

# The Magnetically Controlled Reactor Applied to Peruvian Power System

R.M.A. Velásquez, *Senior Member, IEEE*, and J.V.M. Lara, *Senior Member, IEEE* and C. Díaz, *Member, IEEE*

**Abstract**—Nowadays, the electrical systems require new flexible AC transmission systems; they allow the implementation of new reactive control and flexibility with the short circuit currents, with modern control systems. This paper develops the design of a magnetically controlled reactor (MCR) system, with a case study for design and application in the Peruvian power system. The dynamics analysis and faults considerations are important points for new projects in a real power system. The MCR could be applied in the power systems, instead of a static var compensator (SVC) or static synchronous compensator (STATCOM), besides the Transient Restoration Voltage is eliminated in the case of shunt reactors in power lines for the circuit breakers degradation. The main characteristics, constraints and benefits are developed in this research.

**Index Terms**—Control, design, magnetically, reactor.

## I. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la presente investigación es mostrar la regulación dinámica de potencia reactiva que es posible realizar con el Reactor Magnéticamente Controlado o su equivalente en inglés “Magnetically controlled reactor” (MCR) en sistemas eléctricos de potencia mediante un modelo dinámico desarrollado en la sección 2, dado que el MCR puede ser una alternativa a la compensación tradicional utilizada en barras con requerimientos de regulación rápida de potencia reactiva para controlar tensión, en lugar de reactores en paralelo de línea de transmisión tradicionales cuyos interruptores sufren de la tensión transitoria de restablecimiento o aplicaciones como reemplazar un diseño de un sistema flexible de transmisión en corriente alterna.

Este artículo propone una alternativa de solución innovadora y no convencional en nuestro medio para resolver el problema de regulación de tensión que se presenta en el subsistema eléctrico en puntos con diferencia entre la corriente de cortocircuito y la capacidad de potencia, en donde un SVC no puede instalarse, debido al déficit de soporte de reactivos para operar la red con niveles de tensión aceptables, se desarrolla el caso de estudio de Pucallpa y también el caso de estudio de la implementación de un sistema de compensación en líneas muy largas con baja inercia y contribución al corriente de corto circuito como la línea de transmisión futura que alimentará a Iquitos. Basado en el primer caso de estudio, actualmente, en máxima demanda, el sistema de transmisión Aguaytía - Pucallpa 138kV se encuentra operando al límite

de su capacidad de transporte, con una tensión en Aguaytía igual a la máxima tensión de operación de los equipos, y sin capacidad de regular tensión con los transformadores que operan con carga en su conmutador en Aguaytía y Pucallpa para mantener la tensión en Pucallpa dentro de los límites operativos. En estas condiciones de operación el subsistema Pucallpa opera con una baja confiabilidad y calidad del suministro. Esta situación se agrava más ante la indisponibilidad de la termoeléctrica de Aguaytía.

El artículo propone como alternativa de solución para la compensación reactiva de Pucallpa, la utilización de un Reactor Magnéticamente Controlado (MCR) con capacitores, y analiza su desempeño conjuntamente con el del Compensador Estático de Tensión (SVC). El subsistema eléctrico de Pucallpa se caracteriza por su configuración radial y débil (baja potencia de cortocircuito); este último aspecto se vuelve crítico para un adecuado desempeño dinámico de los SVC [24]. En los escenarios de simulación se verificó una respuesta adecuada de ambas tecnologías con relación a la rapidez, exactitud y estabilidad las cuales deberán ser validadas a través de estudios adicionales, conforme se recomienda en la literatura especializada.

El estado peruano identificó la necesidad de implementar una compensación reactiva capacitiva de 20Mvar en la barra de Pucallpa. Posteriormente, en el Plan de Transmisión del COES (PT-COES) 2013-2022 [27], se recomendó la implementación de un banco de capacitores (BC) de 20 Mvar en dicha barra.

Siguiendo el método científico para la investigación de nuevas tecnologías [17], aplicando el software PSCAD [18], se analizan como alternativas de solución para la compensación reactiva, en Pucallpa, considerado la utilización de un Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC) [16] y de un MCR con Capacitores [14]. Esta investigación en la sección 2, propone como caso de estudio, realizar un análisis comparativo de las principales alternativas de solución, en la sección 3 se presenta los resultados y discusión en sección 4.

## II. PROCESO DE SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

### A. Resumen Histórico en la Compensación Reactiva Paralela

A finales del siglo 19 se inician los estudios para la transmisión en corriente alterna en reemplazo de los pequeños sistemas eléctricos de distribución en corriente directa o DC (Direct Current) [1] la necesidad de transportar

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, e-mail: (see <https://site.ieee.org/peru-pes/ricardoarias/>).

Universidad de Ingeniería y Tecnología.

