

ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DE CARGABILIDAD DE LINEAS DE TRANSMISION Y LA INFLUENCIA DEL SOPORTE DE POTENCIA REACTIVA

NAPOLEON NOBOA G., ING. EPN

JESUS JATIVA I., ING. EPN
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Se estudia las características de la transferencia de potencia en función de la longitud de la línea de transmisión.

Para la resolución del problema se desarrollan dos algoritmos, en el primero se utiliza un método analítico para obtener y extender los conceptos tradicionales de cargabilidad de líneas propuestos por St. Clair, a un rango más amplio de voltajes y a líneas de longitudes de hasta 960 Km. En el análisis se determina la influencia de los siguientes parámetros: caída de voltaje, margen de estabilidad en estado estable y reactivancias terminales de línea.

En el segundo algoritmo se estudia la influencia del suministro de potencia reactiva en los límites de cargabilidad de las líneas de transmisión, considerando la existencia de soporte finito e infinito de reactivos. La mínima compensación de potencia reactiva se la utiliza para lograr una transferencia de potencia en condiciones normales y críticas, previamente establecidas. Se estudia también la dependencia de las restricciones tradicionales con la reserva de reactivos.

INTRODUCCION

Debido al enorme crecimiento de la demanda en los centros de carga, se hace necesario que la energía sea transmitida en grandes bloques desde los lugares de generación, los mismos que por lo general se hallan ubicados a grandes distancias. Esta situación desemboca en el problema de como transferir estas cantidades de potencia y de los criterios que deben adoptarse en el diseño y posterior operación de las líneas de transmisión.

Los primeros pasos para determinar la cantidad de potencia que puede transportar una línea, se encaminaron a establecer normas y criterios en distintas condiciones de demanda. Es así que desde 1953, H.P. St.Clair definió las curvas de cargabilidad de las líneas, obtenidas gracias a la experiencia en la operación de líneas largas de elevados voltajes. Estas curvas tienen como puntos de referencia las potencias de 1.0 SIL en 300 millas y 3.0 SIL en 50 millas, y sirvieron como guía para el diseño y la operación de líneas de hasta 345 Kv, comprendidas entre 50 y 400 millas. Fig. 1³.

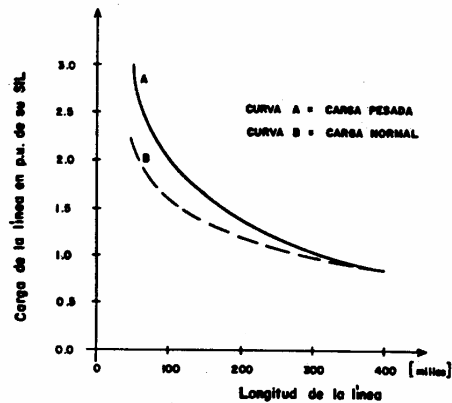


Fig. 1 Curvas originales de St.Clair, para una línea de 330 KV, impedancia natural de 400Ω.

El desarrollo de los Sistemas de Potencia obliga a formular un algoritmo para determinar en forma analítica las curvas de cargabilidad: potencia, expresada en términos de por unidad del SIL, en función de la longitud de las líneas de transmisión.

El algoritmo presentado en este artículo permite obtener curvas similares a las de St. Clair, y extender sus conceptos a líneas de hasta 960 Km y a niveles de voltajes comprendidos en el rango de EHV y UHV¹. Para la construcción de las curvas se realizarán asunciones en los parámetros del sistema y en las limitaciones consideradas: caída de voltaje y margen de estabilidad en estado estable, con las cuales se realiza un análisis de las variaciones de las reactivancias equivalentes de los sistemas terminales, del criterio de caída de voltaje en la línea y del criterio de margen de estabilidad a lo largo de todo el sistema de potencia.

