sistema de automatización y control esta formado básicamente por dos relés de protección, un controlador de bahía, una pasarela, switches de comunicación y un ordenador industrial. Estos equipos se encuentran conectados a dos redes de comunicación diferentes: una red de control y otra red de supervisión. En la figura 3 se muestra la arquitectura lógica de comunicaciones y conexión de dispositivos.

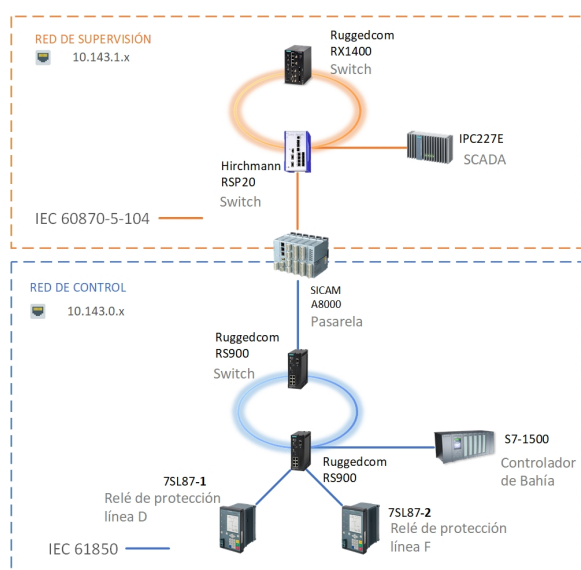


Figura 3: Arquitectura de comunicaciones

El relé de protección Siemens 7SL87, denominado 7SL87-1, mide la tensión y la corriente de la línea D, y la protege de sobrecorriente (ANSI 50/51), subtensión (ANSI 27) y sobretensión (ANSI 59). Este relé controla los contactores KD, K430 y K432, e implementa la función de transferencia automática, denominada *Automatic Transfer Scheme* para la transferencia de alimentación de una zona determinada con otra línea alternativa, la línea de respaldo. El contactor K430 se le designa como contactor de enlace *Auto Transfer Switch*, que es el responsable de intervenir cuando se ejecuta la transferencia [9]. El otro relé de protección Siemens 7SL87, denominado 7SL87-2 mide la tensión y la corriente de la línea F, y la protege de sobrecorriente (ANSI 50/51), subtensión (ANSI 27) y sobretensión (ANSI 59). También se encarga del controlar los contactores KF y K431.

El PLC S7-1500 incorpora la programación lógica de las maniobras que no son críticas en el tiempo. Recibe los estados de todos los contactores de la subestación y los comandos de las maniobras. Estos comandos son procesados y en función de la maniobra se envían órdenes de control de los contactores implicados. Para ello, funciona como cliente MMS IEC61850 que comunica con el servidor de IEC 61850 del SICAM A8000, y este a su vez comunica con los relés 7SL87.

El SICAM A8000 es una pasarela que permite adquirir datos de clientes IEC 61850 y realizar funciones como la conversión a otros protocolos, el control de los flujos de datos, el direccionamiento de datos, así como ofrecer un servidor propio de IEC 61850. En el armario, se encuentra conectado a las dos redes de comunicación disponibles: la red control y la red de supervisión. Su función es adquirir los estados de los contactores junto con medidas y otros datos de relevancia provenientes de los relés de protección, en formato IEC61850, convertirlos al protocolo IEC 60870-5-104 y redirigirlos hacia el SCADA local.

Para lograr una redundancia que asegure la comunicación en caso de un fallo en la red, se implementa un anillo redundante por cada red. El anillo redundante de la red de control, lo constituyen dos switches Hirschmann RS20, y el anillo redundante de la red de supervisión, se implementa con un switch Hirschmann RS20 y uno Siemens RX1400. Para la gestión de los enlaces de cada anillo se usa el protocolo RSTP.

El SCADA local SICAM SCC, se encuentra instalado en el ordenador industrial NANOBOX (IPC227E). Este SCADA recibe los datos por IEC 60870-5-104 desde la pasarela SICAM A8000, visualiza los estados de posición de la bahía, las medidas de tensión, corriente, potencia, alarmas, ten-

dencias y permite el control de cada uno de los contactores y las distintas maniobras de la subestación.

Finalmente, el armario dispone de una baliza instalada en la parte superior que se utiliza para indicar el estado de la autoridad de mando (Local/Remoto) y las alarmas. En la figura 4 se puede observar una foto del armario.