Manuscript received december 30th, 2019; revised January 2020.

energía eléctrica en corriente alterna a largas distancia presentó nuevos problemas tales como el control de la tensión y la estabilidad de tensión provocados por los desbalances de potencia reactiva en los sistemas eléctricos, entonces para solucionar los problemas de estado estacionario se empiezan a utilizar las compensaciones de potencia reactiva conmutada (capacitores en shunt, reactores en derivación) y los problemas dinámicos fueron solucionados a mediados de los años 1960 con equipos de compensación basados en máquinas rotativas, como por ejemplo los compensadores síncronos, también se tiene reactores DC controlados por bombillas de vapor de mercurio y otros equipos controlados por tiristores [2], de estos equipos podemos mencionar al Capacitor Conmutado por Tiristores (TSC) y al Reactor Controlado por Tiristores (TCR) con estos equipos se mejoró el tiempo de respuesta [3].

La evaluación de las pérdidas y la necesidad de controlar la tensión en las barras con requerimientos de potencia reactiva capacitiva en algún momento de la operación y en otro con potencia reactiva inductiva produjo como resultado El “Static Var Compensator” (SVC) que son construidos por la combinación del “Thyristor Controlled Reactor” (TCR) y de los “Thyristor Switch Capacitors” (TSC) y Filtros de Capacitores [24], estos equipos de conexión shunt y los TCSC (Capacitor Serie Controlado por Tiristores) proporcionan la base de los FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna) [20]. El desarrollo de los FACTS, permiten el uso más eficiente de los sistemas eléctricos y mejoran el control dinámico de las tensiones, por otro lado, también permiten mayores transmisiones de potencia activa, en la actualidad se tiene instalado 100 GVA de potencia como SVC en corriente alterna [4]. De otra parte, nuevos dispositivos electrónicos fueron introducidos en los FACTS, tales como los GTO, IGCT y IGBT para el uso de fuentes convertidoras tales como los VSC y de esta manera proveer de forma rápida de potencia reactiva al SEP [5], el desarrollo de los semi conductores hoy en día ha permitido equipos de mayor rapidez de respuesta en los SEP y proporcionan la estabilización del sistema en corriente alterna [6]. De otra parte, en Rusia en el año de 1991 por primera vez se publican estudios acerca de prototipos del Reactor Controlado Magnéticamente (MCR) [2], en estas publicaciones se describe su performance, sus aplicaciones y su experiencia en la industria. En 1996 la producción de reactores magnéticamente controlables de 6 a 35kV estuvo a cargo de “Energiya Ramensk Electric-Engineering Plant”, con alto desempeño en condiciones de emergencias y contingencias [6]. Desde 1998, El “AH-Russian Electrical Engineering Institute”, “Elektricheskije Upravlyayemye Reaktory Joint Stock Company” y La “Energiya Ramensk Electric-Engineering Plant”, tienen a su cargo la producción de reactores, en redes de 110-500 kV [7]. Se destacan los siguientes proyectos internacionales:

- En 1999 se instala un MCR de 25 MVA en 110 kV en la subestación Permenergo Kudymkar (Rusia) [9].
- 2001 se construye un MCR de 100 MVA 220 kV para la subestación de Siberian Chita (Rusia) [10].
- 2002 se construye un MCR de 180 MVA 500 kV para la

subestación de Belenergo Baranovichi (Rusia) [10].

Los reactores anteriormente mencionados en general contribuyeron a reducir las pérdidas y son muy útiles en la operación y restauración de sistemas de potencia [31]. Hasta el 2014 se tenía instalados en el mundo [2] 4000 MVar de equipos instalados, principalmente en países de la federación Rusa.

### B. Diseño del MCR

Una forma de explicar al MCR, el reactor es esencialmente un transformador de dos devanados con un devanado primario conectado al SEP y el otro devanado secundario llamado de control [8]. Para modelos trifásicos cada fase genera su propio flujo magnético a la frecuencia industrial, el flujo magnético producido por la corriente alterna en la región de saturación es modificada por el flujo DC, por lo tanto, se modifica la inductancia total equivalente del reactor [9].

### C. Característica de Saturación del MCR

El núcleo magnético del MCR está hecho del acero tradicional, de los transformadores y posee una característica de amplificación magnética [11]. En la zona de alta permeabilidad del acero, una pequeña variación de la corriente  $\Delta I_1$  en el bobinado está asociada a una amplia variación del flujo  $\Delta W_1$  en el núcleo magnético [11]. En la zona de saturación del acero una pequeña variación del flujo  $\Delta W_2$  está asociada a una variación amplia del flujo  $\Delta I_2$  en el bobinado, este efecto de amplificación magnética permite ajustar la corriente del reactor con un dispositivo de relativamente bajo potencial, tal como se ilustra en la Fig. 1.

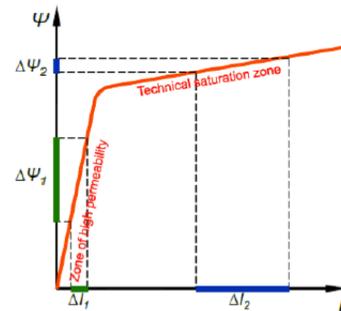


Fig. 1. Saturación del MCR

### D. Diagrama Funcional del MCR

La Fig. 2 muestra la corriente en el bobinado primario, bobinado secundario, tensiones en el bobinado primario, flujos magnéticos del sistema magnético, la corriente en el bobinado primario se incrementa según la variación de corriente del bobinado de control, también se observa que la corriente en el incrementa a niveles de sobrecarga la corriente de control se linealiza y los flujos magnéticos disminuyen.

