



Experiencia 6 –Regulación de tensión Guía teórica y antecedentes específicos (Joshua Carvacho, Rodrigo Palma, Jaime Muñoz)

A. PREFACIO

Este documento tiene por objetivo ilustrar y guiar al usuario del prototipo compensador estático de reactivos SVC del laboratorio de Energías y Accionamientos del 4º piso del edificio de Electrotecnologías del DIE. Asimismo, este manual sirve como complemento al documento del proyecto, la memoria de título del Sr. Jaime Muñoz [1].

En dicha memoria, se plasma todo el desarrollo formal de la construcción del SVC, y se presenta un breve manual de operación, que señala como se debe energizar el equipo, además de algunas medidas de seguridad. También se entrega un esquemático del circuito TRUE RMS que se utiliza en el SVC. Uno de los objetivos de este manual es ahondar la información entregada por la memoria en estos temas.

Este manual está dirigido a todos(as) aquellos(as) alumnos(as) y personas que en el futuro deseen emprender trabajos en el SVC, ya sea como trabajo dirigido, memorias, tesis, experiencias de laboratorios, etc., y que nunca antes hayan operado este tipo de dispositivo. De esta manera, se ahorra tiempo de aprendizaje que puede ser aprovechado para realizar avances más significativos.

Este manual utiliza un lenguaje directo para describir las situaciones relevantes a enfrentar en la experiencia de laboratorio del curso. Se supone un conocimiento previo en sistemas eléctricos de potencia, de manera que se habla con naturalidad de sistema, red, reactivos, compensación, barra, S/E, reactores (inductancias), capacitores (condensadores), transformadores (de medida y de bajada), controladores, circuitos, pastillas, tiristores, SCR y de cuanto componente eléctrico sea necesario, sin cuestionar si el lector conoce o no estos temas.

B. INTRODUCCIÓN AL SVC

El CER o SVC (Compensador Estático de Reactivos o del idioma inglés Static Var Compensator) es un dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission System) que sirve para realizar control continuo de reactivos sobre la red.

La compensación de reactivos es fundamental en la regulación de tensión en los sistemas de potencia y usualmente (en las plantas, S/E, etc.) se realiza conectado y desconectando bancos de condensadores y reactores al sistema. Aunque la conexión y desconexión de dichos bancos se



hace de manera automática (o por lo menos remota), la reactancia que se conecta o desconecta al sistema toma valores discretos, por lo que la compensación que se obtiene no es fina.

La idea del SVC, es conectar y desconectar automáticamente bancos de condensadores, pero no conectar y desconectar reactores. En lugar de esto, se modifica adecuadamente la corriente que pasa por reactores fijos, siempre conectados al sistema. Con esto se logra que la reactancia que se conecta a la red para la regulación de voltaje tome valores continuos, permitiendo una compensación fina de reactivos.

¿Cómo se modifica la corriente que pasa por los reactores? Con un arreglo de tiristores y sendos circuitos de medida y comparación. En cada instante, el voltaje de la red de alimentación es medido con un transformador de medida. Esta muestra de voltaje ingresa a un circuito de control donde se combina con otras medidas y variables de tal manera de calcular el ángulo necesario con que se deben disparar los tiristores, para que la corriente que conducen (y la corriente en la inductancia) tome el valor apropiado para que la reactancia de compensación, vista desde los terminales de alimentación, tenga el valor adecuado para que el voltaje en la barra corresponda a la consigna de tensión en ese momento.

Una descripción teórica de las familias de equipos FACTS y de la operación de un SVC se encuentra en las referencias [2], [3] y [4]. Asimismo, en la referencia [5] se puede encontrar un mayor detalle de la operación de dispositivos de electrónica de potencia. Para la preparación del laboratorio es indispensable conocer en detalle lo tratado en las referencias [2], [3] y [4], que se consideran parte integral de la guía teórica desarrollada por el cuerpo docente.

C. CONOCIENDO EL SVC

El prototipo SVC del laboratorio es parte de todo un sistema maqueta. Además del SVC mismo, se dispone de una línea de transmisión (no la que está tras el acrílico, sino una implementada en un carrito similar al del SVC) y de una pequeña subestación de transformación. Estos tres elementos (línea, S/E y SVC) interactúan juntos todo el tiempo. Además están disponibles una serie de cargas de todo tipo (resistivas, inductivas y capacitivas) que se pueden añadir al sistema para experimentación.

En esta sección se presentan diagramas esquemáticos, diagramas explicativos, y fotografías de las distintas partes que conforman el prototipo SVC. Todo esto para que el lector pueda generar una imagen familiar y entienda como es que es posible la compensación de reactivos.

Sistema General

Primero que todo, se hace una pasada general sobre el sistema completo. La Figura C.1 muestra una vista del sistema completo. Como se puede distinguir en la figura, se ha señalado a

qué corresponde cada elemento. En esta figura se señalan las 3 grandes partes que componen el prototipo SVC del laboratorio: la línea de transmisión, la subestación y el SVC mismo. También se muestra la red de alimentación.

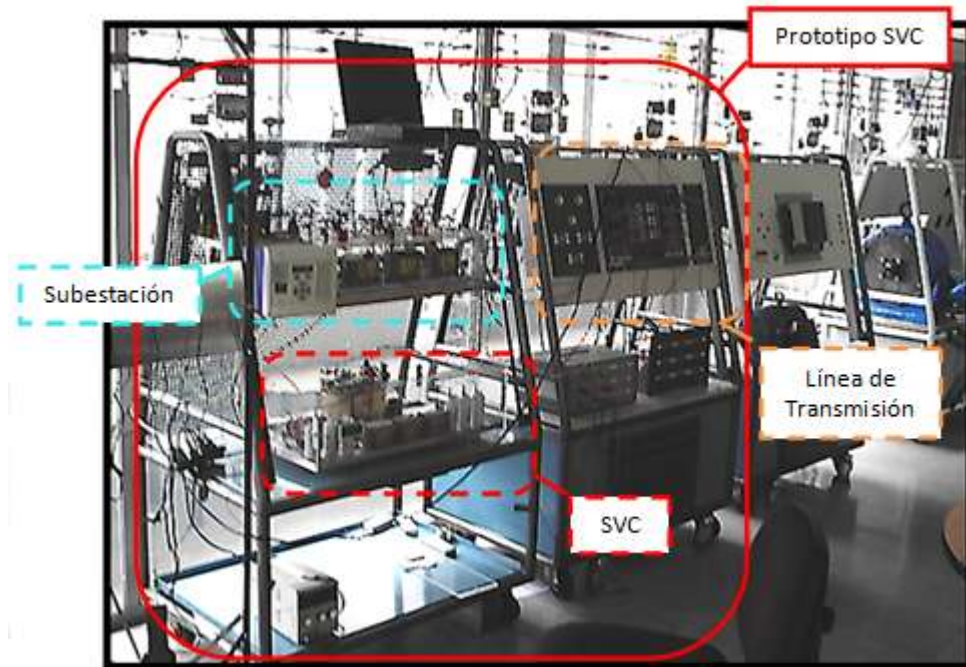


Figura C.1: Visión general del prototipo SVC.

En la Figura C.2 se presenta un diagrama unilineal del sistema de compensación de reactivos presentado por el prototipo.

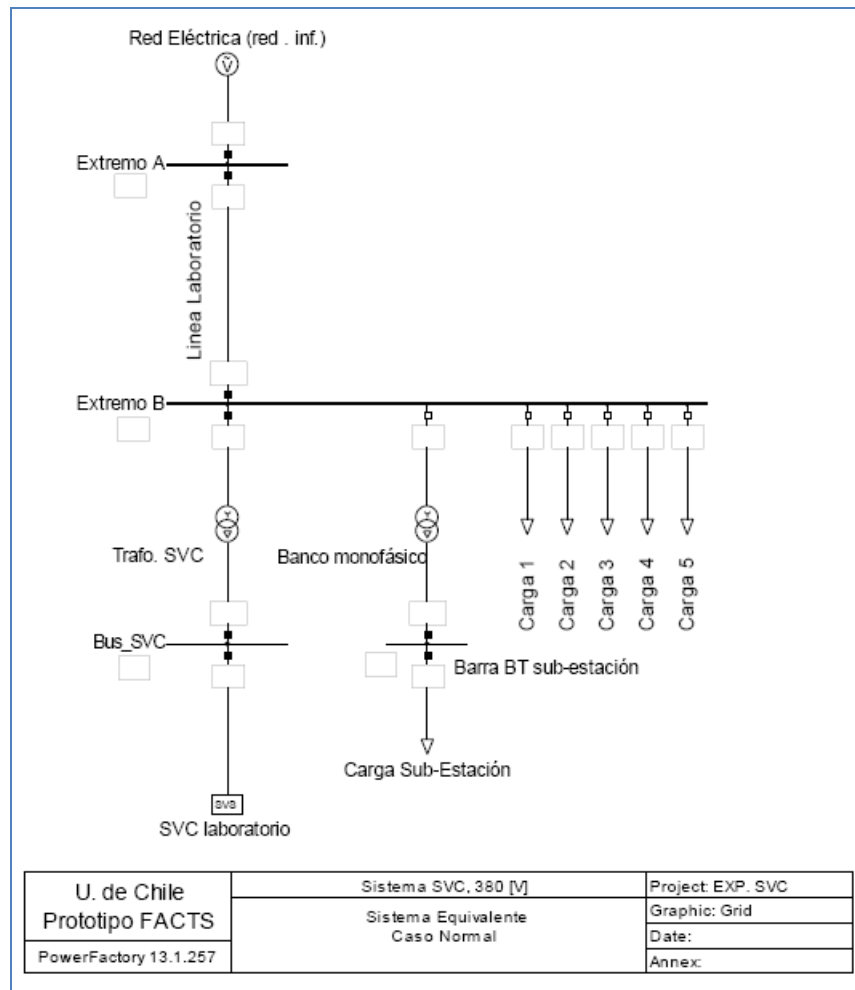


Figura C.2: Diagrama unilineal prototipo SVC.

A modo de explicación, la línea sirve para transmitir potencia desde la red de alimentación (lo que en adelante será llamado barra de alimentación) a los consumos (lo que en adelante será llamado barra de consumos). En la barra de consumos se encuentran conectados el SVC, la subestación y posibles cargas. Como se puede apreciar (si usted no se ha dado cuenta todavía), la idea es que el SVC mantenga una consigna de tensión en la barra de consumo, a pesar de los demás consumos que se conecten a la barra. Este prototipo en particular es un sistema de pruebas de laboratorio para simular eventos reales, es una maqueta de lo que se podría tener en la realidad, de manera que las configuraciones de conexión en general deberán ser completamente factibles.

SVC

La Figura C.3 muestra una visión general del SVC.