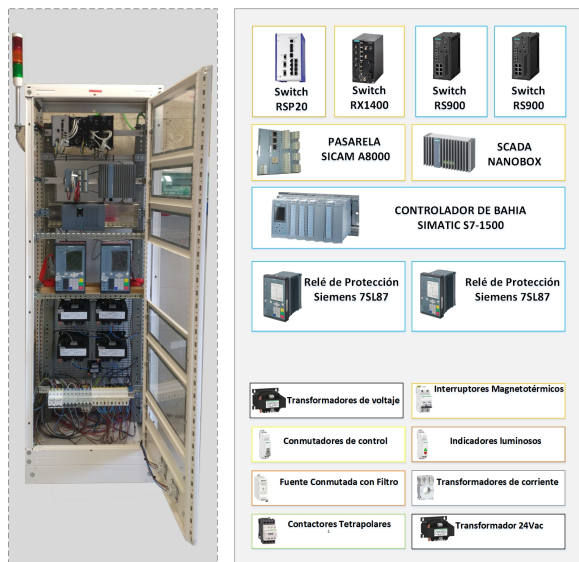


Figura 4: Foto del armario y componentes

4. FORMACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES

En esta apartado se enumeran las tareas prácticas que los alumnos de ingeniería pueden realizar con el armario de control propuesto:

- Configuración de relés de protección:** los relés Siprotec 7SL87 se configuran mediante el software Siemens DIGSI 5. En esta tarea, se definen los parámetros de red de las interfaces de comunicación y la dirección del servidor SNTP para la sincronización horaria. Se configuran los puntos de medida de tensión y corriente. Se asignan los estados de los contactores a las entradas binarias de los relés, y las salidas binarias, a cada bobina del contactor correspondiente. Se configuran las funciones de protección ANSI 27, ANSI 50/51 y ANSI 59. Se programa la lógica de enclavamiento en cada relé de los contactores que gobierna cada uno de ellos. Por último, se define la estructura IEC 61850 y se exporta su configuración a un fichero SCD (Substation Configuration Description).

- Programación de controlador de bahía:** en esta tarea se definen las direcciones y parámetros IEC 61850, en el bloque de comunicación de la librería cliente MMS, para la lectura de los estados y el control de los contactores a través del servidor SICAM A8000. Se programa la lógica de los enclavamientos y las maniobras de la subestación.

- Configuración de redes de comunicación:** en esta tarea se definen los parámetros de red. Se configuran los anillos redundantes mediante el protocolo RSTP en la red control y la red de supervisión. Se definen los roles y los costes de cada puerto, y se crea un servidor de sincronización horaria SNTP en cada red.

- Configuración de la conversión entre protocolos en la pasarela SICAM A8000:** la configuración del SICAM A8000 se realiza a través del software Sicam Device Manager. Se determinan los parámetros de red de cada puerto independiente para cada una de las dos redes, y la dirección del servidor NTP para la sincronización horaria. Se definen las conexiones de los clientes y servidores de los protocolos IEC 61850 y IEC 60870-5-104. Se importa un fichero SCD que contiene la configuración IEC 61850 de los relés Siprotec 7SL87 para la creación de puntos de acceso IEC 61850. Se crea un servidor IEC 61850 para la comunicación con el cliente MMS S7-1500, y se definen sus nodos lógicos. Se realiza una configuración lógica para el direccionamiento interno de los mensajes del servidor IEC 61850 a los puntos de acceso IEC 61850, y el control de la baliza. Se determina el control de flujo para las estaciones de comunicación IEC 61850 e IEC 60870. Se exportan las direcciones de las señales IEC 60870-5-104 a un fichero SXD, para su posterior importación en el SCADA.

- Configuración del SCADA local:** se importan las señales IEC 60870 mediante el fichero SXD y se definen las alarmas y eventos. Se diseña una interfaz gráfica con un esquema unifilar para la monitorización de la subestación y la ejecución de maniobras, y otros menús para la visualización de alarmas, eventos y tendencias. En la figura 5 se muestra la pantalla gráfica desarrollada en SICAM SCC para la supervisión local de la subestación.

