

LÍMITES DE TRANSMISIÓN EN LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA

LIMITS OF TRANSMISSION IN LINES OF ALTERNATE CURRENT

AUTORES: **Ezequiel A. Granada**
Schneider Electric Arg. S.A.
Gonzalo H. Pessolano
Ford Arg. S.A.
Santiago A. Piva
Argencobra S.A.

ABSTRACT

El presente estudio tiene por objeto analizar las restricciones en la transmisión de potencia de líneas en corriente alterna de alta tensión. El trabajo evalúa la limitación en distancia, como así también las restricciones técnicas y económicas las cuales se ven estrechamente ligadas a los fenómenos de caída de tensión, pérdidas, calentamiento, pérdidas de estabilidad y efecto Ferranti.

La potencia transferible en un sistema de corriente alterna puede ser presentada como una función directamente proporcional al cuadrado de la tensión e inversamente proporcional a la longitud. Por lo tanto, la transmisión de potencias elevadas a grandes distancias, implicaría aumentar el nivel de tensión o reducir la longitud de la línea.

Tomando en cuenta los niveles de tensión utilizados en transmisión evaluaremos las posibilidades de optimización y maximización de la capacidad de transmisión, analizando especialmente los distintos métodos de variación artificial de la longitud eléctrica de la línea.

Como resultado, el trabajo plantea una metodología simplificada para obtener la capacidad de transmisión y crea una matriz de potencias, tensiones y longitudes.

Análisis más complejos requerirían el uso de simulaciones de transitorios que no han sido empleados en este trabajo.

1.0 INTRODUCCIÓN

La transmisión de potencia en corriente alterna, posee límites tanto técnicos como económicos ligados a los fenómenos de caída de tensión, pérdidas, calentamiento, pérdida de estabilidad y efecto Ferranti.

En particular, se evita la transmisión de potencia reactiva a grandes distancias, puesto que supone mayores caídas de tensión en la línea, lo que dificulta la regulación de tensión. Además origina mayores pérdidas en las líneas debido a corrientes más altas.

La compensación de las líneas de transmisión es un método muy eficiente y económico para mejorar la capacidad de transmisión de energía de un sistema de potencia, y en el caso de sistemas de transmisión nuevos, la compensación permite un diseño con menor cantidad de líneas.

Es posible, mediante un método simplificado, evitando métodos de análisis de régimen transitorio, determinar los límites de transmisión con y sin compensación.

La energía transmitida a través de una línea es proporcional al cuadrado de la tensión e inversamente proporcional a su longitud:

$$P = f \left(\frac{U^2}{long} \right)$$

Se concluye que transmitir grandes cantidades de energías a grandes distancias, implica la utilización de altas tensiones.

2.0. PARÁMETROS DE LA LÍNEA

Una línea de alta tensión puede ser modelada con su inductancia serie y capacidad en derivación. Las líneas de alta tensión generan y consumen potencia reactiva. Como la carga de una línea puede fluctuar hora a hora, las variaciones en el equilibrio de la potencia de la línea son importantes. Un parámetro de referencia es la potencia natural de la línea (P_n),

$$P_n [\text{MW}] = \frac{U_n^2 [\text{kV}]}{Z_c [\Omega]}$$

Donde U_n es la tensión nominal y Z_c es la impedancia natural o característica de la línea que depende de la configuración geométrica y es independiente de la longitud. Su valor oscila entre 250 y 400 Ω .

Tabulando valores asumiendo una $Z_c = 300 \Omega$ se obtiene el cuadro 2.1.

U_n [kV]	P_n [MW]
132	58
220	161
330	363
500	833
750	1.875

Cuadro 2.1.

Conceptualmente significa que cuando la línea está cargada con su potencia natural no consume ni genera reactivo. En consecuencia, constituye un régimen de operación preferencial de las líneas largas minimizando los flujos de reactivo.

La representación de las líneas de transmisión se realiza mediante sus parámetros unitarios, los cuales están distribuidos uniformemente a lo largo de la misma (Fig. 2.2.). Dichos parámetros son: su impedancia serie ($r + j x_s$) y su admitancia en paralelo ($g + j b_c$).

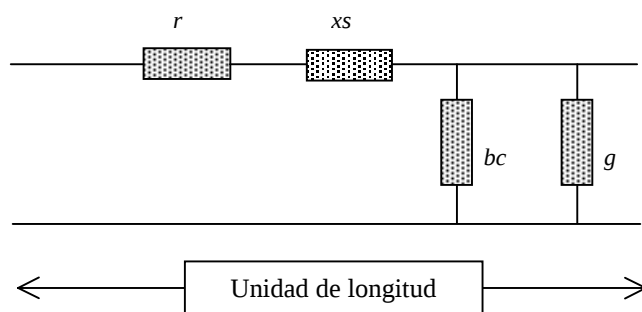


Fig. 2.2.

Debido al reducido valor de la perditancia (g), no será considerada en los modelos utilizados en este trabajo.

Como ejemplo, se muestra el desarrollo empleando para una línea de 500 kV y 1.000 km, con 4 subconductores por fase (Fig. 2.3.).