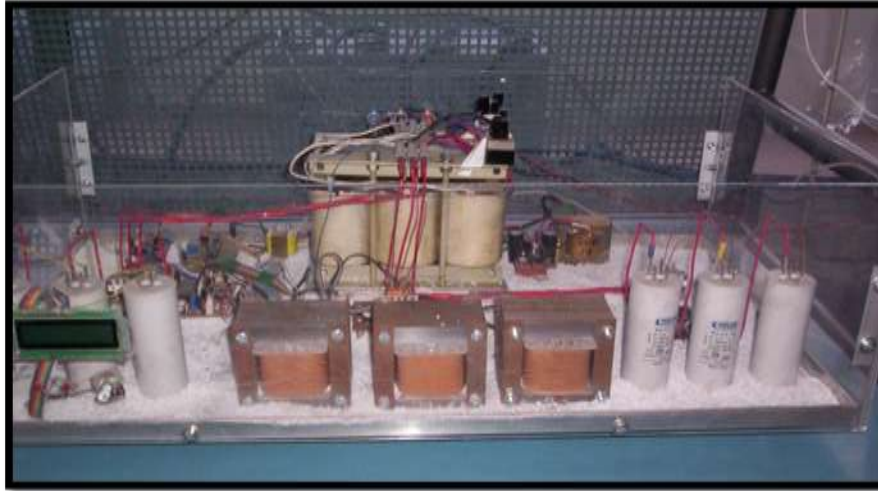


Figura C.3: Vista general del SVC.

Ahora que se conoce cuál de todos los artefactos del laboratorio es prototipo SVC, se procede a estudiar cada una de sus partes en detalle. La Figura C.4 presenta un diagrama de bloques del SVC.

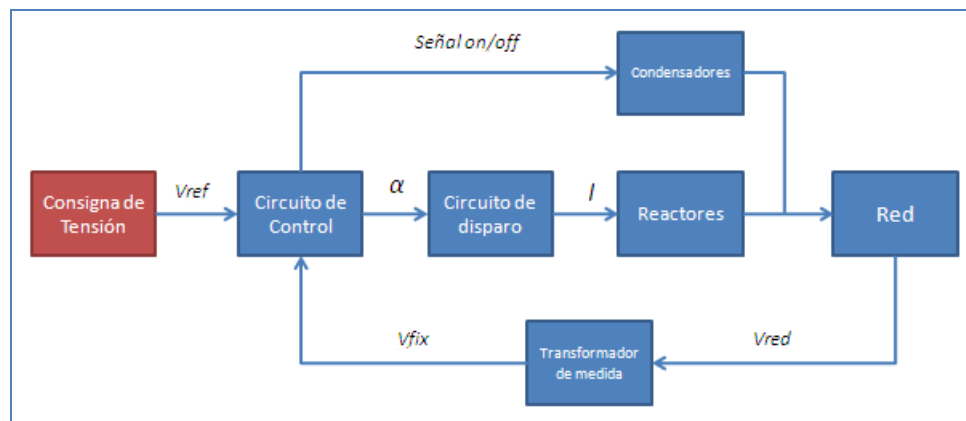


Figura C.4: Diagrama de bloques simple funcionamiento SVC.

Como se puede ver en la Figura C.4, se muestrea y se modifica el voltaje de la red en cada instante, por lo que se puede decir que el SVC efectúa control de reactivos *on-line*, y teóricamente, desde el punto de vista de teoría de control responde al denominado “problema de regulación”, que significa ajustar la salida de acuerdo al error entre la salida y una referencia fija (a pesar de que esta referencia se pueda cambiar para períodos largos de tiempo).

Circuitos de Funcionamiento

En la Figura C.5 se muestra un diagrama funcional del SVC.

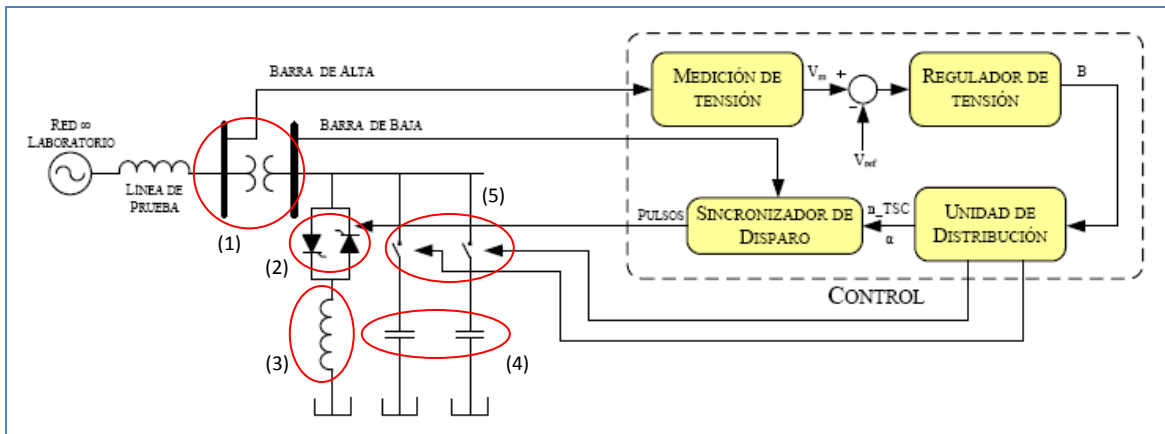


Figura C.5: Diagrama funcional SVC.

En este diagrama queda un poco más claro el funcionamiento del SVC, al utilizar la simbología de circuitos para representar los elementos analógicos del sistema. Los distintos elementos analógicos (transformador de bajada (1), arreglo de tiristores (2), banco reactores (3), bancos de condensadores (4), relés (5)) se muestran en la Figura C.5. Los bloques en amarillo representan los circuitos necesarios para el control automático del SVC. Con respecto a dichos bloques en amarillo:

- *Medición de Tensión* corresponde a una etapa de censo de la red, que se realiza con un transformador de tensión (Figura C.6) conectado en la barra de alta del transformador de bajada (Figura C.10).



Figura C.6: Transformador de tensión Medición de Tensión.

- *Regulación de tensión* (Figura C.7) obtiene un voltaje continuo entre 0 y 5 [V] que es proporcional a la diferencia (error) entre la consigna de tensión (V_{ref}) y la tensión real en la barra de alta del transformador de bajada (V_m) que sirve como la señal de entrada para el bloque siguiente, de manera que este bloque sirve como transductor de la señal de medida y sirve para una comunicación adecuada entre la etapa de entrada y la etapa de control.

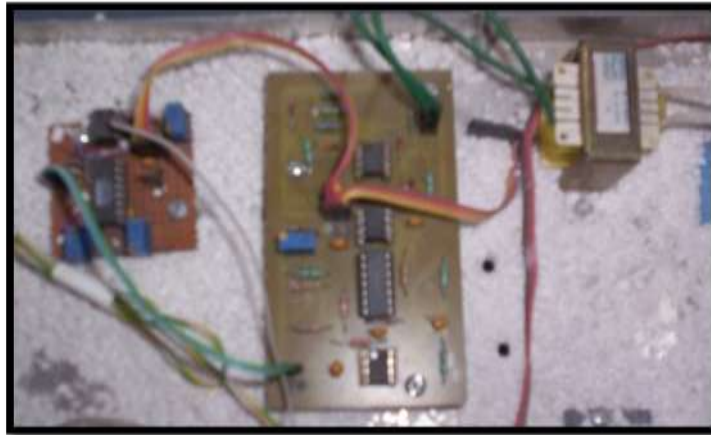


Figura C.7: Etapa de regulación de tensión.

- *Unidad de Distribución* (Figura C.8) corresponde al control central del sistema. Aquí ingresa la realimentación traducida del error de tensión en la barra de conexión y se calcula a partir de ella el ángulo de disparo de los tiristores con una lógica de control basada en reglas. Con esta lógica de control se toma la decisión de apertura y cierre de los interruptores que conectan los bancos de condensadores. Estos bancos se conectan o desconectan si la tensión que ingresa supera o no un cierto umbral.

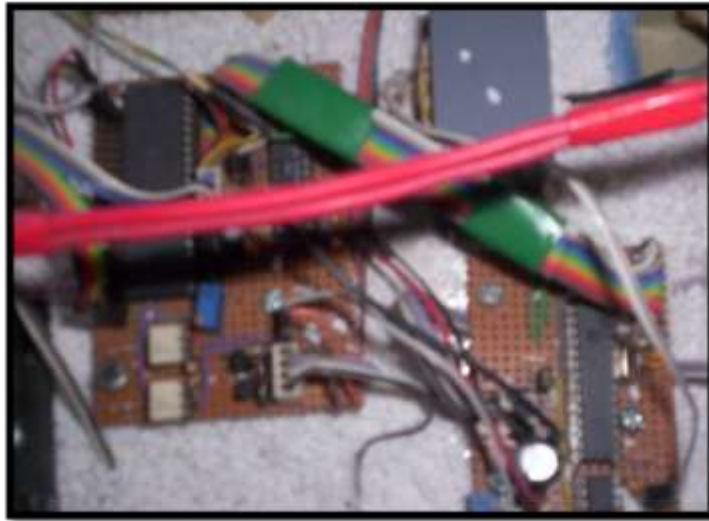


Figura C.8: Etapa Unidad de Distribución.

- Sincronizador de disparo* (figura 1.9b) extrae los cruces por cero de la señal de voltaje de la barra (sensando el voltaje del lado de baja del transformador de bajada (figura 1.9a)) para efectuar los disparos en el momento indicado. En el bloque anterior se calcula la magnitud del ángulo de disparo necesario para reducir el error, pero dicho ángulo se mide con respecto al principio del ciclo de disparo, de manera que es necesario saber cuando comienza cada ciclo, por lo que se necesitan los cruces por cero de la señal de entrada.

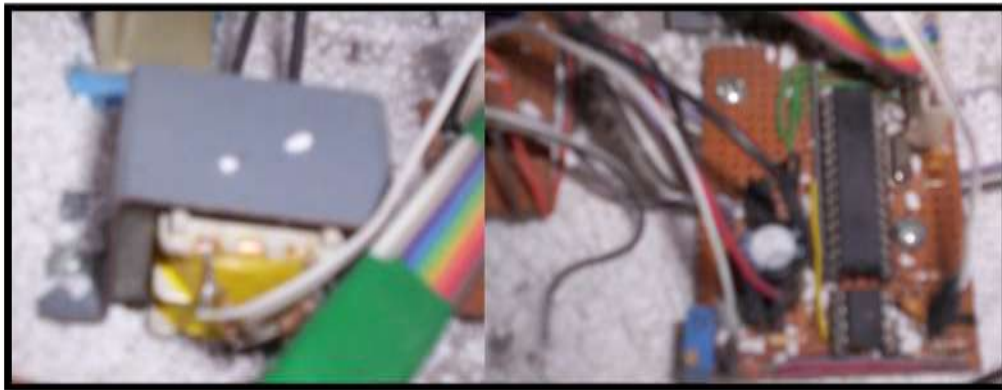


Figura C.9: Etapa Sincronizador de disparo. (a) A la izquierda se muestra el transformador de medida que muestrea el voltaje en el lado de baja del transformador de bajada, de tal manera de obtener los cruces por cero. (b) A la derecha se muestra la circuitería digital encargada de extraer los cruces por cero de la señal muestreada y sincronizar con los disparos.