El estudio descrito anteriormente se fortalece sustancialmente con la consideración de

una nueva restricción en la cargabilidad de las líneas de transmisión, la reserva de potencia reactiva. Debido a que se asume un soporte infinito de reactivos en la evaluación del margen de estabilidad, los límites de transferencia de potencia están determinados por las curvas de St. Clair; mientras que cuando se toma en cuenta la influencia de una cantidad finita de reactivos, el margen de estabilidad y los límites de la potencia transferida dependen apreciablemente de este parámetro. Para demostrar la importancia del soporte de reactivos en la evaluación de las restricciones de la cargabilidad se formula un método computacional consistente con la nueva tendencia en la determinación de los límites de potencia máxima a ser transferida por la línea.

El estudio presentado en este artículo se aplica a una línea del Sistema Nacional Interconectado, para la cual se calculan los límites de cargabilidad con y sin influencia del soporte de reactivos, y las cantidades mínimas de potencia reactiva requeridas para la operación en algunas condiciones de caída de voltaje y margen de estabilidad.

1. MODELO MATEMATICO

Para la obtención analítica de las características de cargabilidad de las líneas de transmisión se utiliza el modelo matemático esquematizado en la figura 2.

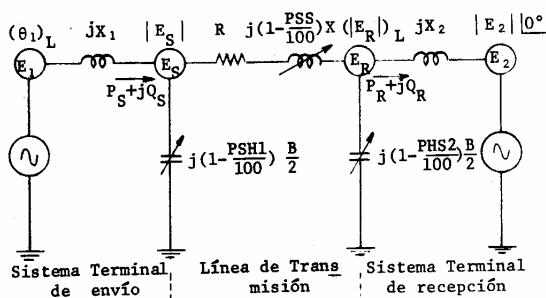


Fig. 2 Modelo matemático utilizado para el estudio de cargabilidad de líneas de transmisión.

En este modelo se muestra una línea de longitud variable, representada por su circuito PI equivalente de secuencia positiva; los equivalentes Thevenin de secuencia positiva de los sistemas terminales de la línea; y, las compensaciones serie y paralelo expresadas en porcentajes de los parámetros distribuidos de la línea.

Se escoge el circuito PI equivalente por ser la representación más apropiada de las líneas de longitudes comprendidas en el estudio de cargabilidad (80-960 Km). Las impedancias de los sistemas terminales, obtenidas del estudio de cortocircuitos, reflejan el grado de robustez del sistema de potencia y son expresadas con la corriente de cortocircuito trifásico. El modelo se halla complementado con las compensaciones serie y paralelo, cuyos efectos sobre la cargabilidad no se analizan

en este artículo. Las potencias transferidas desde el terminal de envío hasta el terminal de recepción se expresan en por unidad del SIL de la línea.

1.1 Solución matemática

Para un adecuado control de las restricciones de la cargabilidad es necesario fijar: el módulo del voltaje de envío, $|E_S|$, el que conjuntamente con el valor calculado de $|E_R|$ ajusta la limitación de caída de voltaje; y, el voltaje del equivalente Thevenin de recepción, $|E_2| \angle 0^\circ$, que posibilita determinar el desplazamiento angular a través de la línea y de los sistemas terminales. El valor de $|E_2|$ se establece de acuerdo a las necesidades de potencia reactiva en la transmisión de la potencia de carga.

Las corrientes de malla se obtienen a partir de:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jX_1 + Z'_S & -Z'_S & 0 \\ -Z'_S & Z + Z'_S + Z'_R & Z'_R \\ 0 & Z'_R & jX_2 + Z'_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

en donde:

$$Z' = R + j \left(1 - \frac{PSS}{100}\right) X \quad (2)$$

$$Z'_S = j \left(1 - \frac{PSH1}{100}\right) \frac{B}{2} \quad (3)$$

$$Z'_R = j \left(1 - \frac{PSH2}{100}\right) \frac{B}{2} \quad (4)$$

De la resolución del sistema es de interés conocer lo siguiente:

Angulo del voltaje del terminal de envío, θ_S :

$$\theta_S = \sin^{-1} \left[\frac{E_2 B \sin(\phi_b - \theta_1 - \phi_a)}{E_S} \right] + \theta_1 + \phi_a \quad (5)$$

Módulo del voltaje E_1 :

$$E_1 = \frac{E_S \cos(\theta_S) - E_2 B \cos(\phi_b)}{A \cos(\phi_a + \theta_1)} \quad (6)$$

Voltaje en el terminal de recepción,

$E_R \angle \theta_R$:

$$E_R (\text{real}) = E_1 D \cos(\theta_1 + \phi_d) + E_2 C \cos(\phi_c) \quad (7)$$

$$E_R (\text{imag}) = E_1 D \sin(\theta_1 + \phi_d) + E_2 C \sin(\phi_c) \quad (8)$$

$$E_R = \sqrt{E_R^2 (\text{real}) + E_R^2 (\text{imag})} \quad (9)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left(\frac{E_R (\text{imag})}{E_R (\text{real})} \right) \quad (10)$$

en donde:

$d =$ determinante de la matriz $[Z]$ de (1)

$$A \left| \phi_a \right| = \frac{d - jX_1 [(Z'_S + Z'_R)(Z'_R + jX_2) - Z'^2_R]}{d} \quad (11)$$

$$B \left| \phi_b \right| = \frac{Z'_S Z'_R jX_1}{d} \quad (12)$$

$$C \left| \phi_c \right| = 1 - \frac{jX_2 [(jX_1 + Z'_S)(Z'_S + Z'_R) - Z'^2_S]}{d} \quad (13)$$

$$D \left| \phi_d \right| = -j \frac{X_2 Z'_S Z'_R}{d} \quad (14)$$

Las expresiones matemáticas para calcular las potencias en el terminal de recepción se obtienen en el circuito Pl equivalente de la línea:

La potencia aparente, S_R :

$$S_R = E_R I_R^* \quad (15)$$

$$S_R = E_R \left[\frac{E_S^* - E_R^* \cosh^* \gamma l}{Z_0 \sinh^* \gamma l} \right] \quad (16)$$

Debido a que la resistencia, R , de las líneas de transmisión en altos niveles de voltaje es mucho más pequeña que la reactancia inductiva, se pueden hacer las siguientes aproximaciones:

Constante de atenuación, α , igual a cero.

Constante de propagación, γ , igual a la constante de fase, β .

Impedancia característica, Z_0 , igual a la impedancia natural, SI .

Con lo que se tiene:

Impedancia natural:

$$SI = \sqrt{\frac{X}{Y}} \quad (17)$$

Carga natural en por unidad, SIL :

$$SIL = \frac{1}{SI} \quad (18)$$

La potencia aparente en por unidad del SIL , S_R :

$$\frac{S_R}{SIL} = j \left[\frac{\left(\frac{E_S}{E_R}\right)^* - \cos \beta l}{\sin \beta l} \right] [E_R]^2 \quad (19)$$

1.2 Diagrama de flujo

En el lazo central del proceso, se inicializa el ángulo θ_1 para calcular el módulo de E_R y se verifica la restricción de caída de voltaje. Se verifica la restricción del margen de estabilidad y se incrementa el valor de θ_1 . El lazo termina cuando una de las dos restricciones se ha violado, y se evalúa la cargabilidad de la línea.