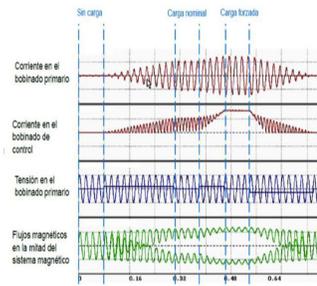


Fig. 2. Corriente, tensión y flujo magnético del MCR

### E. Representación del Modelo del Circuito Magnético

Las relaciones de tensión y corriente para el circuito mostrado en la Fig. 3, se detalla en la tensión de control de la ecuación (1):

$$U_c = U_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

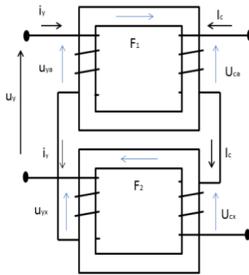


Fig. 3. Representación magnética de un MCR [12]

La tensión aplicada en borne primario del reactor estará dada por la suma de las tensiones de las tensiones de los devanados primarios de la ecuación (2):

$$U_c = U_{ca} + U_{cx} \quad (2)$$

Mientras que la tensión aplicada en bornes del circuito de control estará dada por la suma de las tensiones de la ecuación (3):

$$U_y = U_{ya} + U_{yx} \quad (3)$$

Asimismo, la corriente de excitación en bornes del reactor se muestra en las ecuaciones (4) y (5):

$$I_c = I_{ca} + I_{cx} \quad (4)$$

$$I_y = I_{ya} + I_{yx} \quad (5)$$

La densidad de campo magnético, de acuerdo al circuito magnético mostrado en la Fig. 3, representa un reactor controlado magnéticamente, es representado en  $a$  por la ecuación (6) y  $x$  por la ecuación (7), de acuerdo a la referencia [12].

$$B_{pa} = \mu_o \frac{i_{ca} * w_c}{h} \quad (6)$$

$$B_{px} = \mu_o \frac{i_{cx} * w_y}{h} \quad (7)$$

Entonces la densidad en el lado primario empleando las formulas (7) y (8) [15], determinan la densidad en la ecuación (8):

$$B_p = \mu_o \frac{i_c * w}{h} = B_a = B_{px} \quad (8)$$

Los flujos magnéticos estarán dados por la ecuación 9, brindando las correspondencias del flujo magnético en la ecuación (10) y (11):

$$\phi_{pa} = B_{pa} S_p = B_p S_p = \phi_{px} = \phi_p \quad (9)$$

En cada circuito magnético debe cumplirse que:

$$\phi_{pa} = \phi_{pa} + \phi_p \quad (10)$$

$$\phi_{cx} = \phi_{yx} + \phi_p \quad (11)$$

Basado en la ecuación (9), se aplica las relaciones del circuito magnético en las ecuaciones de tensión (2) y (3) obteniendo la tensión equivalente en (12), entonces la tensión del borne a es:

$$U_{ca} = w \frac{\delta \phi_{ca}}{\delta t} = w \frac{\delta \phi_{ya}}{\delta t} \quad (12)$$

### F. Desarrollo del Modelo Dinámico

En la Fig. 4, se muestra el diagrama de bloques del modelamiento dinámico del MCR para el control automático de la tensión en barras del SEP [13], para el sistema de control se toma en consideración:

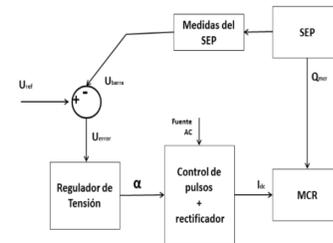


Fig. 4. Diagramas de bloques del MCR aplicado a sistemas de potencia

### G. Representación del Modelo del MCR a Tres Fases

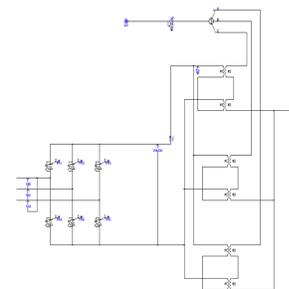


Fig. 5. MCR de prueba a tres fases con rectificador

Por tanto, para emplear la representación de la ecuación (12), en el sistema de control de la Fig. 4, se debe realizar la representación trifásica, como se desarrolla en la Fig. 5, en la cual se muestra de manera trifásica la representación

del MCR que presentó en la Fig. 3 y que posteriormente se utilizará para simulaciones en SEP [14]. La Fig. 6, muestra el modelamiento dinámico del sistema de control implementado en PSCAD, se resalta la tensión de referencia, tensión de la barra y el ángulo de disparo de los tiristores en el circuito de rectificación [33].