Figura C.10: Elementos analógicos de potencia del sistema. (a) En la parte superior izquierda se muestra el transformador de bajada del SVC. (b) En la parte inferior izquierda se muestra el arreglo de tiristores que dispara la corriente en los reactores. (c) En la parte superior derecha se muestra uno de los relés (interruptores) de conexión de los bancos de condensadores. (d) En la parte al centro a la derecha se muestra uno de los bancos de condensadores del SVC. (e) En la parte inferior derecha se muestran los reactores del SVC

Circuitos auxiliares y monitoreo

Para la alimentación de los circuitos digitales involucrados (Unidad de Distribución, Sincronizador de disparos, Circuito de Visualización, etc.) se cuenta con una fuente de corriente continua, basada en un transformador reductor y un circuito rectificador, que provee todas las polarizaciones en tensión continua necesarias para el funcionamiento de dichos circuitos (Figura C.11).



Figura C.11: Fuente de Alimentación continua de los circuitos auxiliares.

Cabe destacar que el SVC además cuenta con un circuito de visualización diseñado para la comunicación entre el usuario y el equipo (Figura C.12) que cuenta con un display LCD. Este circuito de comunicación muestra ciertos valores interesantes para la operación, como la tensión RMS en la red y la consigna de tensión (V_{ref}), además del ángulo en que se están disparando los tiristores y el número de bancos de condensadores conectados.

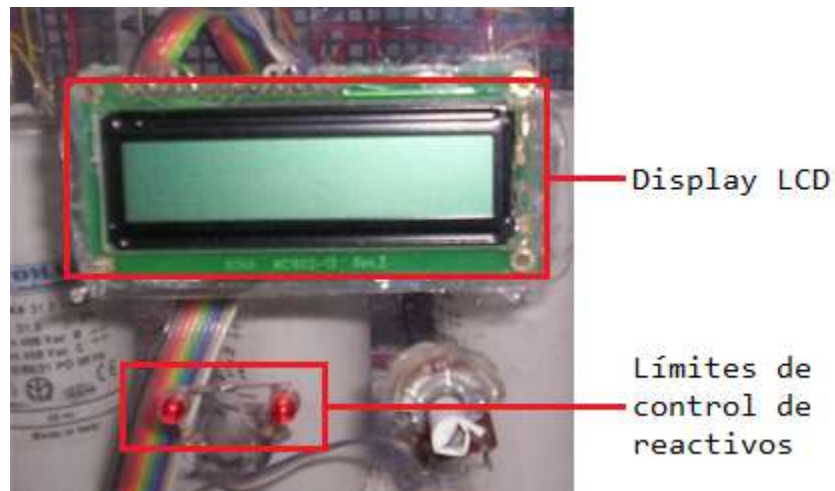


Figura C.12: Interfaz de visualización usuario-equipo.

Externo a esto, el SVC posee un puerto serial, el cual se conecta con un computador portátil que monitorea en línea utilizando Matlab Simulink. En la figura 1.13a se muestra dicho dispositivo y además (Figura C.13) de cómo se ve la interfaz del programa de monitoreo.



Figura C.13: Interfaz de visualización externo usuario-equipo. (a) A la izquierda se muestra la estación computacional donde se visualizan las medidas que se obtienen a través del puerto de comunicación. (b) A la derecha se muestra la interfaz de Matlab-Simulink donde se revisan en línea dichas mediciones.

Subestación

Como ya se ha mencionado, se cuenta con una subestación en miniatura, que sirve como carga para el SVC, además de simular un sistema real, donde se puedan conectar cargas y consumos.

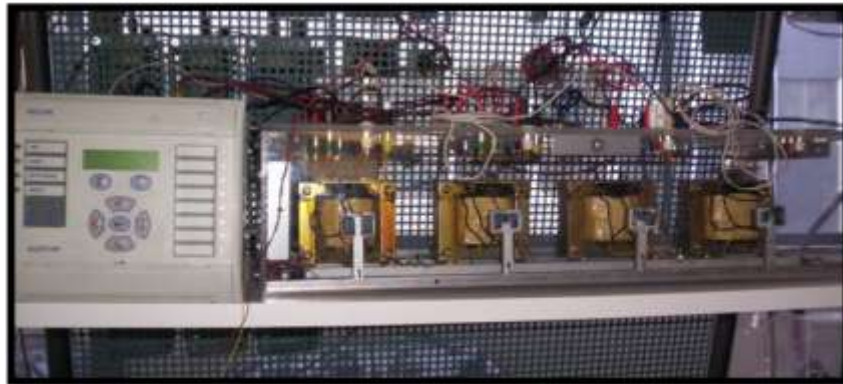


Figura C.14: Vista general subestación.

Como se puede ver (Figura C.14), la subestación está conformada por 4 transformadores. En general, se mantienen activas 3 unidades y hay una de reserva (en caso de que falle alguna). Además, todas las medidas y protecciones de la subestación son proporcionadas por el relé MICOM - P-141 (Figura C.15).



Figura C.15: Vistas relé de protección MICOM - P-141. (a) A la derecha se muestra el panel frontal del relé.
 (b) A la izquierda se muestra una visión superior del relé, donde se pueden visualizar los transformadores de
 medida, etc. del mismo.

Línea y Red infinita

El prototipo SVC cuenta además con una línea de transmisión en miniatura que sirve para acarrear la potencia desde la barra infinita del laboratorio al complejo SVC. Cabe destacar que originalmente la impedancia de esta línea de juguete podía configurarse de varias maneras. Hoy en día, solo hay una combinación que se utiliza, debido a un problema que hubo en el pasado con los reactores de la línea. Esto es terreno abierto y espera algún alumno que aporte con su tiempo para mejorar. La Figura C.16 muestra una vista general del prototipo de línea de transmisión del laboratorio.

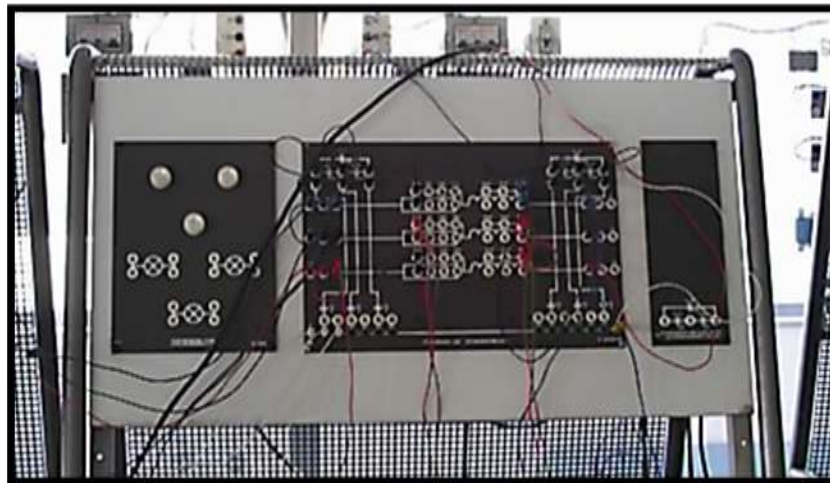


Figura C.16: Vista general línea de transmisión.

El modelo PI de la línea en cuestión posee una resistencia serie de $2.5 \, [\Omega]$, inductores de $32 \, [\text{mH}]$ (y una resistencia asociada de $1 \, [\Omega]$ y una capacitancia fase-fase de $0.25 \, [\mu\text{F}]$.

En la Figura C.17 se muestra una visión general de la barra infinita del laboratorio

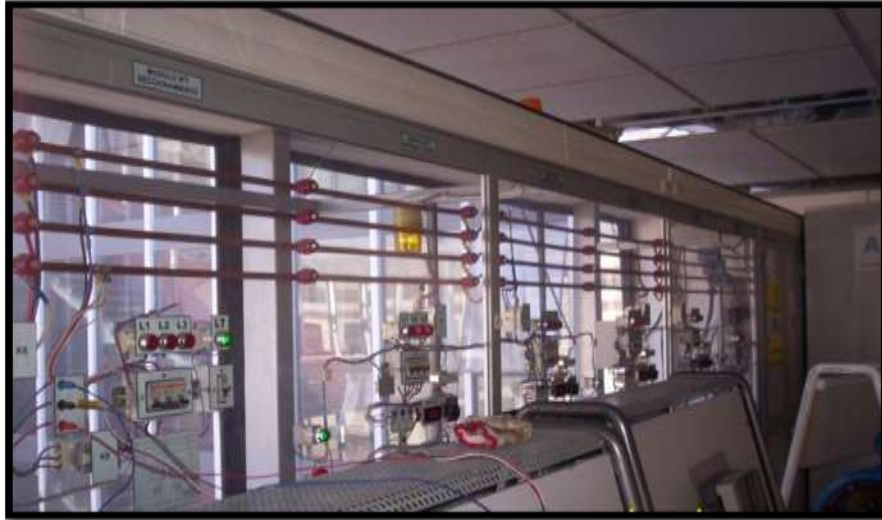


Figura C.17: Vista general barra infinita del laboratorio.

La barra infinita del laboratorio corresponde al enorme panel ubicado en la parte sur del mismo (a la derecha de la entrada). Esta barra corresponde a una barra trifásica de alimentación, que se divide en 11 módulos, de la cual se pueden extraer 390 [V] entre fases y 230 [V] fase-neutro. Esta barra infinita cuenta con todos los sistemas de protección adecuados, desde interruptores manuales para la alimentación de un módulo (Figura C.18a), a interruptores de emergencia (botón de pánico) (Figura C.18b) para cortar el paso de corriente para la barra entera.

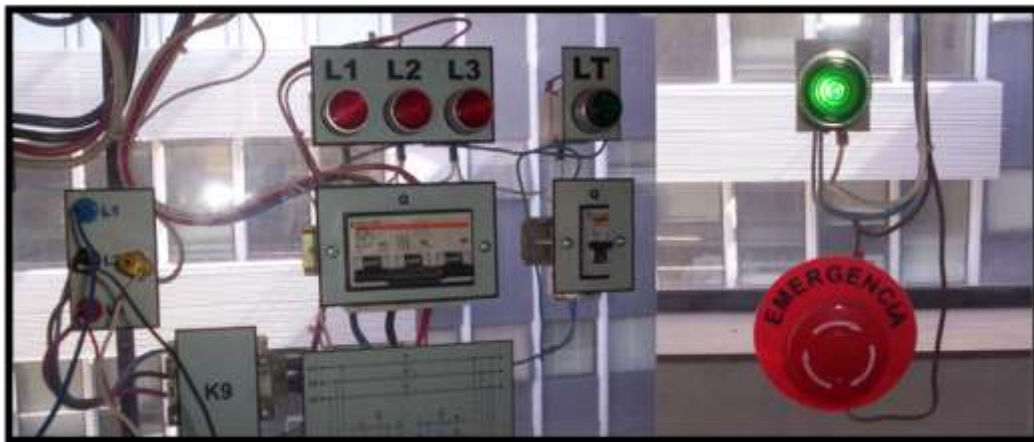


Figura C.18: Interruptores barra infinita. (a) A la izquierda se muestra un interruptor intra-módulo. (b) A la derecha se muestra uno de los llamados botones de pánico de la barra infinita del laboratorio.