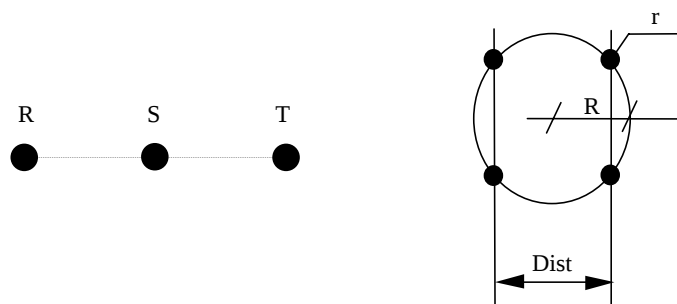


Fig. 2.3.

Las características adoptadas son las indicadas en el cuadro 2.4.

	Unidades	Inductivo	Capacitivo
Diámetro exterior	[m]	0,0245	0,0245
r	[m]	0,01225	0,01225
k	[-]	0,7788	1,0
r'	[m]	0,0095	0,01225
n	[-]	4	4
R	[m]	0,3182	0,3182
RMG	[m]	0,1873	0,1993
Dist	[m]	0,45	0,45
Distancia entre fases	[m]	12	12
Conductor	Al / Ac	300 / 50	300 / 50
Resist. Temp. Ejerc.	[Ω / km]	0,1083	0,1083
Resistencia lineal	[Ω / km]	0,0271	0,0271

Cuadro 2.4.

Siendo:

n = número de subconductores del haz

r = radio del subconductor

$Dist$ = distancia entre subconductores contiguos

Cálculo de la reactancia inductiva

$$Xl = 2 \times 10^{-4} \cdot \ln \left(\frac{1}{R} \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \text{ [Ω / km]}$$

En el cuadro 2.5. se muestra la matriz de reactancias inductivas.

	R	S	T
R	0,1053	-0,1561	-0,1997
S	-0,1561	0,1053	-0,1561
T	-0,1997	-0,1561	0,1053

Cuadro 2.5.

$Xp = 0,1053$ Reactacia Inductiva Propia (Ω / km)

$Xm = -0,1706$ Reactacia Inductiva Mutua (Ω / km)

$Xs = 0,2759$ Reactacia Inductiva de Servicio (Ω / km)

$Xs = Xp - Xm$

Cálculo de la Susceptancia Capacitiva

$$P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{1}{R}\right)$$

Donde:

P = Coeficientes de Potencial

$$[C_{o,d,i}] = [P_{o,d,i}]^{-1}$$

En el cuadro 2.6. se muestra la matriz de suceptancias capacitivas.

$P_p = 3,8120$ Coeficiente de Potencial Propio
 $P_m = -9,1381$ Coeficiente de Potencial Mutuo
 $C_s = 12,9501$ Reactacia Capacitiva de Servicio (10^{-9} F / km)

	R	S	T
R	2,790	-9,295	-8,823
S	-9,295	5,855	-9,295
T	-8,823	-9,295	2,790

Cuadro 2.6.

$B_p = 1,1976$ Susceptancia Capacitiva Propia (10^{-6} S / km)
 $B_m = -2,8708$ Susceptancia Capacitiva Mutua (10^{-6} S / km)
 $B_s = 4,0684$ Susceptancia Capacitiva de Servicio (10^{-6} S / km)
 $B_s = B_p - B_m$

Extendido a otras tensiones se obtienen los resultados indicados en el cuadro 2.7.

Un	[kV]	132	220	330	500	750
r	[m]	0,0095	0,0102	0,0110	0,0123	0,0125
n	[-]	1	2	3	4	4
R	[m]	0,3182	0,2250	0,2598	0,3182	0,3182
Conductor	Al / Ac	185 / 30	210 / 35	240 / 40	300 / 50	340 / 30
Resist. Temp. Ejerc.	[Ω / km]	0,1792	0,1575	0,1358	0,1083	0,0971
Resistencia lineal	[Ω / km]	0,1792	0,0787	0,0453	0,0271	0,0243
Distancia entre fases	[m]	3	7	9	12	15
Xs	[Ω / km]	0,3918	0,3139	0,2858	0,2759	0,2896
Bs	[10^{-6} S / km]	2,953	3,5924	3,9364	4,0684	3,8715

Cuadro 2.7.

Nótese que el número de subconductores, así como la distancia entre fases varían en función de los niveles de tensiones utilizados.

3.0. MODELADO DE LA LÍNEA CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

Cuando la longitud de una línea comienza a ser comparable a una fracción de la longitud de onda (λ), ésta se denomina línea larga.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

siendo v la velocidad de propagación en medios dieléctricos y f la frecuencia eléctrica.

En estas condiciones la línea debe modelarse con parámetros distribuidos.

Si la velocidad de propagación en el vacío es:

$$v_{\text{vacío}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \times 10^{-12} \times 4 \times \pi \times 10^{-7}}}$$

$$v_{\text{vacío}} \cong c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{y en medios dieléctricos: } v = \frac{v_{\text{vacío}}}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

ϵ_r = índice dieléctrico relativo

μ_r = permeabilidad magnética

Por ejemplo, la longitud de la onda electromagnética transmitida por una línea será una fracción de:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{50 \text{ Hz}} = 6.000 \text{ km}$$

Para frecuencias utilizadas industrialmente, las líneas presentan serias restricciones de transmisión superando el cuarto de la longitud de onda (1.500 km para 50 Hz y 1.200 km para 60 Hz). Requiriendo para optimizar la transmisión elementos de compensación.