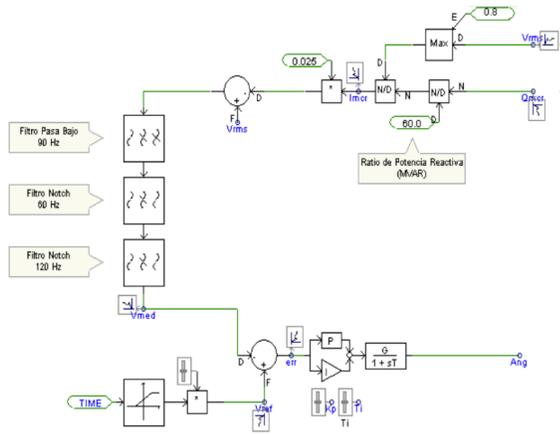


Fig. 6. Modelo dinámico del MCR

La Fig. 6, muestra el modelamiento dinámico del sistema de control implementado en PSCAD, se resalta la tensión de referencia, tensión de la barra y el ángulo de disparo de los tiristores en el circuito de rectificación.

### III. RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIOS

#### A. Comportamiento de la Red sin MCR

En este caso la barra A de la Fig. 7 tiene una tensión de operación de 231 kV, el sistema de potencia está formado por líneas de transmisión de 220 kV con una longitud de 90 km, para atender la carga de la barra A se tiene doble suministro con dos líneas que se conectan a la barra antes mencionada por confiabilidad, sin embargo, provoca una elevada tensión que necesita compensación.

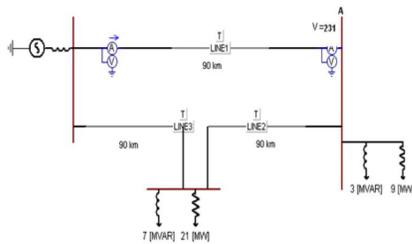


Fig. 7. Comportamiento de la red sin compensación

En la Fig. 7 se muestra el sistema de prueba donde se conectará el MCR, en las tablas I se muestran los parámetros para las simulaciones.

TABLE I  
PARAMETROS ELÉCTRICOS DE LAS LÍNEAS 1, 2 Y 3

Red de secuencia	R(Ohm)	X(Ohm)	G(Mhos)	B(Mhos)
Positiva	3.217	45.698	0.000009	0.00029441
Negativa	3.217	45.698	9.0	0
Cero	32.683	119.382	0.000009	0.00020904

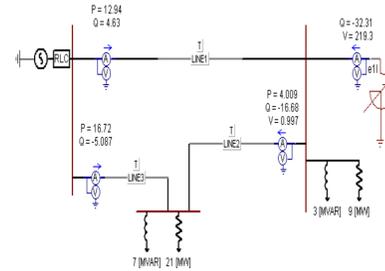


Fig. 8. Comportamiento de la red con compensación.

#### B. Comportamiento de la Red con MCR

En la Fig. 8, se realiza el modelamiento basado en la Fig. 5, empleando los criterios de control recomendados por CIGRE [16], basado en la configuración del software PSCAD [17], obteniendo un mejor control de tensiones de barras comparado con el sistema sin compensación, verificando los resultados en la Fig. 9.

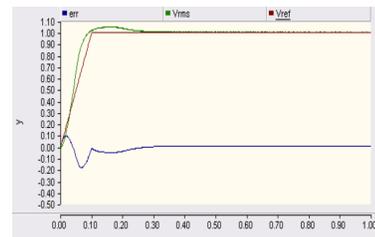


Fig. 9. Regulación de la tensión con el MCR.

En la Fig. 9, Vref es la tensión de referencia, Vrms tensión de la barra A, los valores graficados en la Fig. 9 son en pu. Vrms se regula 1 pu según la referencia, obteniendo una regulación apropiada para el sistema.

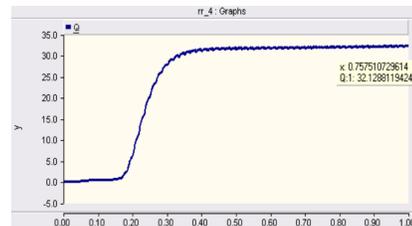


Fig. 10. Absorción de potencia reactiva.

En la Fig. 10, se observa que el sistema de control actúa en casi 150 ms, para regular la tensión de referencia a 1.0

pu, para lograrlo el reactor debe absorber 32 MVAR.

### C. Regulación de la Tensión en Falla

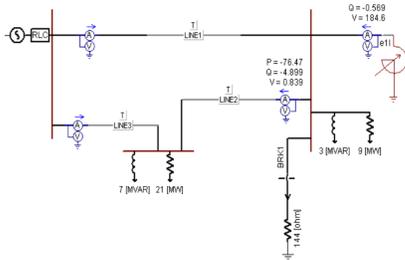


Fig. 11. Falla máxima, en barra de conexión del MCR.

Este caso se provoca una falla trifásica en la barra A donde se conecta el MCR en este escenario la falla se presenta a los 550 ms de simulación cuando el MCR tiene controlada la tensión de barra a 1.0 pu, se desea observar la respuesta dinámica y el valor de tensión al final de la simulación en la Fig. 11. En falla se puede observar que la tensión está estable inicialmente regula de 231 kV a 220 kV o 1.0 pu posteriormente a los 550 ms se presenta una falla trifásica en la barra, tal como se puede observar y la tensión inicia un proceso de caída hasta 184 kV. Referente a la señal de error de la tensión a los 100 ms tiene un comportamiento estable y cerca de cero para controlar la tensión cerca de 1.0 pu, sin embargo, a los 550 ms el error se incrementa debido a que la falla provoca una fuerte caída de tensión, por la potencia reactiva indicada en la Fig. 12.