Conexiones y control

En esta sección se presentan distintos diagramas y fotografías para ilustrar la conexión de los distintos componentes analógicos y digitales del SVC, además de presentar las distintas conexiones entre el SVC y el resto de los dispositivos involucrados en el prototipo.

Conexiones dentro del SVC

La Figura C.19 muestra cómo se realiza la conexión del puente de tiristores, incluyendo la conexión con los reactores.

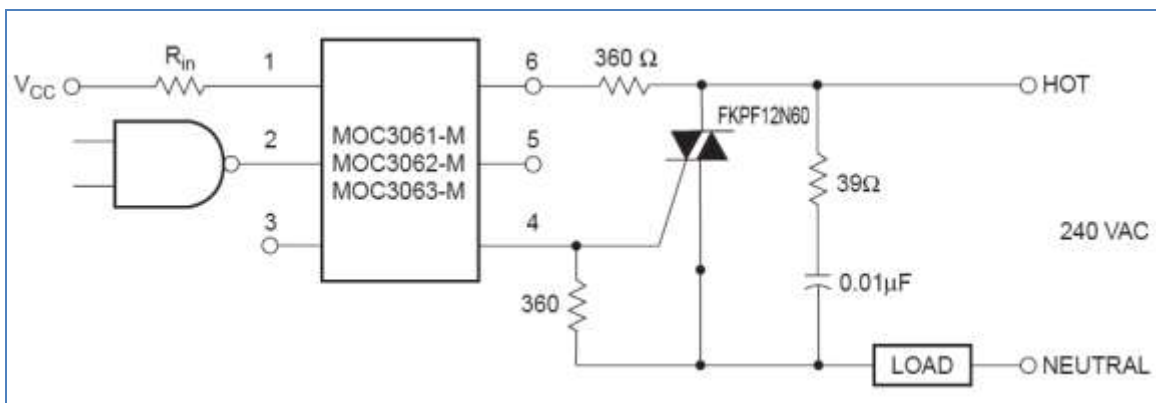


Figura C.19: Esquemático puente tiristores + Reactores.

El dispositivo MOC3061 corresponde a una optocúpla, que se encarga de realizar los disparos de los tiristores (coordinado con los cruces por cero de la señal de voltaje). A la compuerta NAND que aparece, se conecta la salida del bloque *Sincronizador de disparo* mencionado con anterioridad. Vcc es la alimentación continua del sistema y el voltaje alterno VAC se extrae del lado de baja del transformador de bajada. La resistencia y el condensador en paralelo con los tiristores en paralelo corresponden a la llamada *rama snubber* que sirve para suavizar efectos transientes indeseados (peaks de corriente) y proteger los tiristores. La carga LOAD corresponde en el caso del SVC, al respectivo reactor. Notar que este esquemático representa la configuración monofásica, de manera que se tienen 3 de éstos en el SVC. Mayores detalles en referencia [1].

Los condensadores de los bancos se conectan en delta entre sí, y cada uno de ellos se conecta con una de las salidas del respectivo relé de cierre tripolar. A la entrada del relé se conecta una de las salidas del circuito *Unidad de Distribución*, mencionado con anterioridad.

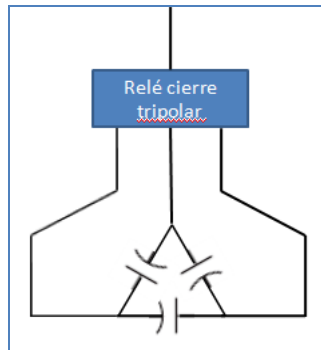


Figura C.20: Configuración de conexión condensadores - relé interruptor.

El circuito TRUE RMS, que corresponde a una parte de la etapa *Regulación de tensión* y que sirve para transformar la señal alterna del transformador de medida en una señal proporcional continua entre 0 y 5 [V] corresponde al circuito esquemático presentado en la Figura C.22. Recordar que a la salida de la etapa *Regulación de tensión*, se conecta la etapa *Unidad de Distribución*, que fabrica los disparos (no los sincroniza) y que determina si se conectan o no los distintos bancos de condensadores. Entre medio del TRUE RMS y esta etapa se debe colocar un amplificador, dado que la señal del TRUE RMS presenta variaciones muy pequeñas (poco perceptibles). Notar también que la etapa *Unidad de Distribución* corresponde a un microcontrolador PIC16F877A.

Conexiones entre los distintos elementos del SVC

Para el sistema SVC se normalizó un código de colores para las tres fases. Los cables correspondientes a esa fase serán del color determinado. Para la fase A (R) se escogió el color negro, para la fase B (S) el azul y para la fase C (T) se escogió el color rojo. Las conexiones entre equipos (subestación-SVC, SVC-línea, línea-subestación, carga-línea, etc) respetan este código para las conexiones. Dentro de un mismo equipo, por escasez de cables, se utilizan cables de cualquier color (como para la subestación).

Recordar que el extremo receptor de la línea forma la barra receptora del prototipo, y ahí se conectan la subestación, el SVC y las posibles cargas que se deseen poner. Recordar además que se le pueden conectar cargas a la subestación para experimentación. Como maqueta en miniatura, la carga de la subestación podría representar una pequeña ciudad y las cargas conectadas directamente a la barra podrían ser consumos industriales, etc.

Los transformadores de la subestación se conectan en estrella en el lado de alta y en delta en el lado de bajada (Figura C.21a). La conexión corresponde a una Yd1. La subestación tiene una carga resistiva conectada por defecto conectada en delta (Figura C.21b).

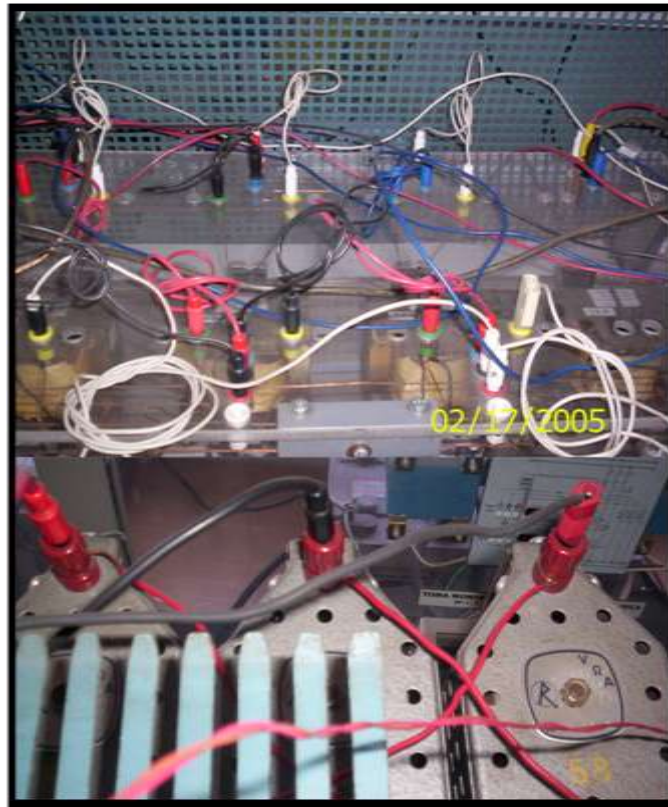


Figura C.21: Conexiones subestación. (a) Arriba se muestra la conexión Yd1 de los transformadores. (b) Abajo se muestra la conexión delta de la carga resistiva por defecto.

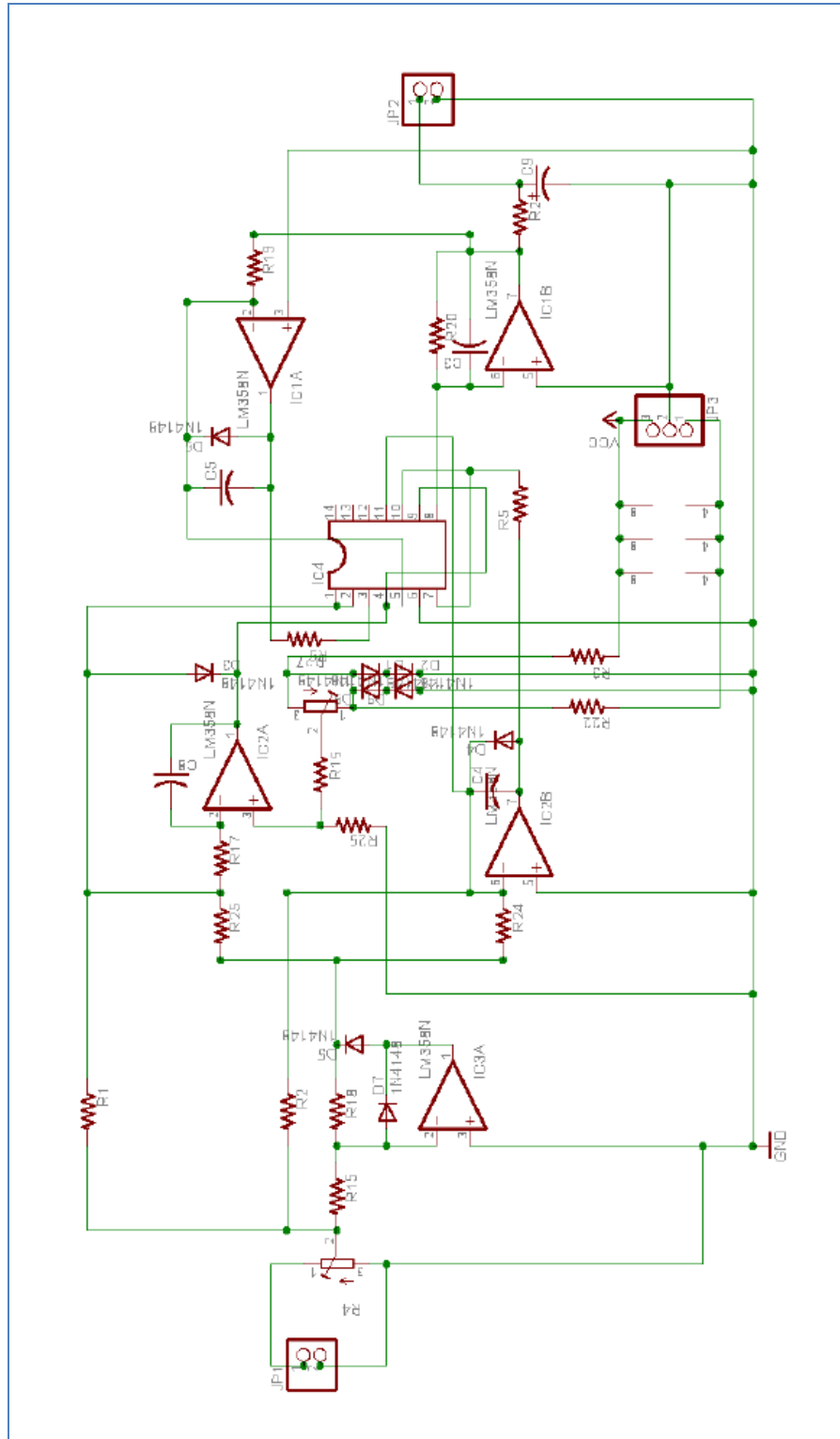


Figura C.22: Diagrama esquemático circuito TRUE RMS.

