



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

IMPACTO DE LA COMPENSACION SERIE EN LINEAS DE DISTRIBUCIÓN

Antonia Samaniego ⁽¹⁾; Alejandro Carracela ⁽²⁾; Oscar M. Torres ⁽³⁾.

Facultad Politécnica- Universidad Nacional de Asunción/ ANDE

PARAGUAY

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del estudio de la compensación serie en las líneas de distribución de media tensión, que tienen por finalidad evaluar el comportamiento de un alimentador con esta configuración, ante las diferentes contingencias a las que estará sometido ya sean descarga atmosféricas, fallas en la línea, y sobretensiones. En este contexto, el trabajo presenta los aspectos relativos a este tipo de compensación, analizando para ello, la implementación de la compensación serie en líneas de distribución del Sistema ANDE, de manera a demostrar las ventajas técnicas, así también como las desventajas que derivan de su aplicación, para verificar la validez y utilidad de esta opción de compensación.

PALABRAS CLAVES

ATP, Capacitores, Compensación serie, Línea de Distribución.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de la demanda y los altos costos que representan las inversiones en nuevas sub-estaciones así como la ampliación de los circuitos de distribución de energía eléctrica mediante nuevos alimentadores, ha llevado al sistema a operar en condiciones críticas y en caso extremos hasta el colapso.

Este problema impone la necesidad de evaluar algunas de las opciones disponibles que permitan optimizar el desempeño del sistema eléctrico actual, entre ellas se encuentra la compensación reactiva por medio de banco de capacitores conectados en serie al alimentador.

La compensación serie es usualmente considerada una medida correctiva diseñada idealmente para líneas de transmisión de alta tensión. De hecho, la mayoría de las instalaciones de capacitores serie son de esta naturaleza. Sin embargo, la compensación serie también puede ser aplicada a líneas radiales de distribución.

La utilización de capacitores en serie provee significativos beneficios frente a ciertos tipos de problemas, uno de los más importantes es el incremento, instantáneo y continuo de voltaje, proporcional a la corriente que circula a través de la línea (es auto-regulable) que a su vez trae consigo las siguientes ventajas:

- Mejorar la regulación de voltaje.
- Aumentar de la transferencia de potencia.

2 CIRCUITO DE LA COMPENSACION CAPACITIVA SERIE

Un condensador serie que está presente en cualquier línea eléctrica (Figura 1) introduce una reactancia capacitiva (negativa), en serie con la reactancia inductiva (positiva) propia de la línea. Este capacitor reduce la impedancia equivalente que tiene una línea entre los terminales de envío y recepción. El condensador serie a través de su reactancia capacitiva actúa como un generador de reactivos que permite elevar el voltaje, de tal manera a compensar la caída de voltaje de la línea y en consecuencia, mejora la regulación de voltaje de la misma.

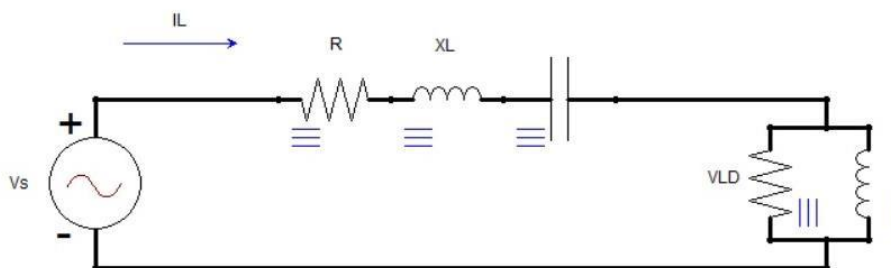


Figura 1 Sistema con Compensación Serie

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

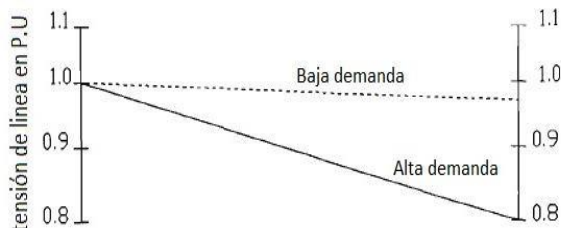


Figura 2: Sistema Sin Compensación

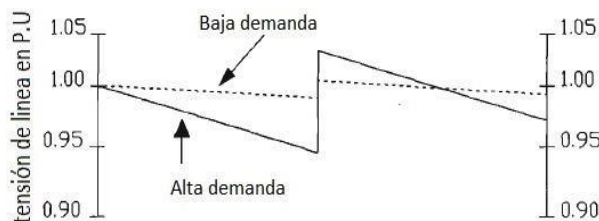


Figura 3: Sistema Compensado con Condensador Serie

La dimensión del capacitor serie depende de la corriente nominal de la línea y del valor óhmico necesario para alcanzar el voltaje deseado. Uno de los métodos para dimensionar el condensador es el presentado por Maxwell. Para la el circuito correspondiente a la Figura 1 puede escribirse la siguiente ecuación:

$$V_S = V_{LD} + [R + (X_L - X_C)] I_L \quad (1)$$

Donde:

- V_S = voltaje en el terminal de envío de la línea
- V_{LD} = voltaje en el terminal de recepción de la línea
- I_L = Corriente de línea
- R = Resistencia de la línea
- X_L = Reactancia inductiva de la línea
- X_C = Reactancia capacitiva del condensador serie.

De la Ecuación 1, se obtiene la ecuación para el dimensionamiento del condensador:

$$X_C = \frac{V_{LD} - V_S + I_L(R + jX_L)}{jI_L} \quad (2)$$

3 MODELADO DE LOS ELEMENTOS

Para una representación apropiada del alimentador en estudio, se modelan los principales elementos del sistema de distribución que tienen influencia en los fenómenos analizados, generador, líneas de distribución, cargas, elementos de compensación reactiva, descargadores de línea, etc.

Los generadores fueron modelados como fuentes Tipo 14 del ATP (fuentes senoidales), conectados al sistema mediante equivalentes R-L acoplados (elemento tipo 51).



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

La representación de las líneas de distribución fue realizada utilizando modelos equivalente - Pi con parámetros concentrados.

Por su parte, las cargas fueron modeladas a través de elementos R-L-C concentrados, mientras que los espinterómetros fueron modelados con interruptores de tensión y una resistencia conectada en serie, que simula la rigidez dieléctrica del aire

Los interruptores empleados en los estudios fueron interruptores ordinarios controlados por tiempo y tensión.

Por su parte, el compensador fue modelado como un elemento lineal capacitivo.

4 METODOLOGIA APLICADA

Para las simulaciones fue empleado el software ATP (Alternative Transient Program), considerando la configuración de un alimentador de 23 kV perteneciente a la red de distribución del Sistema Metropolitano, obteniendo así un modelo representativo para dicho alimentador.

De modo a contrastar o validar los resultados obtenidos con dicho software, fue realizado de forma complementaria, la verificación de los perfiles de tensión en régimen permanente, así como el flujo de potencia a través del alimentador en estudio utilizando el Programa CYMECYMDIST.

En relación a los elementos del sistema en servicio, fueron consideradas dos situaciones operativas:

- Sistema bajo condiciones normales de operación.
- Sistema ante la presencia de contingencias.

Así también, se realizaron los siguientes análisis:

- Compensación al inicio de la línea.
- Compensación en el punto donde la tensión de línea es inferior al valor límite establecido por Reglamento de la ANDE.
- Cortos de ubicación aleatoria a lo largo de la línea.
- Comportamiento ante una descarga atmosférica.

Estos análisis fueron realizados a efectos de verificar el comportamiento de la línea para todos los casos mencionados anteriormente.

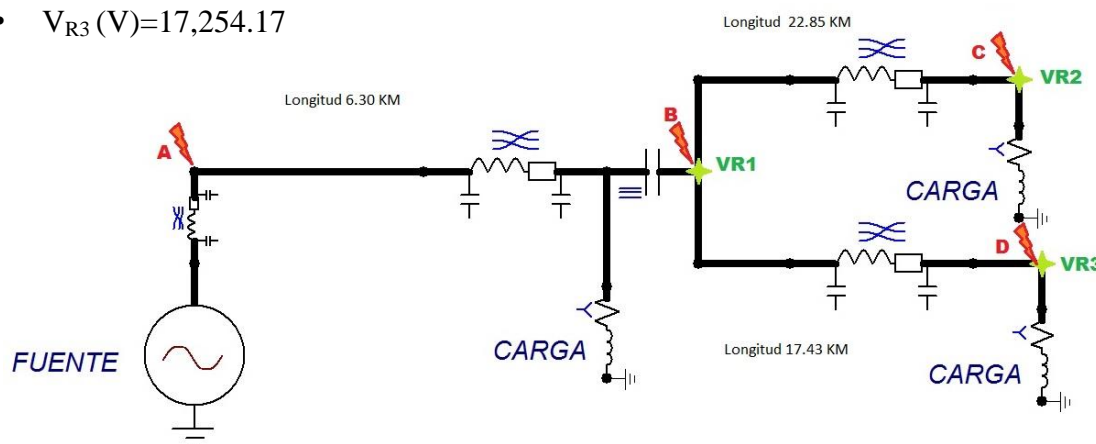
De igual manera, se verifica la energía disipada en los descargadores, en relación a la capacidad de los mismos.