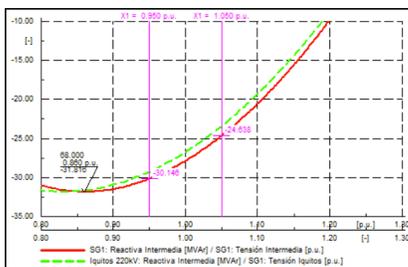


Fig. 12. Potencia reactiva que absorbe el MCR durante la falla.

La potencia reactiva en el MCR empieza a reducirse debido a que la tensión de la barra también baja debido a la falla y el sistema de control trata de sostener la tensión a una tensión de referencia de 1.0, sin embargo, dada la falla presentada en la barra, el requerimiento de potencia reactiva, disminuye a los 570 ms y por 20 ms la potencia reactiva se sostiene a 20 MVAR pero no es suficiente y la potencia reactiva sigue disminuyendo junto al proceso de caída de tensión provocado por la falla, finalmente la potencia reactiva que absorbe el MCR se hace cero dado que la falla no es despejada, en especial para fallas comunes como: Desconexiones de transformadores por falla intempestiva [29], descargas atmosféricas y las desconexiones de interruptores en líneas

de transmisión [21], [22], [32] o rupturas de conductores en líneas de transmisión de energía [23]. Una caída abrupta de tensión también la obtenemos si se realiza un puente en los elementos de compensación reactiva serie [20] o fallas en las compensaciones reactivas en paralelo [19], este último presenta también el fenómeno de tensión transitoria de restablecimiento la cual daña los interruptores de potencia [26], a causa del arco secundario o tiempo crítico de despeje de falla [27].

## IV. DISCUSIÓN

### A. Modelo Dinámico Aplicado al Sistema Interconectado Peruano

El modelo de MCR se construye en la herramienta DigSilent Power Factory y PSCAD [18]. Se trata de un modelo para simulación en el dominio del tiempo para las componentes a frecuencia fundamental (transitorios electromecánicos); cuya esencia consiste en representar el efecto paramétrico del cambio de la reactancia del MCR (saturación); a la fecha, esto solo ha sido modelado en software especializados para análisis de transitorios electromagnéticos (EMTP/ATP). Básicamente, el modelo censa la tensión a controlar y, con base en ella, efectúa control sobre el número de bancos reactores fijos a conectar o desconectar, con lo cual se logra representar la variación de la reactancia de un dispositivo MCR. El modelo debe ser ajustado con base en los valores de reactancia que puede asumir el MCR en la región no saturada (condiciones de operación normal - CON) y en la región saturada (condiciones de operación de contingencia - COC). Siendo que el DPF no permite modificar la reactancia de una compensación fija en tiempo de simulación, es necesario entonces fraccionar (teóricamente) la compensación en varias etapas, y controlar la reactancia a través del número de bancos en servicio. La 3 muestra os parámetros de control del modelo en DPF desarrollado para el MCR.

El primer bloque realiza monitoreo de la tensión a controlar, en tanto que el segundo controla la cantidad de reactores a conectar [15], con base en la curva de saturación del MCR que se quiera representar. Aunque los cambios de estado (conexión/desconexión de reactancia) pueden ser rápidos, en el modelo se definieron como parámetros configurables de entrada un retardo para la conexión de reactores (en la región saturada) y 60 ms para la desconexión de reactores (en la región no saturada). Se espera que las tecnologías de reactores saturables permitan obtener tiempos por debajo de dos ciclos sin necesidad de un devanado para control de la característica de saturación. Con el uso de dispositivos MCR, es posible lograr las ventajas de un reactor controlado de manera continua, con menores costos de inversión y mantenimiento.

En este trabajo se desarrolla un modelo dinámico para la simulación del comportamiento de un MCR, que permita, en casos específicos, verificar su eficacia en la solución a problemas de la red con estos dispositivos.

Como parte de la aplicación del modelo, se requiere una metodología para estimar los valores de reactancia en

las regiones saturadas y no saturadas, la cual se ilustra a continuación con un ejemplo. Se ilustra en la Fig. ??, una aplicación de MCR al proyecto Moyobamba-Iquitos a 220 kV de 630 km, mediante simulación con el modelo dinámico desarrollado y toda la base de datos del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional peruano (SEIN), el cual corresponde a un proyecto de interconexión de la región de Iquitos al SEIN, que tiene una demanda de 54 MW y 21 MVar. Inicialmente, el consumo en la subestación Intermedia 220 kV será de servicios auxiliares (450 kW). La Tabla II, muestra los parámetros eléctricos de las líneas que conforman esta interconexión.