Lógica de control SVC

El centro neurálgico del SVC, el PIC16F877A, adopta entonces 4 funciones: calcular el ángulo de disparo de los tiristores a partir de la tensión entregada por el bloque de *Regulación de tensión*, determinar si es necesaria la conexión o desconexión de los bancos de condensadores y señalar adecuadamente a los relés, actualizar la pantalla LCD de la interfaz de comunicación usuario-equipos y actualizar la información que se entrega en el puerto serial a la interfaz de comunicación externa usuario-equipos.

Un aspecto interesante de la comunicación a través de la interfaz usuario-equipos (LCD) es que esta pantalla posee indicadores de límites de entrega y absorción de reactivos, indicando cuando el SVC no puede entregar o absorber más reactivos al o del sistema. Si por ejemplo se tuviera un servicio auxiliar de regulación de reactivos, el encendido de los indicadores respectivos sería la señal de activación que implique la entrada en servicio del sistema auxiliar (si lo hubiera).

Todo lo que se nombró recién funciona a partir de la lógica de control presentada en la Figura C.24.

Los disparos son sincronizados por un dispositivo PIC-18f242 (etapa *Sincronizador de disparo*), cuya lógica de control se presenta en la Figura C.23.

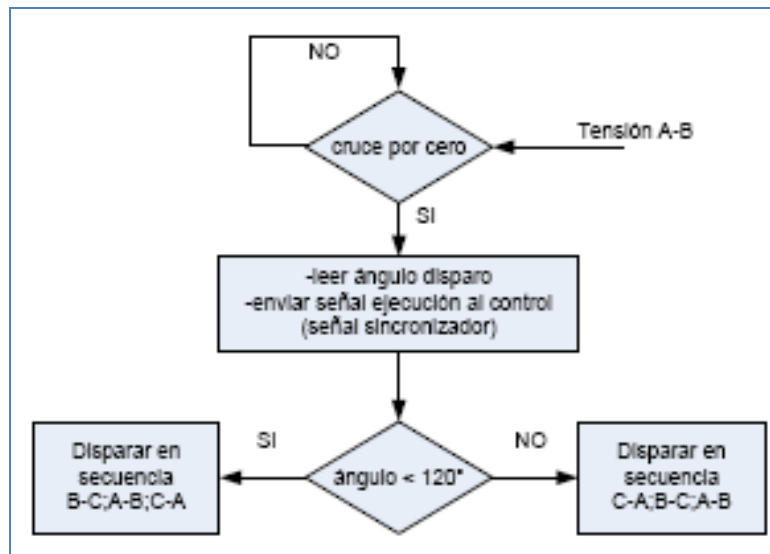


Figura C.23: - Lógica de control de sincronización de disparo.

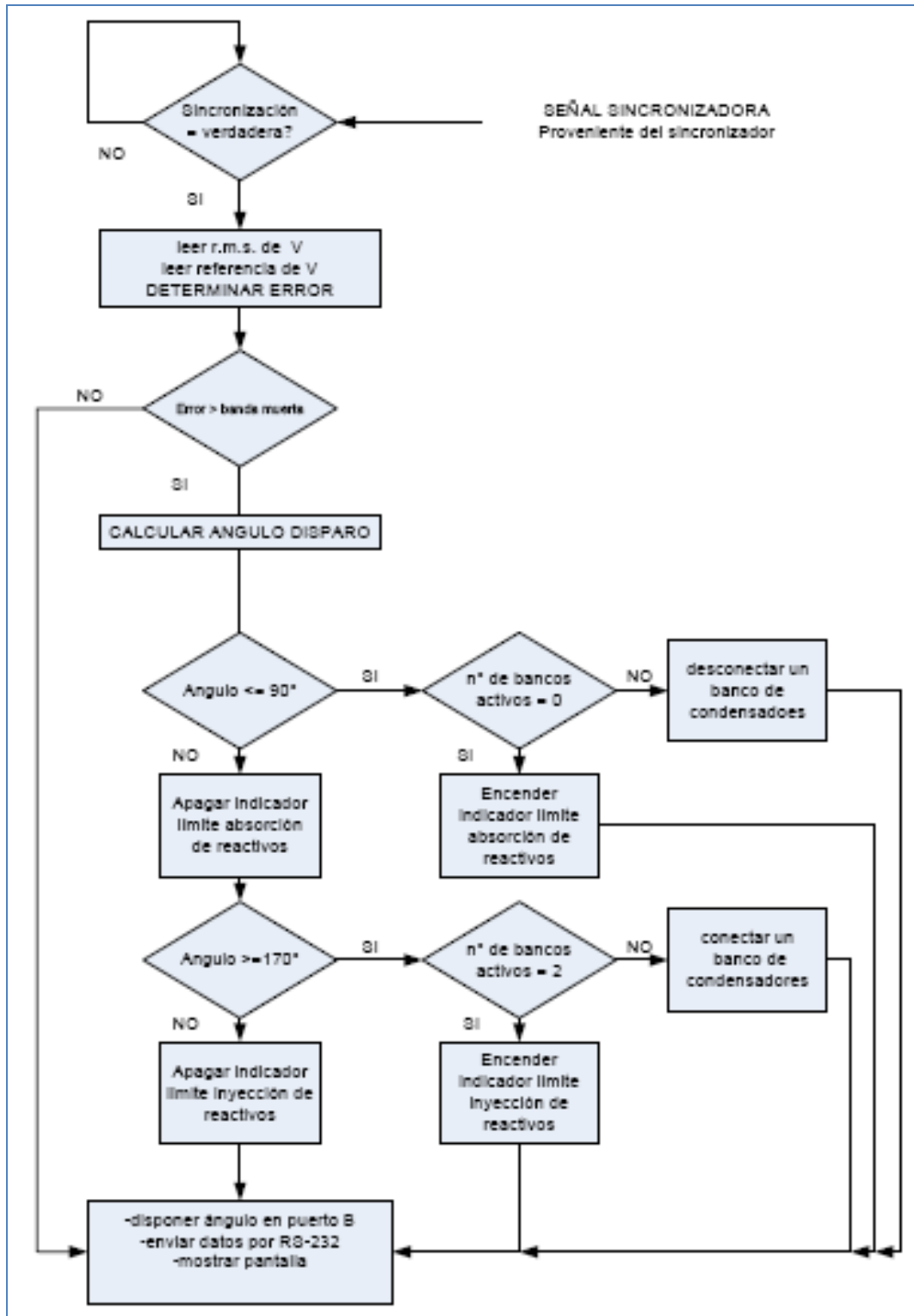


Figura C.24: Lógica de control central SVC.

D. OPERACIÓN Y PUESTA EN MARCHA

Ahora que ya se sabe para qué sirve el SVC, como se ven sus partes físicamente y cómo se realizan las conexiones, en esta sección se presenta qué se hace para energizar y qué medidas de seguridad se deben tomar para darle vida al asunto y no morir en el intento. Además se presentan detalles de qué se hace una vez que la cosa funciona y en especial como se maneja la interfaz matlab de toma y visualización de datos.

Puesta en Marcha

Para poner en marcha el prototipo SVC del laboratorio, deben realizarse una serie de pasos para poder energizar en forma segura, sin dañar los equipos y/o dañar al operario. Estos pasos lógicos son:

- Conectar en la secuencia correcta las fases del SVC, intercalando el modelo de línea PI entre la red del laboratorio y el SVC. Esta conexión se realiza conectando de acuerdo a los colores (como se señala en la sección anterior) en los bornes destinados para ello (eso no se va a señalar porque se respeta la integridad y el nivel técnico del usuario).
- Conectar la subestación a la barra receptora, junto con ello, conectar el relé de protección numérica MICOM P-141. Notar dicho relé se energiza desde la fuente de alterna, pero es necesario encender también una fuente de continua dispuesta en la parte inferior del módulo del SVC (Figura D.1a). Para encender la medición del relé, en la parte superior de la pecera donde están inmersos los transformadores hay un pequeño botón negro (Figura D.1b) que resetea el sistema. Por otra parte, se puede hacer saltar el sistema al cortocircuitar los terminales de una pequeña resistencia que cuelga conectada entre unos cables al lado del relé (Figura D.1c).



Figura D.1: Encendido relé de protección MICOM P-141. (a) A la izquierda se muestra la fuente de continua que sirve para energizar el relé. (b) Al centro se muestra el pequeño botón que sirve para resetear la medición del relé. (c) A la derecha se muestra la pequeña resistencia que sirve para hacer saltar el sistema.

- Posicionar el *setpoint* (consigna) (Figura D.2) de tensión del SVC al máximo, para aumentar el ángulo de disparo de los tiristores y disminuir la corriente por los inductores, ya que al energizar, se producen transitorios de corriente dañinos para el puente de tiristores, dado que la energización no es equilibrada en el primer ciclo de onda. Notar que la perilla

indicada para esto se encuentra adherida al display LCD de la interfaz de comunicación usuario-equipo.



Figura D.2: Setpoint del SVC.

- Conectar en la barra receptora todas aquellas cargas adicionales de experimentación que se deseen conectar con las respectivas consideraciones (que dependen de lo que usted esté conectando, harina de otro costal).
- Energizar la barra emisora, el equipo empezará a regular tensión en la barra receptora.

Todos estos pasos se muestran en el diagrama resumen de la Figura D.3.