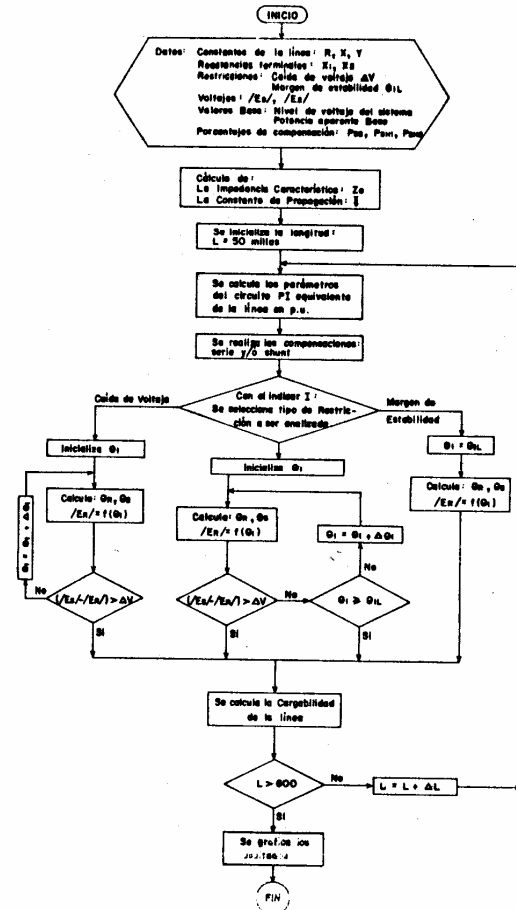


Fig. 3 Diagrama de flujo del programa digital "Determinación Analítica de las Características de Cargabilidad de Líneas de Transmisión".

2. FACTORES LIMITANTES Y CONSIDERACIONES

Los factores limitantes y consideraciones que se estudian en esta sección son:

2.1 Limitación térmica

El límite térmico es un problema más de dise

ño que de operación, puesto que esta restricción surge de la selección del calibre y de las condiciones ambientales a las que va a estar sujeto. En niveles altos de voltaje ad quieren mayor importancia los efectos piel y corona de las líneas de transmisión, cuya solución requiere de conductores de gran calibre o haces de conductores, los mismos que permitirían transferir una enorme cantidad de potencia en condiciones inadecuadas de voltaje o margen de estabilidad.

Esta limitación tiene una marcada influencia en líneas de longitudes menores a 80 Km y a niveles de voltaje de hasta 138 KV.

2.2 Caída de voltaje

En los reportes iniciales del estudio de cargabilidad no se encuentra analizada la caída de voltaje como un factor limitante, sino que se asumía un perfil plano de voltaje a lo largo de la línea. En este trabajo se establece a la caída de voltaje como un criterio para mantener una diferencia de los voltajes terminales de la línea. Se considera adecuada una caída de voltaje del 5%, la misma que representa la condición de una línea con carga pesada, y se la calcula con la expresión:

$$\Delta V_{\%} = \left| \frac{|E_S| - |E_R|}{|E_S|} \right| 100 \quad (20)$$

2.3 Margen de estabilidad en estado estable

Este factor ha sido ampliamente tratado, pero es conveniente establecer lineamientos que amplíen el criterio del desplazamiento angular a todo lo largo del sistema. El límite de estabilidad es el máximo flujo de potencia que puede circular por un punto del sistema sin causar la pérdida de estabilidad.

El margen de estabilidad se define con la expresión:

$$ME_{\%} = \left| \frac{P_{m\acute{a}x} - P_o}{P_{m\acute{a}x}} \right| 100 \quad (21)$$

Y constituye un criterio para establecer un rango de seguridad contra las pérdidas de sincronismo. Operando una línea con potencias inferiores a la máxima, algunas perturbaciones, tales como incrementos de carga, pérdidas de generación o carga, fallas transitorias y operaciones de maniobra, pueden ser absorbidas por el sistema. Estos factores se toman en cuenta para establecer el margen de estabilidad, el mismo que refleja la filosofía del diseño y de la misma operación del sistema.

El margen de estabilidad se le cuantifica a partir del desplazamiento angular entre los voltajes E_2 y E_1 , con las siguientes asunciones: resistencia y susceptancia de la línea despreciables y módulos de los voltajes constantes; con lo cual la potencia se calcula con la expresión:

$$P_R = \frac{E^2}{X} \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \quad (22)$$

Cuya curva se representa en la figura 4.