TABLE II  
PARÁMETRO PARA EL CASO DE ESTUDIO

Parámetro	Valor
Tensión	220 kV
R1	0.0341 Ω/km
X1	0.261 Ω/km
R0	0.3409 Ω/km
X0	1.2021 Ω/km
B1	3.0906 μS/km
B0	3.0906 μS/km
Capacidad	1.18 kA/449MVA
Longitud del tramo 1	429 km
Longitud del tramo 2	201 km

En el proyecto original presentado por el Ministerio de Minas y Energía del Perú (MINEN) [27], la conexión consta de dos tramos de línea, Moyobamba-Intermedia 429 km) e Intermedia- Iquitos (201 km), incluye: un SVC en Iquitos de 50 MVar, un reactor de línea de 40 MVar en Moyobamba e Iquitos, un reactor de línea de 50 MVar en Intermedia. Dado que la barra de Iquitos 220 kV tiene niveles de cortocircuito bajos (0,89 kA, 339 MVA), el proyecto incluye la instalación de un compensador síncrono de 25 MVar en Iquitos, con una unidad idéntica de respaldo.



Fig. 13. Caso de estudio aplicando MCR

En la Fig. 13, se verifica el cumplimiento del criterio de desempeño:

- Mantener las tensiones en CON entre 0,95 p.u. y 1,05 p.u. con la evaluación de las curvas de compensación VQ, para mantener los niveles de tensión de acuerdo a la estrategia de compensación reactiva requerida para la barra en estudio.
- Mantener las tensiones por efecto Ferranti por debajo de 1,10 p.u., en el extremo de línea abierto, como se muestra en la Fig. 15.

Es necesario definir dos valores de reactancias para operación del MCR, uno en CON (región no saturada), y otro para compensar el efecto Ferranti (región saturada). Con este propósito se realizaron análisis de estabilidad de

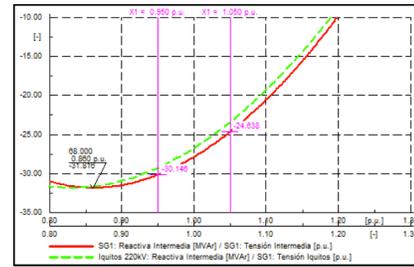


Fig. 14. Curvas VQ en SE Intermedia a plena carga

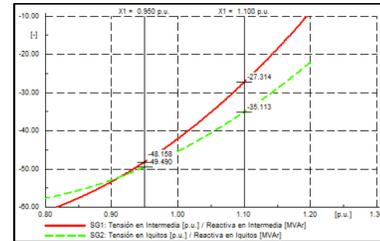


Fig. 15. Curvas VQ considerando efecto Ferranti

tensión, mediante curvas VQ, Fig. 13, considerando el SEIN en condiciones de demanda mínima. Este procedimiento se inició construyendo la curva VQ para el tramo Moyobamba-Intermedia 220 kV, en la Fig. 15, con en el extremo Intermedia abierto, con el fin de obtener el tamaño del reactor de Intermedia 220 kV, que evite que la tensión por efecto Ferranti supere 1,10 p.u. Este caso corresponde a la curva continua de la Fig. 5, la cual muestra que el tamaño del reactor asociado a la línea Moyobamba- Intermedia debe absorber 27,31 MVar a una tensión de 1,10 p.u., lo cual corresponde a un reactor de 22,57 MVar a tensión nominal.

Considerando esta compensación en la línea Moyobamba-Intermedia, en la Fig. 15, se muestra el tamaño del reactor asociado para absorber 35,11 MVar a una tensión de 1,10 p.u., lo cual corresponde a un reactor de 29,02 MVar a tensión nominal, como se muestra en la Fig. 14.

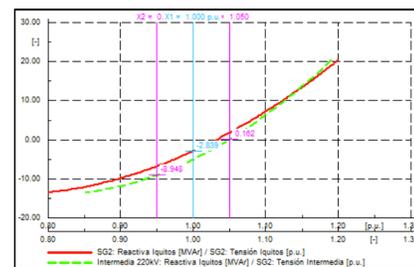


Fig. 16. Curvas VQ en SE Iquitos a plena carga con el reactor fijo en intermedia

En la Fig. 16, se construye la curva VQ en Intermedia con ambos tramos de línea, sin compensaciones y alimentando la carga de Iquitos. La Fig. 14 muestra esta curva para la tensión en Intermedia (línea continua) e Iquitos (línea discontinua).

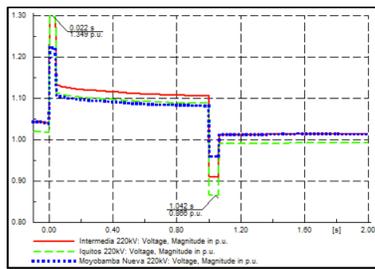


Fig. 17. Tensiones en p.u.

Se observa que para evitar tensiones en CON superiores a 1,05 p.u., se requiere una compensación inductiva de 26,64 MVAR en Intermedia (22,35 MVAR a tensión nominal), y este límite lo impone la tensión en Iquitos. Siendo que este valor es cercano al tamaño de la compensación requerida por efecto Ferranti en Intermedia, se encuentra conveniente instalar en Intermedia un reactor de línea fijo de 22,57 MVAR, en lugar de un MCR.