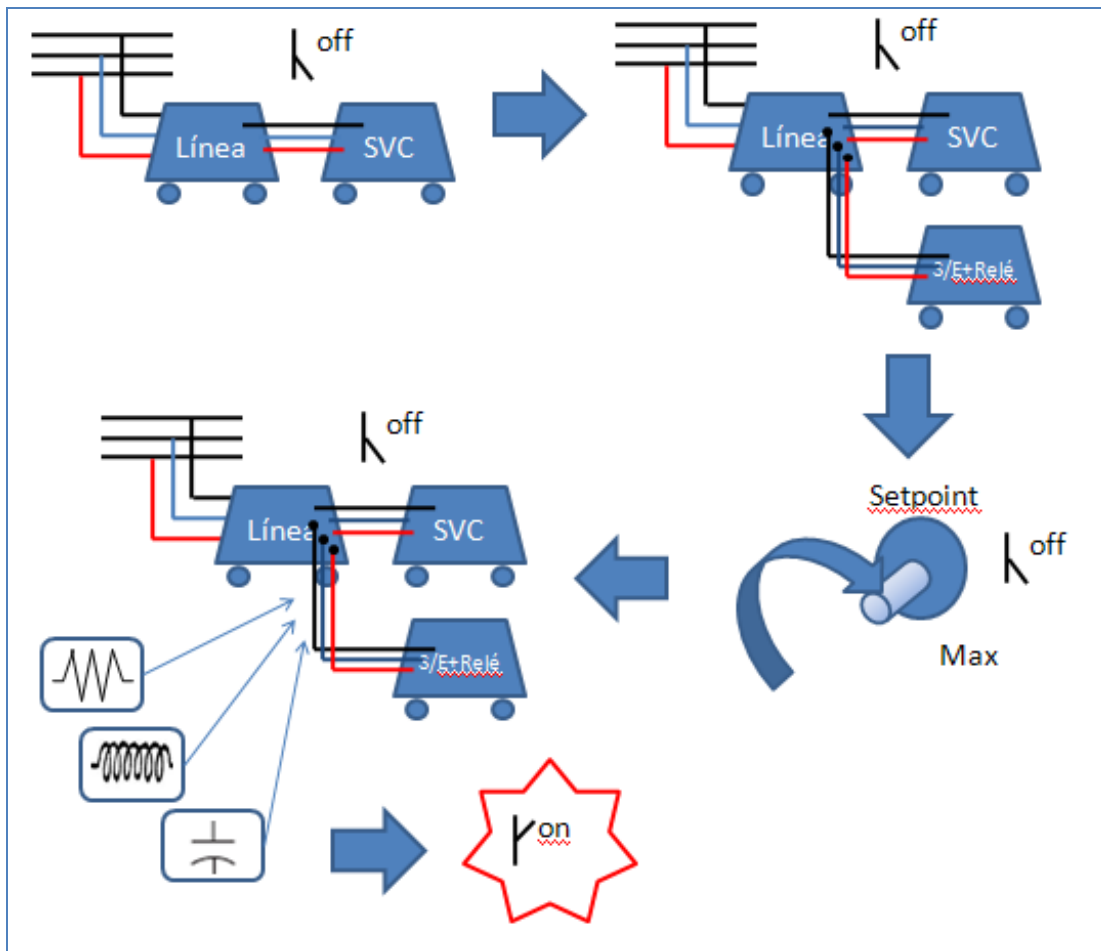


Figura D.3: Diagrama resumen puesta en marcha SVC.



Operación

Una vez que el sistema ya está andando, hay pocas cosas que hacer. El SVC no hace mucho ruido y no tiene partes móviles. No es muy espectacular si eso es lo que usted busca. La única perilla móvil del sistema corresponde al set de la consigna de tensión, el resto lo hace todo solito el SVC. Lo único que se puede hacer entonces es dedicarse al monitoreo y a la toma de datos.

Algunas consideraciones cuando el sistema está operativo son las siguientes:

- Una forma de constatar que el sistema está activo corresponde a que con el sistema bien energizado, los reactores y transformadores (de la subestación y de bajada) vibran, emiten cierto ruido y se calientan. El resto de las partes del SVC suena, significa que algo anda mal y hay que desconectar.
- El sistema no emite olores, cualquier olor a quemado implica la inmediata desenergización de todos los sistemas.
- Recordar que el SVC está diseñado para operar a una consigna de tensión fija por lo que no se vuelva loco moviendo la perilla muy rápido ni cambie la consigna de tensión en ventanas muy cortas de tiempo. Una vez que usted setea la consigna de tensión, déjelo ahí, no trate de llamar la atención.
- Para apagar el sistema, primero se desconecta la alta tensión (barra infinita). Luego se desconecta el interruptor al que están conectados el relé MICOM P-141, el computador, etc. Alternativamente se puede apretar el botón de pánico, que hace saltar todo el sistema.
- Si va a hacer mediciones con el osciloscopio, recuerde siempre levantarlo de tierra (lo que significa que la patita del medio del enchufe del osciloscopio quede desconectada). No conectar las puntas de osciloscopio mientras el equipo se encuentra energizado a aquellas tensiones que puedan dañarlo a usted y al osciloscopio (todo lo que salga y/o entre al transformador de bajada, etc).

El funcionamiento del SVC se puede monitorear desde el computador auxiliar dispuesto en la parte superior del módulo a través de una interfaz de Matlab-Simulink que recibe los datos desde la salida serial del SVC. Para encender el monitoreo, siga los siguientes pasos:

- Encienda el computador bajo ambiente Windows, esto lo puede hacer antes de encender todo, se demora bastante, el computador es bastante viejo y al profesor no le gusta que el SVC se conecte a otros computadores que limiten su libertad o su independencia.
- Una vez encendido el PC, en el escritorio se encuentra el icono de Matlab. Abra haciendo doble click en este icono y espere que cargue el Matlab (de nuevo, esto toma tiempo, asíque con paciencia). El directorio default es que se va a utilizar, asíque no cambie nada. En el current directory de Matlab, aparece una carpeta que dice SVC. En ella hay varios archivos de simulink. Abra aquel que se llama.
- Ahora tiene encendida la interfaz de monitoreo, ahora para comenzar la toma de datos, debe hacer click en el botón play como toda simulación en simulink. Notar que el SVC debe estar compensando reactivos para ese entonces, si usted hace andar el simulink

antes que el SVC, el mentado computador se para y habría que reiniciarlo, con toda la pérdida de tiempo que eso conlleva.

E. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Para asegurar el funcionamiento del prototipo, se realizan ciertas pruebas de validación. El equipo debe responder adecuadamente a dichas pruebas con un comportamiento normado. A continuación se presentan las pruebas de validación del equipo en detalle; se explica en qué consiste cada prueba, qué materiales se necesitan, como se hacen las mediciones y cuales son los resultados que se deben obtener a partir de las pruebas.

Prueba de curva de operación SVC

Esta prueba consiste en evaluar la tensión en la barra receptora, con el SVC conectado, pero sin otra carga adicional, a medida que se modifica el valor de la tensión en el extremo emisor. La Figura E.1 muestra un diagrama esquemático de cómo se conectan los elementos necesarios para la prueba.

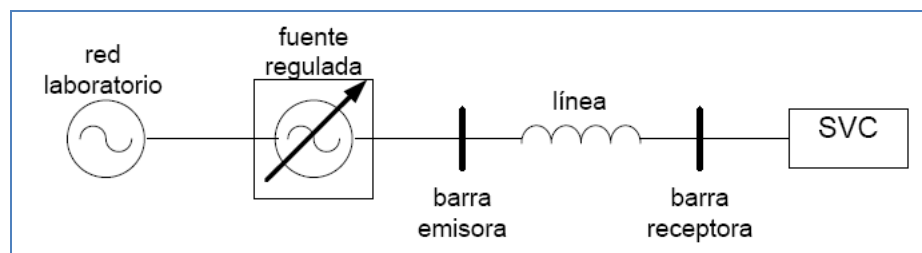


Figura E.1: Diagrama esquemático prueba de curva de operación SVC.

Todos los elementos necesarios se encuentran en el laboratorio de energías y accionamientos del laboratorio, salvo la denominada “fuente regulada”. Dicha fuente en realidad no es más que un transformador con razón de vueltas variable, disponible en el laboratorio de máquinas del departamento. Para tener acceso a un tipo de transformador así, es necesario que el usuario se encuentre en buenos términos con el encargado del laboratorio de máquinas, don Villa.

Este transformador es una caja grande con bornes trifásica. La razón de vueltas se cambia con una manivela. Para realizar esta prueba, usted debe intercalar este transformador entre la barra infinita del laboratorio y la línea de transmisión. Luego debe realizar el proceso de conexión y encendido del SVC y energizar el sistema. Con el sistema funcionando, setee la consigna de tensión del SVC en algún valor fijo y comience a darle vueltas a la manivela y a medir. Notar que debe medir el voltaje en el extremo emisor de la línea, el voltaje en extremo receptor de la línea (barra receptora) y la corriente por el SVC. También puede medir la tensión en el lado de baja del transformador de bajada del SVC.

Como resultado, usted debe construir la curva de operación del SVC, que se ve como se muestra en la figura 3.2.

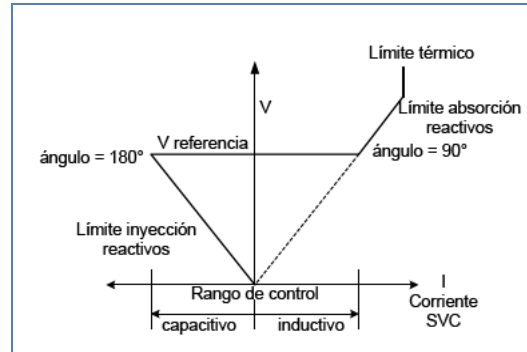


Figura E.2: Curva de operación del SVC.

Prueba de Regulación

Esta prueba consiste en evaluar la tensión en la barra receptora, con el SVC conectado, para una tensión fija en el extremo emisor y para un aumento creciente del valor de la carga en el extremo receptor. Esta carga solo debe ser resistiva, para que la potencia activa que se absorba tenga completa dependencia con la tensión en la barra receptora. En la Figura E.3 se muestra un diagrama esquemático de cómo se conectan los elementos necesarios para la prueba.

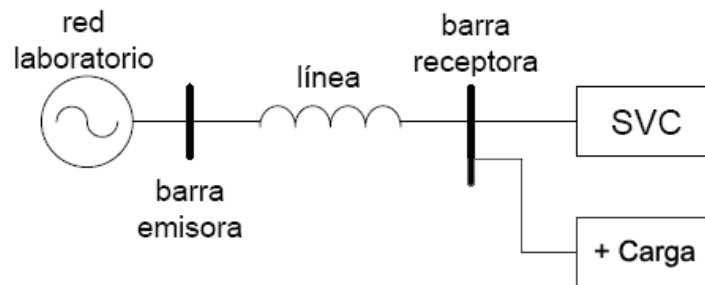


Figura E.3: Diagrama esquemático prueba de regulación.

Como se puede ver, corresponde a una configuración parecida a la de la prueba de curva de operación. Aquí nuevamente se utiliza la fuente regulada, con la salvedad que en esta oportunidad es para fijar un voltaje en la barra emisora. Como cargas resistivas, utilice reóstatos, como los que tiene la subestación como consumo fijo. Si necesitara otros valores de resistencia, siempre puede acudir a don Villa (ahora que tiene buenas relaciones con él) y conseguir más reóstatos.