5 CASO DE ESTUDIO

Se toma como base el alimentador SLO4, como este alimentador opera dentro de los límites establecidos por la ANDE, su longitud fue modificada con el fin de que el nivel de tensión sea inferior 0.95 P.U.

5.1 Condiciones iniciales

- Impedancia equivalente (Ω)=8.0301+j5.1337
- V_S (V)=23.000
- Demanda máxima (A)=312.4505 28.3134°
- Limite térmico (A)=396
- Potencia consumida (MVA)=12.45
- Tensión mínima (V)= 17,840.00
- Tensión máxima (V)= 19,718.39
- Tensiones sin compensar:
- V_{R1} (V)= 17,870.12
- V_{R2} (V)=16,746.53
- V_{R3} (V)=17,254.17



5.2 Análisis con compensación serie al inicio de la línea

Para este análisis, el banco de capacitores fue colocado inmediatamente después de la impedancia del generador, utilizando distintos valores de reactancia capacitiva, que van desde el 50% al 600% de la reactancia inductiva de la línea, evaluando los distintos resultados hasta encontrar un valor que se adecue a la norma.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

5.3 Análisis con Compensación en el punto donde la tensión de línea es inferior al valor límite establecido por Reglamento de la ANDE.

Primeramente se determina el punto en donde el nivel de tensión era inferior a 0.95 P.U.; una vez localizado, el banco de capacitores fue insertado en el lugar, utilizando distintos valores de reactancia capacitiva, que van desde el 50% al 600% de la reactancia inductiva de la línea, evaluando los distintos resultados hasta encontrar uno o más valores que se adecuen a la norma.

6 RESULTADOS

6.1 Energización

6.1.1 Análisis con compensación serie al inicio de la línea

De los resultados obtenidos se aprecia un aumento considerable en los niveles de tensión, obteniéndose como máximo 11.96% de aumento de voltaje, además la presencia del banco en el alimentador produce una disminución de la corriente de línea, esto se debe a la reducción de la potencia reactiva del sistema, que a su vez provoca un aumento de transferencia de potencia.

Porcentaje de compensación	DATOS DEL CONDENSADOR			VALORES MEDIDOS							
	Xc (Ω)	VC(V)	Q(Mvar)	S(MVA)	VE	VR1	VR2	VR3	AUMENTO DE VOLTAJE (%)	CORRIENTE FINAL	AUMENTO DE POTENCIA
50	2.5669	779.93	0.24	12.80	18,752.98	18,362.35	17,207.81	17,729.44	2.68	303.85	0.35
100	5.1337	1518.47	0.45	13.14	19,223.72	18,823.28	17,639.76	18,174.47	5.06	295.79	0.69
150	7.7006	2221.46	0.64	13.45	19,650.64	19,241.31	18,031.50	18,574.10	7.13	288.48	1.00
200	10.2674	2842.12	0.79	13.72	19,921.95	19,605.86	18,373.13	18,930.08	8.85	276.81	1.27
250	12.8343	3504.87	0.96	13.95	20,425.70	19,997.39	18,651.02	19,216.40	10.21	273.09	1.50
300	15.4011	4169.80	1.13	14.13	20,549.70	20,121.70	18,856.56	19,428.16	11.19	270.75	1.68
350	17.9680	4851.42	1.31	14.26	20,686.49	20,255.48	18,981.90	17,557.33	11.78	270.00	1.81
400	20.5348	5563.36	1.51	14.32	20,790.26	20,298.44	19,022.16	19,598.79	11.96	270.92	1.87
450	23.1017	6526.84	1.84	14.31	20,679.54	20,248.81	18,975.66	19,550.87	11.75	282.53	1.86
600	30.8022	8702.58	2.46	13.91	19,988.27	19,581.65	18,350.44	18,906.70	8.74	282.53	1.46

Tabla 1: Compensación en el inicio de la línea

6.1.2 Análisis con compensación en el punto donde la tensión de línea es inferior al valor límite establecido por Reglamento de la ANDE.