- Programación de funciones avanzadas:** en esta tarea se implementa la función de transferencia automática (*Automatic Transfer Schem -ATS*). Ante la pérdida de cualquier línea principal de entrada, la lógica pro-

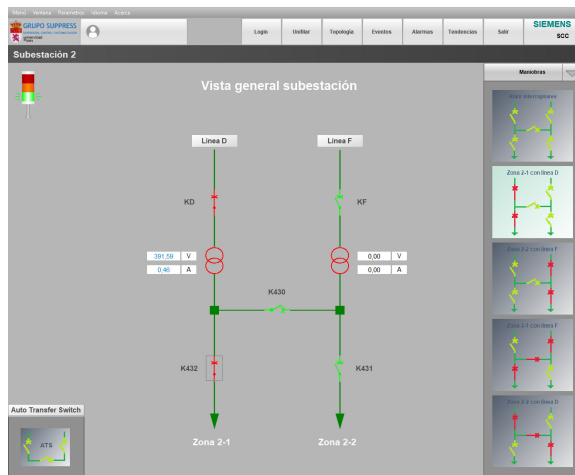


Figura 5: SCADA local

gramada debe transferir automáticamente la carga a la otra línea, abriendo el correspondiente contactor de la línea principal y cerrando el contactor de enlace (K430). Por tanto, existen dos lógicas de habilitación de ATS que se programan en el relé 7SL87-1:

- Habilidadación ATS línea D: tiene como finalidad habilitar la transferencia de la línea principal F a la línea de respaldo D.
- Habilidadación ATS línea F: tiene como finalidad la transferencia de la línea principal D a la línea de respaldo F.

4.1. Descripción de la programación de la función de transferencia automática

A continuación, a modo de ejemplo, se describe con detalle la programación de la función avanzada ATS en el relé 7SL87-1. Esta función requiere el uso de una comunicación GOOSE entre IEDs.

En la Figura 6, se representa la lógica de habilitación e inicialización de la función ATS correspondiente a la línea D. En el caso de la habilitación e inicialización de esta función avanzada correspondiente a la línea F, el procedimiento es similar.

La función ATS recibe mediante el protocolo GOOSE los siguientes mensajes: el estado del interruptor KF, el estado de salud del 7SL87-2, y los avisos de disparo de la línea F. Para habilitar la transferencia de la línea principal F a la línea de respaldo D, se recibe desde el SCADA local por MMS, una orden de habilitación, “Orden de habilitación ATS”, la cual habilitará el ATS de la línea D, con la condición de que la línea F se encuentre activada (contactor KF cerrado) y los estados de salud de los dos relés de protección (el 7SL87-1 y el 7SL87-2) sean correctos (estén en OK). La

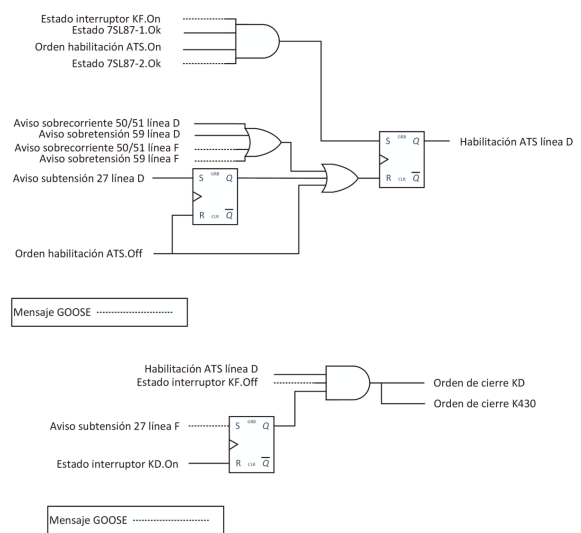


Figura 6: Habilidadación e inicialización de la función ATS correspondiente a la línea D

señal de salida indica si la habilitación ATS de la línea D se ha activado. La habilitación ATS de la línea D se bloqueará si se detecta un previo aviso de disparo de sobrecorriente, sobretensión en las líneas, o un disparo de subestación en la línea D.

La función de inicialización ATS de la línea D, se encarga de ejecutar las órdenes de cierre de los contactores KD y K430, cuando cumplen las siguientes condiciones: la orden “Habilidadación ATS línea D” se encuentra activa, se produzca un disparo por subestación en la línea F y que el contactor KD esté abierto.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En este trabajo se ha implementado un sistema de automatización y control con fines de formación para subestaciones de tracción eléctrica. Este sistema se basa en el estándar IEC 61850. Se ha configurado una red de anillo redundante para la comunicación de los dispositivos mediante protocolos como GOOSE, ideales para transmitir mensajes críticos en el tiempo como los disparos y eventos prioritarios, o protocolos como MMS, ideales para transmitir mensajes no críticos como ordenes de control, medidas, alarmas destinados al controlador de subestación. Además, el estándar IEC 60870-5-104 permite comunicar con el sistema SCADA.