El presente estudio sólo se abocará a las líneas de longitud larga, las cuales no están representadas por el denominado circuito nominal π , ya que este no tiene en cuenta los parámetros distribuidos uniformemente en la línea. Sin embargo existe una posibilidad de encontrar el circuito equivalente de una línea de transmisión larga y a esta representarla con precisión y convertir el circuito nominal π en el circuito equivalente exacto (Fig 3.1.), a través de funciones hiperbólicas, tal como se describe en el Anexo I.

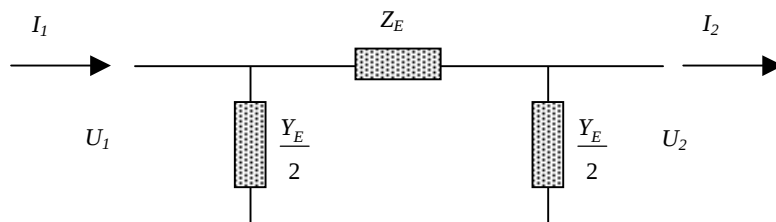


Fig. 3.1.

Donde:

$$Z_E = Z_c \text{ Senh } \theta$$

$$\frac{Y_E}{2} = \frac{\text{Cosh } \theta - 1}{Z_c \cdot \text{Senh } \theta}$$

θ = ángulo característico

El modelo equivalente exacto puede ser representado mediante un cuadripolo

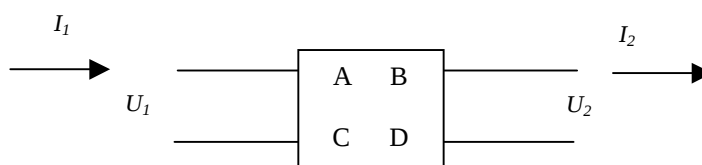


Fig. 3.2.

Siendo las constantes del mismo:

$A = \text{Cosh } \theta$

$B = Z_c \text{ Senh } \theta$

$C = \frac{\text{Senh } \theta}{Z_c}$

$D = A$

En los cuadros 3.3. y 3.4. se representan para distintas tensiones y longitudes, los parámetros equivalentes y constantes del cuadripolo respectivamente.

Un [kV]	Long. [km]	Ze [Ω]		Ye/2 [Ω]	
750	1000	15,9	j 238,8	1,9E-05	j 0,0021
	1500	11,1	j 274,3	9,2E-05	j 0,0037
500	1000	17,8	j 227,5	2,4E-05	j 0,0022
	1500	12,4	j 261,5	1,1E-04	j 0,0039
330	500	20,6	j 136,5	3,9E-06	j 0,0010
	750	27,1	j 193,0	1,4E-05	j 0,0016
	1000	29,7	j 236,3	3,7E-05	j 0,0022
220	250	19,2	j 77,6	6,7E-07	j 0,0005
	500	35,7	j 150,1	5,6E-06	j 0,0009
132	250	43,7	j 97,0	1,0E-06	j 0,0004
	500	81,1	j 188,5	8,6E-06	j 0,0008

Cuadro 3.3.

Un [kV]	Long. [km]	A [-]		B [Ω]		C [S]		D [-]	
750	1000	0,490	j 0,039	15,9	j 238,8	-5,4E-05	j 0,00319	0,490	j 0,039
	1500	-0,019	j 0,067	11,1	j 274,3	-1,6E-04	j 0,00365	-0,019	j 0,067
500	1000	0,489	j 0,045	17,8	j 227,5	-6,7E-05	j 0,00335	0,489	j 0,045
	1500	-0,020	j 0,078	12,4	j 261,5	-1,9E-04	j 0,00384	-0,020	j 0,078
330	500	0,863	j 0,021	20,6	j 136,5	-1,4E-05	j 0,00188	0,863	j 0,021
	750	0,700	j 0,045	27,1	j 193,0	-4,6E-05	j 0,00265	0,700	j 0,045
	1000	0,487	j 0,073	29,7	j 236,3	-1,0E-04	j 0,00324	0,487	j 0,073
220	250	0,965	j 0,009	19,2	j 77,6	-2,6E-06	j 0,00089	0,965	j 0,009
	500	0,862	j 0,034	35,7	j 150,1	-2,1E-05	j 0,00171	0,862	j 0,034
132	250	0,964	j 0,016	43,7	j 97,0	-4,0E-06	j 0,00073	0,964	j 0,016
	500	0,858	j 0,063	81,1	j 188,5	-3,2E-05	j 0,00141	0,858	j 0,063

Cuadro 3.4.

4.0. COMPENSACIÓN

Como se vio anteriormente, existe una restricción en la transmisión de potencia a una longitud cercana al cuarto de la longitud de onda.