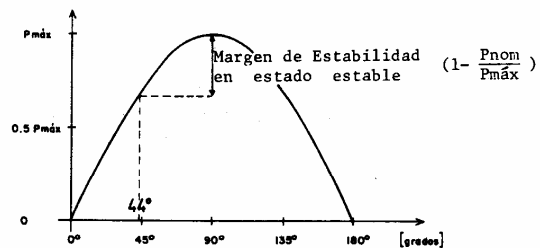


Fig. 4 Curva potencia - ángulo

Aplicando la definición del margen de estabilidad en la curva potencia-ángulo se obtiene la conversión a una curva ángulo-margen de estabilidad.

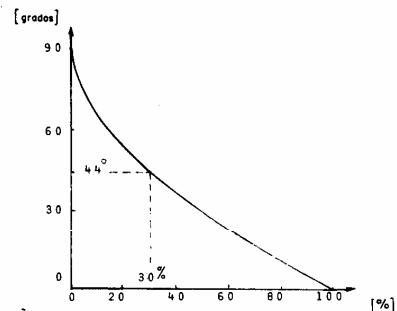


Fig. 5 Curva ángulo-margen de estabilidad

Para las condiciones de carga pesada de una línea, se considera razonable un margen de estabilidad en estado estable entre 30% y 35%, el cual corresponde a un desplazamiento angular comprendido entre 44° y 40° a través de la línea y de las reactancias equivalentes de los sistemas de envío y recepción.

3. EFECTOS DE REACTANCIAS TERMINALES, CAIDA DE VOLTAJE Y MARGEN DE ESTABILIDAD EN LA CURVA BÁSICA DE CARGABILIDAD

3.1 Construcción de la curva básica de cargabilidad

Para verificar la validez del modelo matemático y las consideraciones realizadas sobre los factores limitantes en la obtención analítica de las características de cargabilidad, se aplica el algoritmo desarrollado a la línea de transmisión Paute-Milagro-Pascuales del Sistema Nacional Interconectado, con los siguientes parámetros y factores limitantes: longitud total de la línea 187 Km (no se considera la subestación ni la carga conectada en Milagro), caída de voltaje del 5%, margen de estabilidad del 35%, reactancias terminales correspondientes a una corriente de cortocircuito trifásico de 50 KA y módulo del voltaje E_2 igual a 0.956 p.u., y se obtienen gráficos de potencia de carga, expresada en términos de por unidad del SIL, en función de la longitud de la línea, expresada en kilómetros.

Los datos de la línea son:

POTENCIA BASE (MVA)	VOLTAJE NOMINAL (KV)	REACTANCIAS - SISTEMAS TERMINALES		CONSTANTES DE LA LINEA		
		POTENCIA FALLA 3 ϕ (MVA)	REACTANCIAS TERMINALES (%)	Z (%/mi)	Y (%/mi)	SIL (MW)
100	230	19920	.500	.009134 + j.077871	j.584915	274

La curva básica de cargabilidad de las líneas de transmisión para longitudes entre 80 y 960 Km, se la construye a partir de las curvas limitadas con una sola de las restricciones, caída de voltaje del 5% o margen de estabilidad del 35%, permitiendo una variación indefinida de la otra restricción, como se puede observar en la figura 6.