El sistema de automatización y control propuesto permite a los alumnos desarrollar un conjunto de tareas básicas en este ámbito tales como: programación de relés de protección, programación de la lógica necesaria en los controladores de bahía, con-

figuración de redes de comunicación, conversión de protocolos, configuración de sistemas SCADA, etc.

Utilizando este sistema de automatización y control, los alumnos también pueden realizar la programación y prueba de funciones avanzadas tales como la función de transferencia automática (ATS) que permite gestionar las líneas de entrada, detectar de forma rápida fallos en la línea o trazo y conmutar las líneas de salida para asegurar en todo momento la disponibilidad de suministro de energía al tren. Además, se pueden probar funciones de redundancia para evitar retrasos y garantizar la seguridad y la operación de la subestación eléctrica.

Este trabajo está abierto a nuevas líneas de trabajo como la formación en la gestión de redes eléctricas inteligentes desde un SCADA global que representaría un centro de control, así como el análisis de los eventos, oscilografías y datos históricos que generan este tipo de sistemas de automatización y control. Otra línea de trabajo podría profundizar en la formación en ciberseguridad y reconfiguración de dispositivos y redes ante ataques para garantizar el suministro eléctrico.

Agradecimientos

Esta publicación es parte de proyecto PID2020-117890RB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y el proyecto UNLE15-EE-2943 financiado por MINECO.

English summary

Cabinet for training in automation and control of electrical traction substations

Abstract *In this work, we propose the design of a cabinet for training in automation and control of electrical traction substations through the IEC 61850 standard. This cabinet incorporates several intelligent electronic devices (IEDs), which communicate through MMS and GOOSE protocols, with the purpose of monitoring and control locally and remotely the electrical operations and commands, as well as the status of the input and output lines and switchgear. The devices are configured to communicate in a redundant network, so that they are able to perform different operations in the substation, guaranteeing the power supply to the train, although there is*

a failure in one of the lines. In addition, a set of practical tasks are proposed for training in automation and control of electrical traction substations, which students can carry out with the proposed cabinet.

Keywords: automation, electrical substations, IEDs, IEC 61850.

Referencias

- [1] I. Draganova-Zlateva and D. N. Geotgiev, "Digital substations," in *2021 13th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, 2021, pp. 1–6.
- [2] M. A. Aftab, S. S. Hussain, I. Ali, and T. S. Ustun, "Iec 61850 based substation automation system: A survey," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 120, p. 106008, 2020.
- [3] D. Muñoz de la Peña, M. Domínguez, F. Gomez-Estern, O. Reinoso, F. Torres, and S. Dormido, "Estado del arte de la educación en automática," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 19, no. 2, p. 117–131, mar. 2022.
- [4] D. G. Berzosa and G. V. Rivero, "Electrificación ferroviaria de alta velocidad en españa," *Técnica Industrial*, vol. 305, pp. 66–72, 2014.
- [5] X. Cheng, W.-J. Lee, and X. Pan, "Modernizing substation automation systems: Adopting iec standard 61850 for modeling and communication," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 42–49, 2017.
- [6] P. Code, "Communication networks and systems in substations—part 5: Communication requirements for functions and device models," 2003.
- [7] IEC, "Communication networks and systems in substations—part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment—principles and models. iec standard iec 61850-7-1, geneva, switzerland," 2003Standard 61850-7-4, IEC, Tech. Rep., 2001.
- [8] P. Code and C. Prix, "Communication networks and systems for power utility automation—part 8-1: Specific communication service mapping (scsm)—mappings to mms (iso 9506-1 and iso 9506-2) and to iso/iec 8802-3 réseaux et systèmes de communication pour

l'automatisation des systèmes électriques,” *International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland*, 2011.

- [9] F. Peng, S. Mohajeryami, O. Ziaee, and B. Falahati, “Implementing automatic transfer scheme in a main-tie-main configuration using iec 61850,” in *2017 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2017, pp. 1–5.



© 2022 by the authors.
Submitted for possible
open access publication
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).