Para tensiones elevadas cobra importancia la transmisión de potencia reactiva, la cual es producida por la capacidad paralelo de la línea. Además, la red eléctrica misma consume y produce potencia reactiva. Una forma de controlar este fenómeno es mediante la compensación.

La compensación en una línea de transmisión tiene las siguientes características:

- Reduce el efecto de la reactancia en la línea de transmisión.
- Posibilita transmitir una potencia mayor.
- Atenúa la generación de reactivo en líneas con baja carga.

La compensación serie mediante capacitores, es una forma muy efectiva de incrementar la capacidad de transferencia de carga de líneas largas.

La compensación paralelo mediante reactores es una forma de permitir su operación a baja carga.

La potencia transmitida por una línea de alta tensión responde aproximadamente a la siguiente ecuación:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{Xl} \cdot \sin \delta$$

Donde:

U_1 = Tensión en el extremo emisor

U_2 = Tensión en el extremo receptor

Xl = Reactancia serie entre los extremos de la línea

δ = ángulo de desfase entre U_1 y U_2

De la misma se desprende que la capacidad de transmitir potencia de una línea puede ser incrementada elevando las tensiones, el ángulo δ o reduciendo Xl .

Con capacitores en serie en una línea, la potencia transmitida será:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{Xl - Xc} \cdot \sin \delta$$

o

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{Xl \cdot (1 - k)} \cdot \sin \delta$$

Siendo:

Xc = Reactancia capacitiva del capacitor serie

$$k = \frac{Xc}{Xl} = \text{grado de compensación}$$

La compensación en derivación se utiliza para neutralizar los efectos de las reactancias capacitivas transversales de la línea, colocando reactores inductivos.

Con esta compensación se procura principalmente neutralizar el efecto Ferranti.

$$U_1 = A U_2$$

Recordando que la constante A del cuadripolo representativo de la línea expresa la relación en módulo y fase entre las tensiones U_1 y U_2 cuando la línea opera en vacío ($I_2 = 0$). Por lo tanto para que la compensación sea total, será necesario hacer $A = 1$.

La elección de la ubicación de la compensación podrá requerir un estudio especial en cada caso en particular, respecto a la economía general y a la fiabilidad del sistema. En el estudio habrá que tener en cuenta los perfiles de tensión, la eficacia de compensación, pérdidas, corrientes de falla, sobretensiones, proximidad requerida de subestaciones existentes, etc.

En el presente trabajo, al no estar desarrollando una compensación para un caso puntual, adoptamos una ubicación de la compensación cada tercio de línea. Debido a esto, se representa la misma mediante dos cuadripolos idénticos, como el de la fig. 4.1.

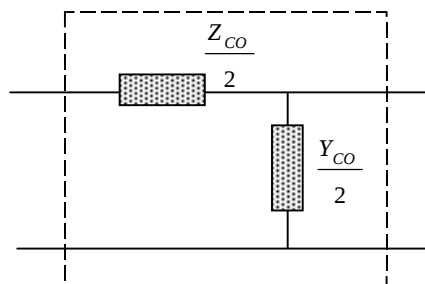


Fig. 4.1.

Z_{CO} = Reactancia serie de compensación

Y_{CO} = Admitancia paralelo de compensación

En la siguiente figura (4.2.), se esquematiza la compensación de la línea utilizando cuadripolos en cascada:

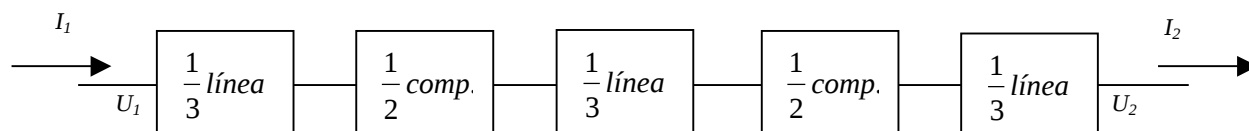


Fig. 4.2.

Del producto entre la matriz de admitancia nodal de la línea compensada (Y_n), y el vector de tensiones en los extremos (U), se obtienen las corrientes de entrada y salida.

$$[I] = [Y_n] \cdot [U]$$

Operando, las potencias conjugadas serán:

$$S_1^c = U_1^c (Y_{11} \cdot U_1 + Y_{12} \cdot U_2)$$

$$S_2^c = U_2^c (Y_{21} \cdot U_1 + Y_{22} \cdot U_2)$$

Para una línea sin compensación se ve que el límite de transmisión de su potencia natural depende del ángulo δ (vinculado al concepto de límite de estabilidad transitoria y permanente), como se muestra en la Fig. 4.3.

Si bien un valor usual de δ es 15° , hemos empleado 35° como condición límite para evidenciar las restricciones en la transmisión de potencia a grandes distancias.