La Fig. 16 muestra esta curva para la tensión en Iquitos (línea continua) e Intermedia (línea discontinua). Se observa que lograr una tensión de 1,00 p.u. en Iquitos en CON, se requiere una compensación inductiva de 2,84 MVAR en Iquitos. Es importante mencionar, que en la Fig. 8 se aprecia un mayor margen de seguridad con respecto al mostrado en la Fig. 14. En resumen, todo el análisis anterior nos lleva a utilizar los siguientes equipos de compensación:

- Un reactor de fijo de 22,57 MVAR para la línea Moyobamba-Intermedia en Intermedia 220 kV.
- Una compensación para la línea Intermedia-Iquitos en Iquitos 220 kV, a través de un MCR que permita compensar entre 3 MVAR y 30 MVAR.

Con la compensación definida, se realiza una simulación de estabilidad dinámica empleando el modelo desarrollado para el MCR en Iquitos 220 kV, representando las siguientes hipótesis de falla:

- En  $t=0$ , se produce un rechazo de toda la carga en Iquitos.
- En  $t=1$  s, se realiza la reconexión de toda la carga en Iquitos.

En las condiciones pre-falla, se consideran los 22,5 MVAR conectados en Intermedia y 3 MVAR del MCR en Iquitos. La Fig. 20, muestra el comportamiento de las tensiones en las tres subestaciones de la interconexión, en tanto que, la Fig. 17, muestra la potencia reactiva en el MCR de Iquitos. Se aprecia que la mayor sobretensión por desconexión de la carga de Iquitos tiene lugar en Iquitos y es del orden de 1,35 p.u. Este valor supera el umbral de saturación del MCR, ocasionando que este disminuya su reactancia, incrementando así la potencia reactiva compensada a 37 MVAR y disminuyendo la tensión en toda la línea alrededor de 1,10 p.u. Posteriormente, la reconexión de la carga de Iquitos al cabo de un segundo, ocasiona que la tensión en Iquitos descienda a 0,87 p.u. Con esta información, se valida que la matemática desarrollada de forma teórica y resultados del modelamiento en ATP.

## V. CONCLUSIÓN

Un MCR es un reactor saturable efectivo para el control de tensión, con muy buenas características de confiabilidad y robustez, por su sencillez. Este trabajo expone una metodología para dimensionar una aplicación de MCR para subestaciones baja relación entre el cortocircuito y la potencia del sistema aplicado al proyecto de compensación flexible de la SE Pucallpa, así como la aplicación a líneas largas, la cual se aplicó al proyecto Moyobamba-Iquitos 220 kV de 630 km. Para verificar la eficiencia de esta solución con MCR, se desarrolló un modelo dinámico en DPF, que permitió comprobar que se logran los objetivos de interconexión, con menores costos de inversión y menores necesidades de mantenimiento, lo cual resulta relevante para un proyecto como Moyobamba-Iquitos 220 kV, en el que las subestaciones están alejadas y serían de difícil acceso por su entorno selvático. A futuro, el modelo dinámico desarrollado podría ser complementado para considerar el uso de devanado auxiliar, y ampliar el rango de control con posibilidades similares a las de un SVC, sólo que controlado magnéticamente. Particularmente en Perú, se ha encontrado que los reactores de línea maniobrables con interruptores mecánicos, presentan un significativo desgaste en los interruptores [26], por lo cual el personal de mantenimiento ha sugerido no replicar este diseño en nuevos equipos de compensación de línea. Un MCR como equipo de compensación de línea, sería una alternativa de solución a esta problemática.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to "Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa" and "Universidad de Ingeniería y Tecnología", for the knowledge contribution.

## REFERENCES

- [1] N. HINGORANI, L. GYUGYI, Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, New York, NY, 2000.
- [2] BHARAT HEAVY, Electrical Limited, Transformer, McGraw Hill, Bhopal 2005.
- [3] S.V.N.JITHIN SUNDAR et all, Design, Testing and Commissioning of First 420 kV, 50 MVAR Controlled Shunt Reactor In India, CIGRE Session 2002.
- [4] RUA A., CALDERON J., LUQUE D., Afectación de la vida Útil de los Interruptores de los Reactores de Línea por Apertura de Pequeñas Corrientes Inductivas, Jornadas Técnicas de ISA 2015.
- [5] XIANGZHENG XU, "The status and development of magnetically controlled reactor," Test and Measurement, 2009. ICTM '09. International Conference, vol.2, no., pp.375,377, 5-6 Dec. 2009.
- [6] ZHUHAI WALINDA ELECTRI CO, Static Var Compensator MCR Type.
- [7] SKRM, e DARVALI, NTRODUÇÃO AO SISTEMA MCR, Noviembre de 2012.
- [8] ZTR TRANSFORMER, Magnetically Controlled Shunt Reactors. Brochure 2014.
- [9] DlgSILENT Power Factory, version 15 User´s Guide.
- [10] Historical overview on dynamic reactive power compensation solutions from the begin of AC power transmission towards present applications, Heinz K. Tyll, IEEE, March 02, 2010.
- [11] Magnetically Controllable Reactor, ZTR, ZAPOROZHTRANSFORMATOR, 2001.
- [12] Magnetic Amplifiers Theory and Application, Michigan University, Sidney Platt, 1958.