A seguir, la Tabla 2 se observa la elevación de los niveles de tensión, obteniéndose como máximo 10.82% de crecimiento. También se constata la disminución de la corriente de línea, y por consiguiente el aumento de transferencia de potencia.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Porcentaje de compensación	DATOS DEL CONDENSADOR				VALORES MEDIDOS						
	Xc (Ω)	Vc(V)	Q(Mvar)	S(MVA)	VR1	VR2	VR3	AUMENTO DE VOLTAJE (%)	CORRIENTE FINAL	DIFERENCIA DE POTENCIA	
50	2.5669	429.98	0.07	12.55	18,130.46	16,990.50	17,505.54	1.44	310.03	0.10	
100	5.1337	872.27	0.15	12.64	18,382.23	17,226.44	17,748.43	2.79	307.76	0.19	
150	7.7006	1325.56	0.23	12.73	18,623.68	17,452.71	17,981.76	4.05	305.66	0.28	
200	10.2674	1789.26	0.31	12.81	18,853.90	17,668.51	18,204.10	5.22	303.73	0.36	
250	12.8343	2262.17	0.40	12.88	19,069.48	17,870.48	18,412.19	6.29	302.03	0.43	
300	15.4011	2743.03	0.49	12.95	19,269.15	18,057.60	18,604.98	7.26	300.57	0.50	
350	17.9680	3230.44	0.58	13.00	19,451.10	18,228.10	18,780.66	8.13	299.36	0.55	
400	20.5348	3722.71	0.67	13.04	19,613.61	18,380.40	18,937.57	8.89	298.44	0.59	
450	23.1017	4218.27	0.77	13.07	19,755.66	18,512.91	19,064.10	9.54	297.81	0.62	
600	30.8022	4278.88	0.79	13.09	19,884.50	18,778.68	19,347.93	10.82	297.83	0.64	

Tabla 2: Compensación en el punto de máxima caída de tensión

6.1.3 Ubicación ideal del banco

De modo a determinar la ubicación ideal del banco de capacitores, se analiza y compara los resultados obtenidos en las tablas precedentes. De esta manera se concluye que los valores de la Tabla 2, correspondientes a la compensación en el punto de máxima caída de tensión, satisfacen mejor las necesidades operativas del sistema. Con la configuración seleccionada, se realizan los estudios de corto circuito.

6.1.4 Corto circuitos

Para el estudio de corto circuito, fueron seleccionados aleatoriamente 4 puntos a lo largo de la línea, aplicándose dos tipos de falla, monofásicas a tierra y trifásicas. Para el dimensionamiento de las protecciones queda seleccionado el peor de los casos.

PUNTOS DE CORTOCIRCUITO													
		A			B			C			D		
CORRIENTE NOMINAL (A)		441.8657			233.593			23.77			12.49		
SISTEMA ORIGINAL													
		ATP		CYMDIST		ATP		CYMDIST		ATP		CYMDIST	
		LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG
Icc en el punto (KA)		11.740	16.344	11.570	16.127	3.664	2.360	3.803	2.264	0.565	0.425	0.612	0.433
Icc EN LA LINEA (KA)		11.7404	16.344			3.6936	2.391	-	-	0.807	0.655	-	-
		SISTEMA COMPENSADO A LA MITAD DE LA LINEA CON 400%											
CORRIENTES DE CORTO (KA)													
		ATP		CYMDIST		ATP		CYMDIST		ATP		CYMDIST	
		LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG	LLL	LG
Nivel de tensión en el condensador (rms)		-	141.39	-	-	15,411.46	17,665.80	-	-	13,469.05	12,857.98	-	-
Icc en el punto (KA)		11.740	16.346	11.574	16.127	0.751	0.860	0.759	0.879	0.558	0.580	0.649	0.664
Icc EN EL CAPACITOR(KA)		0.000	0.003	-	-	0.751	0.860	-	-	0.666	0.718	-	-
Icc EN LA LINEA (KA)		11.740	16.346	-	-	0.6972	0.801	-	-	0.743	0.824	-	-

Tabla 3: Resultados obtenidos de las simulaciones de cortocircuito



7 CONCLUSIONES

Bajo las condiciones del presente estudio fue seleccionada como la mejor opción la compensación en el punto de máxima caída de tensión, puesto que es este punto, se puede tener un mejor aprovechamiento de los beneficios de la compensación en serie. El aumento de los niveles de tensión obtenidos, permiten que el sistema pueda operar con normalidad.

Durante las condiciones de falla se tienen elevadas tensiones; esto obliga a la implementación de espinterómetros para la protección del condensador.

La implementación de bancos de capacitores es aplicable en líneas largas de distribución, esto se debe a la caída de tensión aumenta a medida que la línea se hace más larga.

Del estudio se ha comprobado que el condensador en serie aumenta la transferencia de potencia de una línea elevando el grado de utilización de la capacidad permisible de la misma; por consiguiente, es recomendable realizar estudios de aplicación de compensación serie en otras líneas de distribución.



8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P.M. Anderson, R.G. Farmer, Series Compensation of Power Systems, PBLSH!, 1996.
- [2] IEEE, "Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems", Std 824, 2004.
- [3] Héctor Enrique Bustos López, "Condensadores en Serie en Líneas de Sub-Transmisión", Quito, Noviembre de 1986.