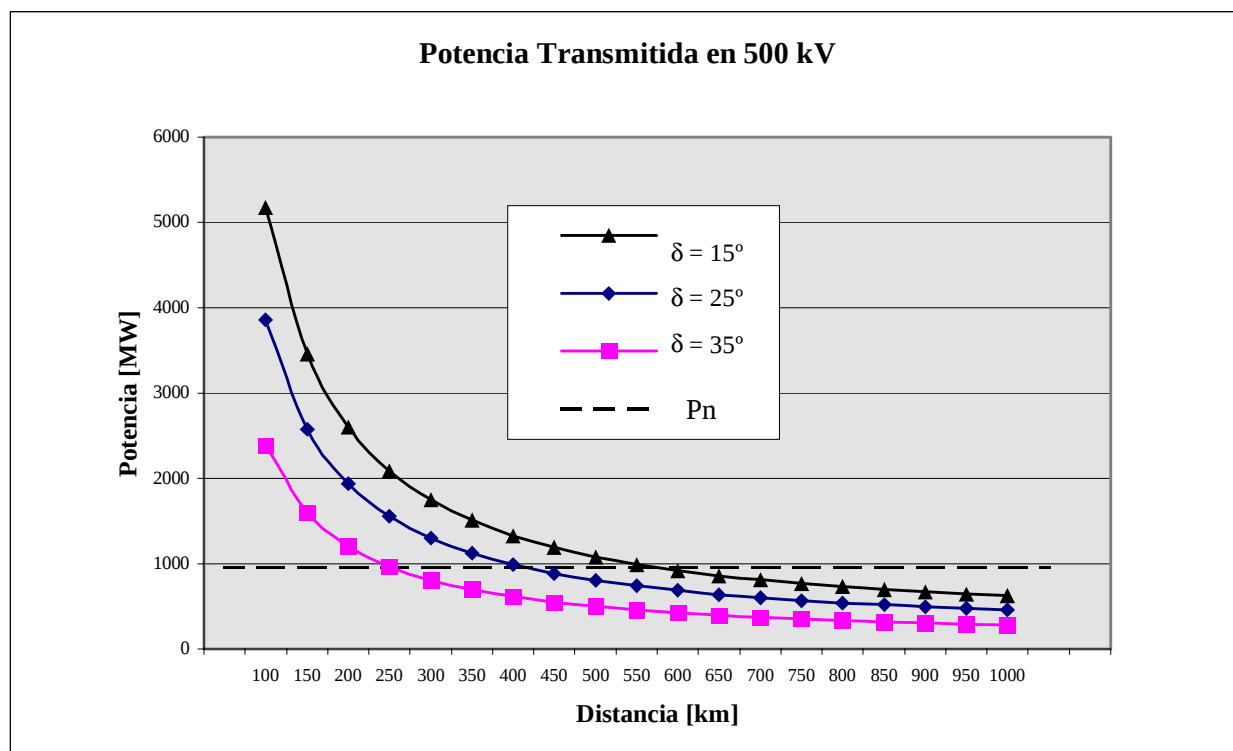


Fig. 4.3.

Es posible estimar y comparar la capacidad de transmisión a diferentes longitudes con y sin compensación para definir los límites de transmisión.

Por ejemplo, en el cuadro 4.4. se presenta el caso de una transmisión en 500 kV a 1.000 km, admitiendo una caída de tensión (ΔU) del 3%, un $\delta_{\max} = 35^\circ$ y aplicando una compensación paralelo del 20% y serie del 40%, comparado con el mismo caso sin compensar.

	Unidades	C Serie 0% C Paralelo 0%	C Serie 40% C Paralelo 20%
%Pérdidas P	[-]	6,6	9,5
Pérdidas Q	[Mvar]	-750,5	-274,4
Pérdidas P	[MW]	44,05	97,07
Potencia P1	[MW]	670,0	1026,8
Potencia P2	[MW]	625,9	929,7

Cuadro 4.4.

De donde se concluye que la potencia transmitida se incrementa en más del 50% mediante el uso de compensación. Como contrapartida, se produce un incremento del 6,6 al 9,5% en las pérdidas.

5.0. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y APLICACIONES

Analizando diferentes grados de compensación para 500 kV y 1.000 km, se obtiene el cuadro 5.1.