- [13] Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation, IEEE Special Stability Controls Working Group, February 1994.
- [14] Magnetically Controlled Reactors Enhance Transmission Capability & Save Energy– Especially in Compact Increased Surge Impedance Loading Power Lines, Alexander M. Bryantsev, Moscow Power Institute, 2008.
- [15] Research on DC Magnetics Flux Controllable Kuo Bau Kuan Harbin of Institute technology, China, 2010.
- [16] Modeling of power electronics equipment's (Facts) in load flow and stability programs, CIGRE, 1999.
- [17] Metodología de la Investigación, Raul Pino Gotuzzo, Editorial San Marcos, 1995
- [18] Guide applications of PSCAD/EMTDC. Manitoba HVDC Research Centre Inc, 2008.
- [19] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara. Life estimation of shunt reactors considering a failure core heating by floating potentials. *Engineering Failure Analysis*. 86 (2018) 4, 142 - 157.
- [20] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara. Reliability, availability and maintainability study for failure analysis in series capacitor bank. *Engineering Failure Analysis*. 86 (2018) 4, 158 -167.
- [21] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara. The need of creating a new nominal creepage distance in accordance with heaviest pollution 500 kV overhead line insulations. *Engineering Failure Analysis*. 86 (2018) 4, 21 - 32.
- [22] R.M. Arias Velásquez, J.V. Mejía Lara. Electrical assessment by lightning phenomenon in power lines of double circuit. *IEEE Latin American transactions*. 14 (2015) 5, 2217 – 2225.
- [23] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara, Ruptures in overhead ground wire – Transmission line 220 kV. *Engineering Failure Analysis*. 87 (2018) 1 - 14.
- [24] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara. Snubber resistor influence in thyristor valves failure on the static VAR compensator. *Engineering Failure Analysis*. 89 (2018) 150 - 176.
- [25] R. M. A. Velásquez and J. V. M. Lara, "Implementation of knowledge management in energy companies," 2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Cusco, 2017, pp. 1-4.
- [26] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara. Circuit breaker 500 kV degradation in substation reactors caused by inductive current. *Engineering Failure Analysis*, In press. (2018) 1 – 24.
- [27] COES. Plan de transmisión de Perú (PT COES). 2013 - 2022.
- [28] R. M. Arias Velásquez, J. V. Mejía Lara, Secondary arc and critical time of fault clearance in overhead lines. *IEEE Latin America Transactions*. 16 (2018) 3, 859 - 868.
- [29] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejia Lara, Corrosive Sulphur effect in power and distribution transformers failure and treatments. *Engineering Failure Analysis*. 92 (2018) 240-267.
- [30] P. Wang, J. Zou, X. Mia, Stability analysis of magnetically controlled reactor for reactive power compensation based on Small-signal model. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 65 (2018) 11, 8585-8594.
- [31] X. Chen, B. Wang, Optimal design and modeling of the multi-stage saturable magnetically controlled reactor, 2017 Progress in electromagnetics research symposium – springs. (2017) 76-81.
- [32] N. Mbuli, L. Mashego, S. Nkosi, J. Pretorius, Impact of circuit-breaker maintenance on life-cycle cost comparison for fixed and magnetically controlled reactors, (2015) 1-5.
- [33] S. Zhao, Z. Yin, L. Peng, Research of magnetically controlled reactor simulation model and its experiments, 1 (2012) 476-479.
- [34] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Harmonic failure in the filter of Static Var Compensator, *Engineering Failure Analysis*, Volume 107, January 2020, Article 104207.
- [35] M. Asghar Khan ; Tao Zheng ; Liu Xiaoxiao, Turn-to-Turn Faults Analysis of an Extra-High Voltage Magnetically Controlled Shunt Reactor, 2019 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE), 2019, 4, 1-4.



**R.M.A. Velásquez** Es IEEE Senior member, doctor en ingeniería por la PUCP, maestría en ciencias con mención en Ingeniería de proyectos, segundo título profesional en Ingeniería de Proyectos e ingeniero electricista por la UNSA, investigador calificado por Renacyt nivel III, índice h-11. Ha laborado en las más grandes empresas de energía en 5 países: EEUU, Chile, Colombia, Brasil y Perú. Actualmente es especialista en eficiencia operacional de las más grandes centrales de generación renovable en Latinoamérica en ENEL, vice presidente de IEEE PES Perú 2018-2020, investigador para UTEC, MIT, UAP, UNSA, PUCP, con más de 28 publicaciones en ScienceDirect e IEEE, con aportes al diseño de los sistemas de potencia, mantenimiento, confiabilidad.



**J.V.M. Lara** IEEE Senior member, actualmente, es gerente de Proyectos de envergadura internacional, en el ámbito de las energías renovables. Es graduada en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Nacional de Colombia, Magister en Ciencias con mención en Ingeniería de Proyectos por la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) y actualmente se encuentra finalizando los estudios de doctorado en ingeniería en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Es IEEE senior member por sus aportes en proyectos de energía, minería y petróleo.



**C. Díaz** Actualmente, es asistente de investigación en Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC, como parte de los fondos de investigación MIT - UTEC. Es bachiller en Ingeniería de la Energía por UTEC. Ha sido reconocido por su investigación en dinámica de sistemas de potencia, miembro IEEE PES.