Para esta prueba, usted fijará la tensión en el lado emisor, además de la consigna de tensión en el SVC. Conectará sucesivas cargas en forma **creciente** y medirá la corriente que pasa por la carga. Para una misma tensión en el extremo emisor y una misma consigna mida las distintas corrientes de las distintas cargas. Luego puede modificar la consigna del SVC (dejando fija la tensión en el extremo emisor) y medir para las distintas cargas de nuevo. Finalmente cambie la tensión en el extremo emisor, fije una consigna, mueva cargas y mida. Como se puede ver, existe una gran variedad de configuraciones para esta prueba. Se sugiere utilizar tensiones en el lado emisor de 370, 380 y 390 [V], consignas de tensión en el SVC de 370, 380 y 390 [V] y utilizar 12 cargas distintas (12 cargas estándar para todas las pruebas, para comparar después). Ojo que también es bueno comparar con el caso sin SVC.

Como resultado de esta prueba se deben obtener curvas de tendencia como las señaladas en la Figura E.4. Dichas curvas deben presentar una buena regulación de tensión en un tramo inicial y luego decaer linealmente.

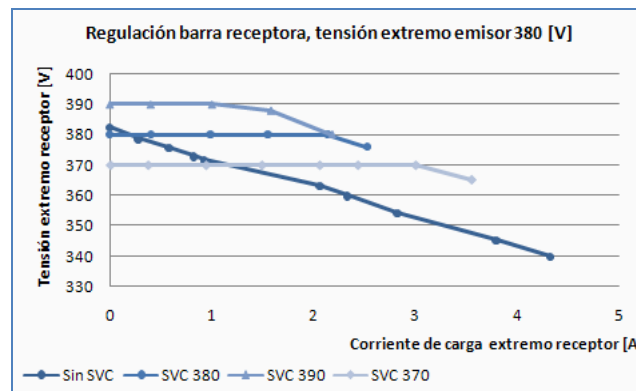


Figura E.4: Ejemplo regulación de tensión en el extremo receptor, en función de la corriente en la carga.

Prueba de armónicos

Esta prueba consiste en medir y visualizar los niveles armónicos que aparecen en las distintas zonas del SVC y compararlas con los valores de armónicos permitidos por la norma respectiva en cada caso. Lo que sucede es que las corrientes armónicas son ruido de alta frecuencia que ensucia las señales de la red. Si algún elemento contamina con muchos armónicos su red local, distorsiona el servicio para todos los demás usuarios. Una señal mal distorsionada puede ser dañina para equipos y personas. Es por esto que existen límites definidos acerca de cuantos armónicos se puede dar uno el lujo de botar al medio ambiente. Ojo que todos los dispositivos de estado solo, tienen asociada contaminación por armónicos. Es el precio de la reducción de espacios, reducción de costos y todas las maravillas de la electrónica de potencia.

Una prueba de armónicos por lo general se ve como la imagen presentada en la Figura E.5.

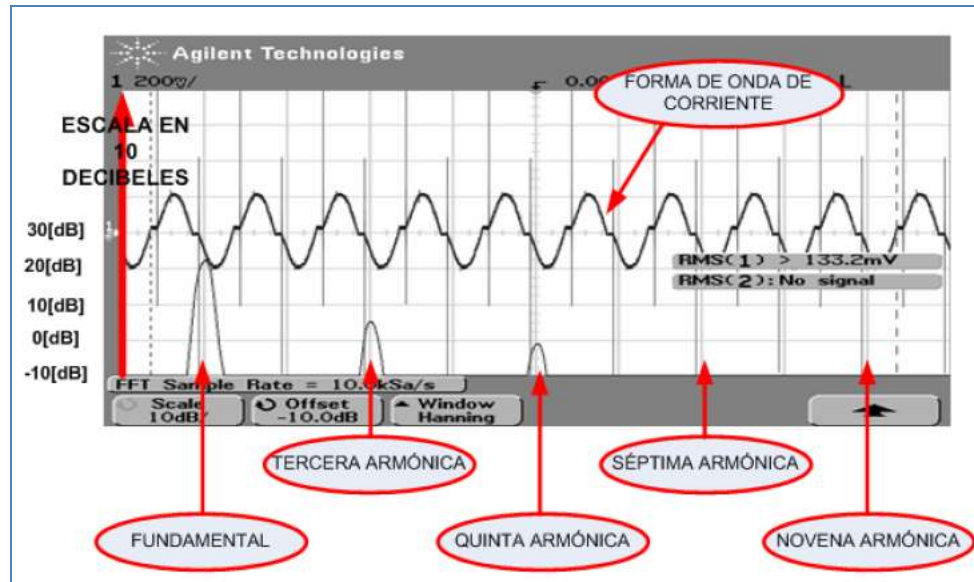


Figura E.5: Ejemplo resultado prueba de armónicos.

Los armónicos en el SVC son generados por los dispositivos de electrónica de potencia, en este caso los tiristores que modifican la corriente en los inductores. De manera que lo primero es revisar los armónicos en la corriente por los reactores. Luego se revisan los armónicos en la línea de baja tensión del SVC (lado de baja del transformador de bajada) y luego se revisan los armónicos en la línea de alta tensión del SVC (lado de alta del transformador de bajada) para las configuraciones sin y con neutro conectado.

Para cada instancia, la prueba de armónicos se hace de la siguiente manera:

- Se miden las armónicas (se toma una foto de osciloscopio) para distintos ángulos de disparo, con esto se espera que usted llene una tabla con los valores de la fundamental, la 3ª, la 5ª y la 7ª armónica para cada ángulo de disparo. Grafique los resultados de su tabla.
- Con los datos de las tablas obtenidas, se calculan las corrientes armónicas para la fundamental, la 3ª, la 5ª y la 7ª armónica en cada caso. Grafique los resultados de su tabla.

Como ejemplo, en la Figura E.6 se muestran las medidas de armónicos y las tablas confeccionadas para el caso de la corriente de línea de A.T. sin bancos de condensadores conectados, además de los respectivos gráficos a partir de las tablas.

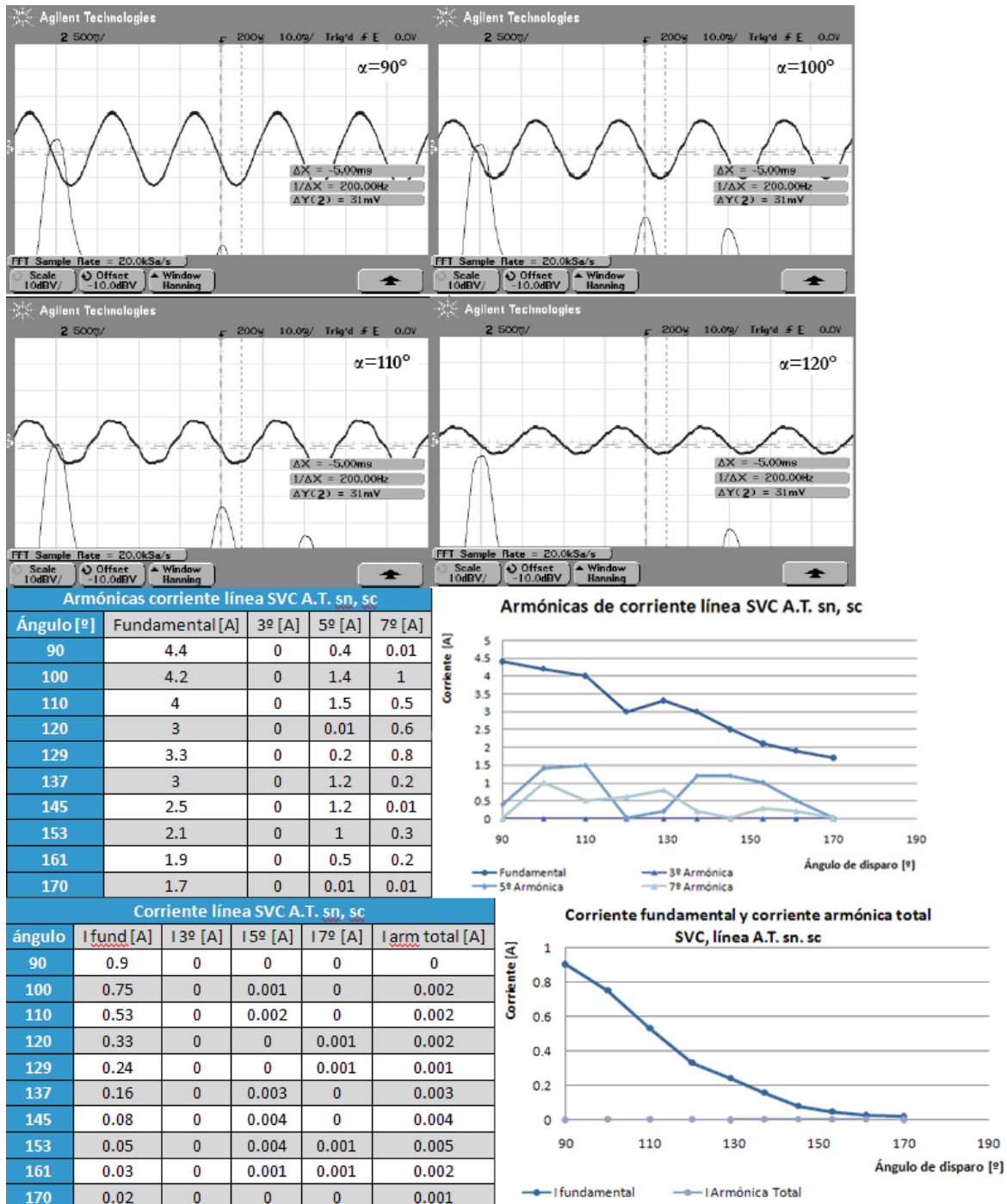


Figura E.6: Ejemplo prueba de armónicos caso corriente de línea de A.T. sin bancos de condensadores conectados (a) En la parte de arriba se muestra un extracto de las mediciones hechas con osciloscopio, para distintos ángulos de disparo, en una prueba que llegó hasta (?). (b) Al centro se muestra la tabla de armónicas con su respectivo gráfico. (c) En la parte de abajo se muestra la tabla de corrientes armónicas y su gráfico. *sn: sin neutro conectado, sc: sin bancos de condensadores conectados



Se pueden hacer un montón de pruebas, para distintas combinaciones de neutro conectado o no y de cuantos bancos de condensadores se conectan o no. En total, todas las pruebas que se pueden hacer son las siguientes:

- Corriente circulante por un reactor a distintos ángulos de disparo.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de baja tensión, sin bancos de condensadores conectados.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de baja tensión, un banco de condensadores conectados.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de baja tensión, dos bancos de condensadores conectados.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de alta tensión, sin bancos de condensadores conectados. Sin neutro conectado.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de alta tensión, un banco de condensadores conectados. Sin neutro conectado.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de alta tensión, dos bancos de condensadores conectados. Sin neutro conectado.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de alta tensión, sin bancos de condensadores conectados. Sin neutro conectado.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de alta tensión, un banco de condensadores conectados, con neutro conectado.
- Corriente circulante por la línea del SVC, lado de alta tensión, dos bancos de condensadores conectados, con neutro conectado.