C Serie	C Paralelo	%Pérdidas P	Pérdidas Q	Pérdidas P	Potencia P1	Potencia P2
[%]	[%]	[%]	[MVA]	[MW]	[MW]	[MW]
0	0	6,6	-750,5	44,1	670,0	625,9
	20	6,1	-510,2	38,6	633,3	594,7
	40	5,9	-288,3	35,4	600,5	565,1
	60	6,0	-82,7	34,0	571,2	537,2
	80	6,3	108,2	34,1	544,8	510,7
	100	6,8	286,1	35,4	521,0	485,6
20	0	7,7	-656,5	62,5	816,1	753,5
	20	7,3	-419,0	57,3	781,2	723,9
	40	7,2	-196,8	54,3	749,9	695,5
	60	7,4	11,5	53,2	721,5	668,4
	80	7,7	207,2	53,6	695,9	642,3
	100	8,2	391,3	55,2	672,6	617,4
40	0	9,6	-511,5	101,3	1055,1	953,7
	20	9,5	-274,4	97,1	1026,8	929,7
	40	9,5	-48,9	95,1	1001,3	906,2
	60	9,7	166,0	95,2	978,4	883,2
	80	10,1	370,8	97,0	957,8	860,7
	100	10,7	566,3	100,3	939,2	838,9
45	0	10,3	-461,7	117,7	1140,1	1022,5
	20	10,2	-224,0	114,0	1115,2	1001,3
	40	10,3	3,4	112,7	1093,1	980,4
	60	10,6	221,1	113,5	1073,3	959,8
	80	11,0	429,6	116,3	1055,7	939,5
	100	11,6	629,6	120,6	1040,2	919,6
50	0	11,2	-403,9	138,7	1240,7	1102,1
	20	11,1	-164,9	135,8	1220,7	1084,8
	40	11,3	65,0	135,6	1203,2	1067,6
	60	11,6	286,3	137,6	1188,0	1050,4
	80	12,1	499,5	141,7	1175,0	1033,3
	100	12,7	705,0	147,6	1163,9	1016,3
55	0	12,2	-335,9	166,2	1361,3	1195,0
	20	12,2	-94,9	164,8	1348,1	1183,3
	40	12,4	138,5	166,1	1337,4	1171,3
	60	12,8	364,6	170,1	1329,1	1159,0
	80	13,3	583,8	176,3	1322,9	1146,6
	100	14,0	796,3	184,7	1318,6	1134,0
60	0	13,5	-254,9	203,3	1507,9	1304,6
	20	13,6	-10,9	204,1	1504,7	1300,6
	40	13,8	227,3	208,1	1504,2	1296,1
	60	14,3	459,9	215,1	1506,2	1291,1
	80	14,9	687,0	224,8	1510,4	1285,6
	100	15,6	908,7	237,2	1516,9	1279,7
80	0	23,6	292,6	612,5	2600,0	1987,5
	20	24,1	570,6	658,1	2726,2	2068,1
	40	25,0	855,0	716,5	2866,8	2150,3
	60	26,1	1145,2	788,7	3022,4	2233,8
	80	27,4	1440,5	875,6	3194,0	2318,4
	100	28,9	1740,2	978,4	3382,2	2403,8

Cuadro 5.1.

Extendiendo el análisis a otras tensiones y longitudes, con y sin compensación, se observa un panorama más amplio de las limitaciones en la capacidad de transmisión.

Un	Pn	Long	C Serie	C Paralelo	Pérdidas P	Pérdidas Q	Pérdidas P	Potencia P1	Potencia P2
[kV]	[MW]	[km]	[%]	[%]	[%]	[MVA]	[MW]	[MW]	[MW]
750	2053	1000	0	0	5,6	-1604,1	80,77	1431,1	1350,3
			60	20	11,7	5,4	379,24	3228,0	2848,8
		1500	0	0	10,7	-3545,9	137,35	1282,2	1144,9
			60	40	12,4	-683,3	293,16	2373,3	2080,2
500	957	1000	0	0	6,6	-750,53	44,05	670,0	625,9
			55	20	12,2	-94,93	164,77	1348,1	1183,3
		1500	0	0	12,4	-1657,07	75,09	603,3	528,3
			60	20	13,9	-762,14	157,21	1129,6	972,4
330	401	500	0	0	9,2	65,2	44,76	487,0	442,2
			30	10	12,9	179,9	88,39	684,8	596,4
		750	0	0	9,3	-143,2	32,20	345,5	313,3
			30	20	12,8	2,0	60,37	472,3	411,9
		1000	0	0	10,4	-318,8	29,60	284,7	255,1
			20	40	11,4	-87,5	36,06	317,3	281,2
220	161	500	0	0	14,1	22,2	27,68	196,3	168,6
			20	20	17,4	62,8	41,48	238,7	197,2
		250	0	0	14,4	174,3	54,41	378,7	324,3
			20	20	17,7	228,3	82,27	466,1	383,8
132	45	500	0	0	24,0	2,0	12,84	53,5	40,7
			20	20	29,1	11,1	18,09	62,2	44,1
		250	0	0	24,5	42,4	25,15	102,8	77,7
			20	20	29,6	52,6	35,82	120,9	85,1

Cuadro 5.2.

CONCLUSIONES

- 1- Es posible mejorar la capacidad de transmisión de un sistema de potencia mediante compensación.
- 2- La potencia natural, como se mostró en el trabajo, constituye un parámetro de referencia simple al momento de definir la capacidad de transmisión de una línea.
- 3- Mediante la compensación es posible controlar el flujo reactivo de la línea, tendiendo a minimizarlo.
- 4- Haciendo extensivo el análisis a la hipotética interconexión lineal entre países de la región y teniendo en cuenta las distancias y potencias involucradas, la transmisión por corriente alterna presenta restricciones técnicas insalvables, requiriéndose el empleo de otras tecnologías tales como alta tensión en corriente continua (HVDC).

APLICACIONES

Como ejemplo práctico de aplicación se puede analizar el sistema patagónico, cuyo esquema simplificado se muestra en la figura 5.3., y en el cual se pueden apreciar las potencias transmisibles calculadas, teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente adoptadas para la compensación de las líneas.

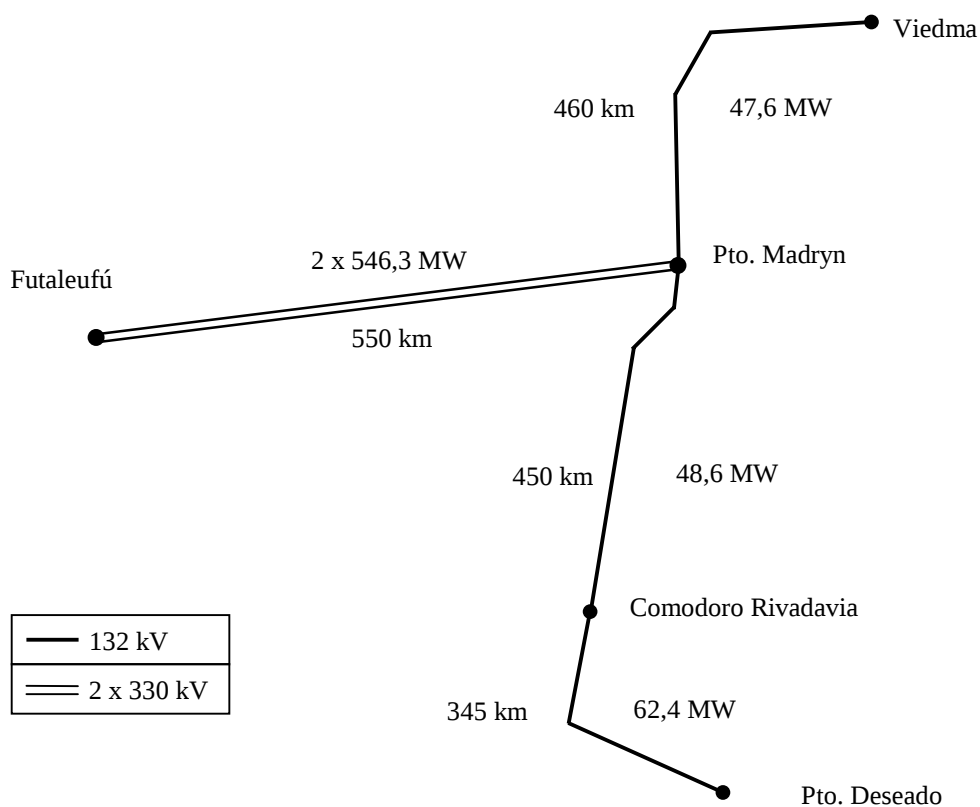


Fig. 5.3.

De la fig.5.3. se desprende que la restricción de transmisión de la red de 132 kV del sistema patagónico limita los flujos a no más de 65 MW a 350 km si las líneas estuvieran compensadas.

Analizando el caso de la interconexión en 500 kV entre San Pablo, Asunción del Paraguay, Buenos Aires y Santiago de Chile, resulta:

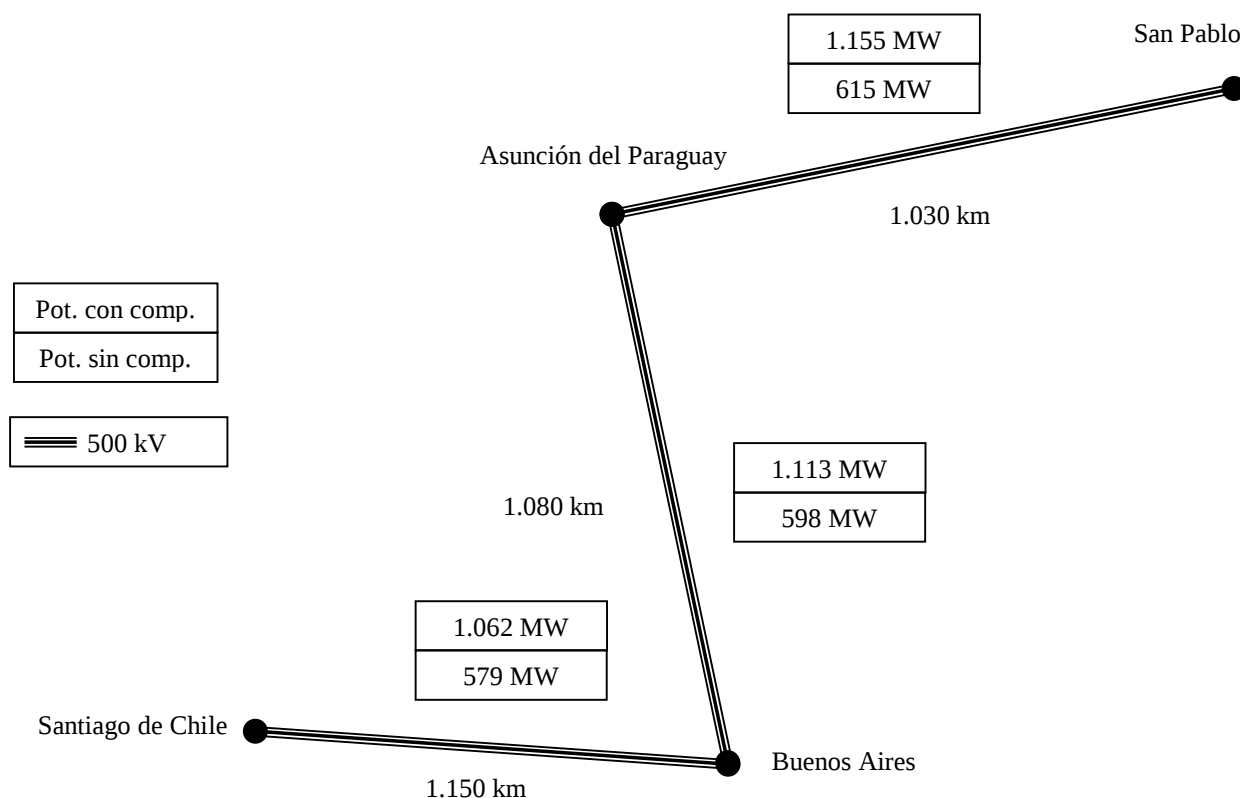


Fig. 5.4.

De donde se desprende que si bien la compensación incrementa los niveles de potencia transmisible considerablemente, las distancias involucradas se aproximan al cuarto de la longitud de onda, razón por la cual los flujos de potencia no exceden los 1.155 MW para 1.030 km.

6.0. BIBLIOGRAFÍA

Análisis de Sistemas de Potencia
John J. Grainger - William D. Stevenson
McGraw - Hill
1994

Sistemas Eléctricos de Gran Potencia
B. M. Weedy
Reverte
1978

Análisis de Sistemas de Potencia
Charles A. Gross
Interamericana
1982

Teoría de Líneas Eléctricas
Enrique Ras Oliva
Marcombo
1973

Effectiveness of Series Capacitors in Long Distance Transmission Lines
Belur S. Ashok Kumar - K. Parthasarathy - F. S. Prabhakara –H. P. Khincha
Presented at IEEE Summer Power Meeting, Dallas Texas.
1969

Transmissão de Energia Elétrica, Linhas Aereas
Rubens Dario Fuchs
Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

Series Compensation in A.C. Transmission Systems
ASEA Reactive Power Compensation Department
Info-No NR 500_009 E
1982

Conductores de Aluminio con Alma de Acero
Construcciones y Ensayos
Norma Iram 2187

Esquema Geográfico del Sistema Eléctrico Argentino y Esquemas Parciales de los Sistemas de Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay
Cammesa
1996

7.0. UNIDADES

El sistema de unidades utilizado es el Sistema Internacional de Unidades.

Anexo I.

Una línea de transmisión larga puede ser representada de la siguiente forma:

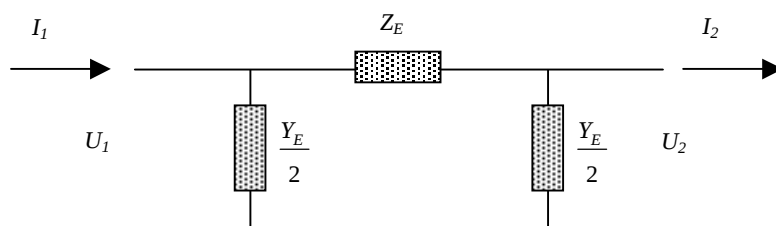


Fig. I

Donde:

$$Z_E = Z_c \operatorname{Senh} \theta$$

$$\frac{Y_E}{2} = \frac{\operatorname{Cosh} \theta - 1}{Z_c \cdot \operatorname{Senh} \theta}$$

Siendo:

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

$$z = r + j x_s$$

$$y = j b_c$$

$$\theta = \gamma \text{ Long.} \quad (\text{Angulo característico})$$

$$\gamma = \alpha + j \beta \quad (\text{Constante de propagación})$$

$$\alpha \quad (\text{Constante de atenuación})$$

$$\beta \quad (\text{Constante de fase})$$

El modelo equivalente π puede ser representado mediante un cuadripolo

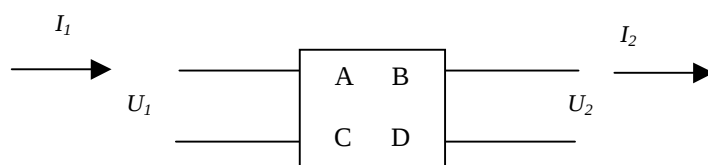


Fig. II

De donde se desprende:

$$\begin{cases} U_1 = A \cdot U_2 + B \cdot I_2 \\ I_1 = C \cdot U_2 + D \cdot I_2 \end{cases}$$

Siendo las constantes del mismo:

$$A = \operatorname{Cosh} \theta$$

$$B = Z_c \operatorname{Senh} \theta$$

$$C = \frac{\operatorname{Senh} \theta}{Z_c}$$

$$D = A$$

CURRICULUM VITAE

Ezequiel A. Granada

Schneider Electric Arg. S.A. Analista técnico-comercial, división equipamiento M.T.

Gonzalo H. Pessolano

Ford Arg. S.A. Supervisor en el Dpto. de Mantenimiento Central (Usina)

Santiago A. Piva

Argencobra S.A. Proyectista de redes de distribución en M.T. y B.T.

Estudiantes del último año de la carrera Ingeniería Eléctrica, en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional General Pacheco, Buenos Aires, Argentina.