Pruebas de respuesta dinámica

Estas pruebas corresponden a la revisión de efectos dinámicos asociados a eventos (contingencias) externos que ocurren en el ambiente del SVC. Estas pruebas son simulaciones de situaciones reales y es muy importante que el SVC pueda responder de manera satisfactoria, dado que eventos como los que se tratan de ejemplificar en estas pruebas ocurrirán todos los días en un sistema real. Un SVC está pensado para mantener niveles de tensión a nivel local en lugares conflictivos, con consumos raros (que cambien por ejemplo su factor de potencia mucho en ventanas de tiempo definidas) o condiciones de generación y transmisión complicadas (inestabilidades en la generación o problemas de toda índole en la línea, fallas, etc).

De acuerdo a los orígenes de la situación conflictiva que deberá enfrentar el SVC, se realizan 2 pruebas para aislar situaciones (una situación donde falle la barra emisora y el consumo se descarta para este prototipo).

Prueba de respuesta dinámica frente a variaciones de carga en el extremo receptor

Esta prueba consiste en revisar como evolucionan dinámicamente distintas variables asociadas al SVC frente a variaciones de carga en el extremo receptor. Para esta prueba se utiliza la interfaz Matlab-Simulink que provee la comunicación externa usuario-equipo.

Las variables que se revisan son la variación de la tensión fase-fase A-B, el ángulo de disparo y el número de bancos de condensadores conectados. Esta prueba se realiza para una configuración fija de consigna de tensión en el SVC y de tensión en el extremo emisor. La idea es revisar qué sucede al conectar distintos tipos de carga, simulando el ingreso y retiro de consumos a la red. En la Figura E.7 se muestran visualizaciones de cómo debería resultar esta prueba.

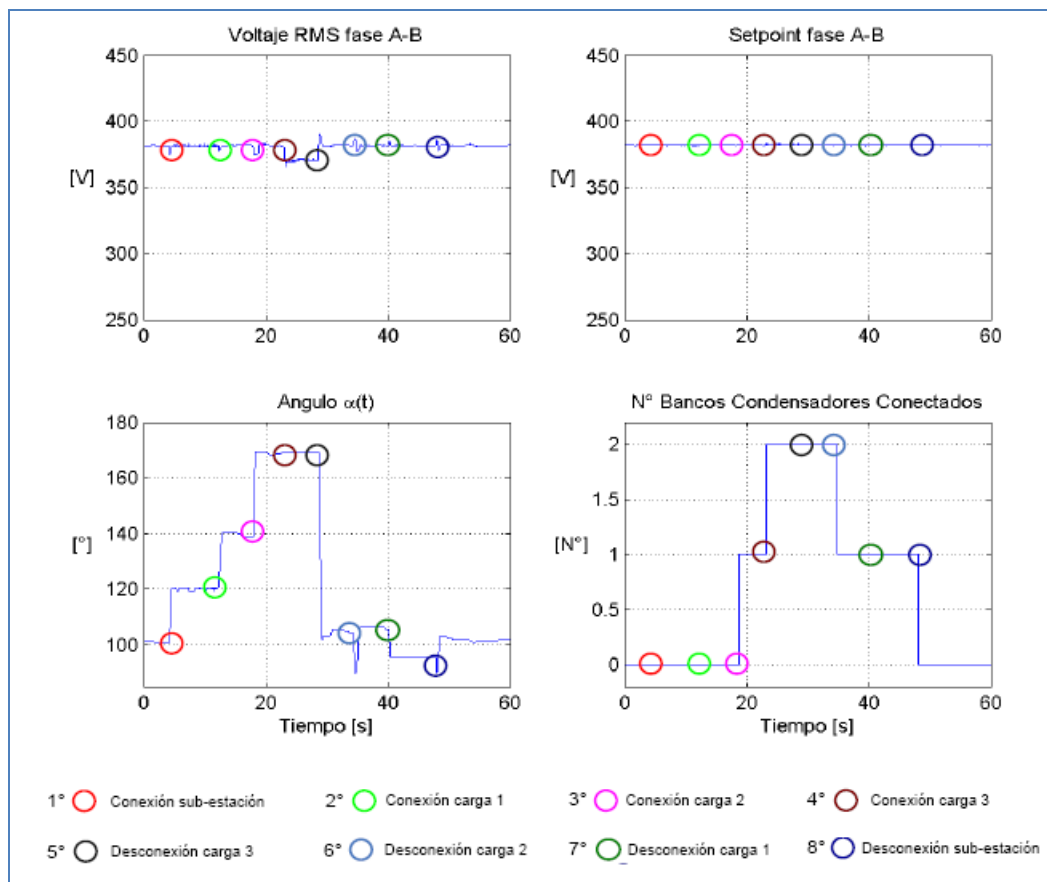


Figura E.7: Ejemplo resultados prueba de respuesta dinámica frente a variaciones de carga en el extremo receptor.

Prueba de respuesta dinámica frente a variaciones de tensión en el extremo emisor

Esta prueba consiste en revisar como evolucionan dinámicamente distintas variables asociadas al SVC frente a variaciones de tensión en el extremo emisor. Para esta prueba se utiliza la interfaz Matlab-Simulink que provee la comunicación externa usuario-equipo.

Nuevamente la variables que se revisan son la variación de la tensión fase-fase A-B, el ángulo de disparo y el número de bancos de condensadores conectados. Esta prueba se realiza para una configuración fija de consigna de tensión en el SVC y de carga en el extremo receptor. La idea es revisar qué sucede al modificar el voltaje en la barra infinita, simulando situaciones de contingencia en la tensión de la red.

En la Figura E.8 e muestran visualizaciones de cómo debería resultar esta prueba. La prueba que se realizó para el ejemplo consiste en 2 escenarios: el primero corresponde a una baja de tensión en el extremo emisor y su posterior recuperación, y el segundo escenario corresponde a un alza de la tensión en el extremo emisor y su posterior recuperación.

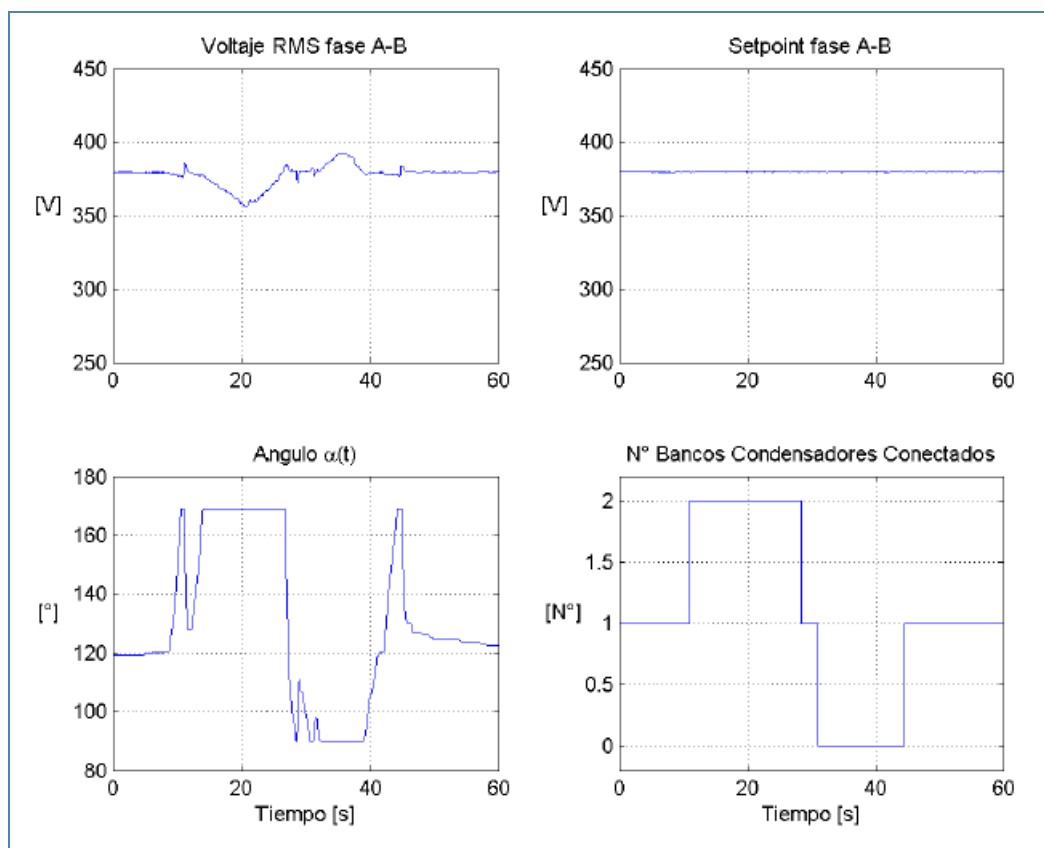


Figura E.8: Ejemplo resultados prueba de respuesta dinámica frente a variaciones de tensión en el extremo emisor.



Prueba de cortocircuito

Esta prueba consiste en efectuar distintas fallas en el lado de baja de la subestación y revisar como se comporta el sistema con y sin SVC, además de determinar como se comporta el SVC frente a las fallas. La subestación se encuentra protegida por el relé MICOM - P141 y éste permite un estudio bien completo de las fallas, dada la capacidad que tiene de tomar datos antes, durante y después de la falla. De esta manera, se puede estudiar el caso con y sin SVC en el sistema.

Para esta prueba se sugiere realizar fallas de distinta índole (trifásicas, bifásicas, monofásicas, a tierra o no, etc), y revisar el comportamiento del sistema ante cada una. En estas pruebas las mediciones se hacen todas con el relé MICOM - P141 y con la interfaz de adquisición de datos de Matlab (para revisar el comportamiento del SVC y la tensión en la barra receptora en las condiciones de falla). Usted no se preocupe, el relé MICOM - P141 se encarga de despejar las fallas y de proteger los equipos.

F. REFERENCIAS

1. "Prototipo de Equipos FACTS de Baja Potencia" – Memoria de título Jaime Muñoz Castro.
2. "Ñom Lüfke" – Walter Brokering Christie, Rodrigo Palma Behnke, Luis Vargas Díaz, capítulo 19, especialmente secciones 19.2.1, 19.3, 19.4.
3. "Ñom Lüfke" – Walter Brokering Christie, Rodrigo Palma Behnke, Luis Vargas Díaz, capítulo 8, especialmente secciones 8.1, 8.2, 8.3 y 8.5.
4. Lab-Scale TCR-Based SVC System for Educational and DG Applications - Patricio Mendoza-Araya, Jaime Muñoz Castro, Jaime Cotos Nolasco, Rodrigo Palma-Behnke.
5. "Power Electronics Handbook" – Muhammad H. Rashid, capítulo 4.