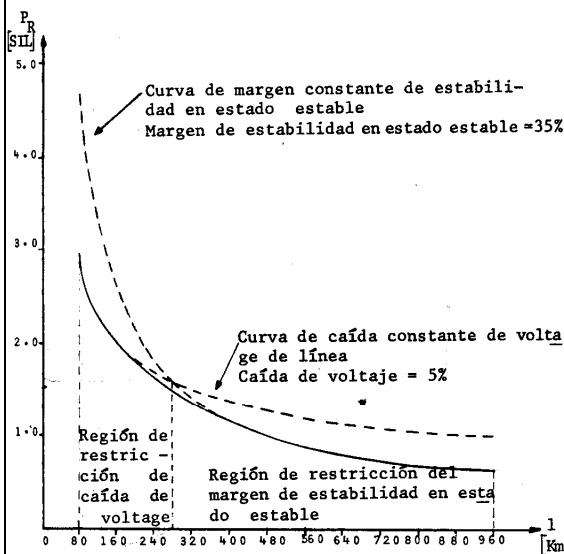


Fig. 6 Construcción de la curva básica de cargabilidad

Estas dos curvas obtenidas considerando independientemente cada una de las restricciones se intersectan alrededor de los 280 Km, estableciendo dos zonas definidas por el predominio de uno de los dos factores considerados. En la región ubicada a la izquierda del punto de corte, el factor más restrictivo en la cargabilidad es la caída de voltaje, en la cual la potencia transferida con esta limitación es menor que la obtenida con la limitación del margen de estabilidad. Vale la pena indicar que en esta parte de la curva tiene una gran importancia el valor especificado de E_2 , el mismo que al ser incrementado repercute en una elevación significativa de la potencia transferida. A la derecha del punto de corte, el margen de estabilidad en estado estable constituye el factor limi-

tante de la cargabilidad de la línea, consiguiéndose menores potencias que las obtenidas con la limitación de caída de voltaje.

Para la construcción gráfica de la curva básica se traza los tramos de las curvas que corresponden a los factores más restrictivos en ambas regiones y en la sección de corte se traza una envolvente a las dos curvas.

Como puede deducirse de las figuras 1 y 6, la curva obtenida con el algoritmo desarrollado en este trabajo coincide substancialmente con la curva original de Saint Clair.

El análisis presentado para la línea de 230KV, puede extenderse a mayores niveles de voltaje [4], en los rangos de EHV y UHV, en los cuales se tienen similares comportamientos de las curvas de cargabilidad a los obtenidos con el modelo, las aproximaciones y el algoritmo presentado en este artículo. La característica más importante en EHV y UHV es que el punto de corte se desplaza hacia la izquierda conforme aumenta el voltaje de transmisión, haciendo que el margen de estabilidad sea la restricción predominante en longitudes menores a 280 Km. [1].

La curva básica de cargabilidad se debe considerar como una estimación inicial de la potencia a ser transferida por una línea, por cuanto la curva puede sufrir severos cambios por la variación de los parámetros de la línea o de los factores limitantes.

3.2 Efecto de las reactancias terminales

Se analizan los cambios que se producen en las características de cargabilidad de líneas por la variación de las reactancias terminales correspondientes a 19920 MVA de potencia de cortocircuito en ambos sistemas terminales, a las reactancias equivalentes de los sistemas terminales obtenidos del estudio de cortocircuitos del Sistema Nacional Interconectado, con 5% de caída de voltaje y el 35% de margen de estabilidad.

REACTANCIAS REALES DE LOS SISTEMAS TERMINALES DE LA LINEA PAUTE - PASCUALES			
	Potencia de falla 3 ϕ (MVA)	Corriente de falla 3 ϕ (KA)	Reactancias terminales (%)
X ₁	5005	12.56	1.9981
X ₂	3126	7.85	3.1986

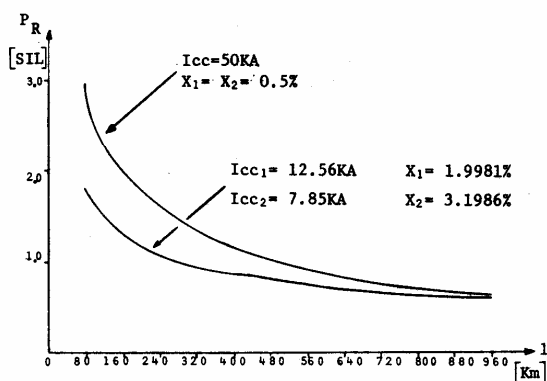


Fig. 7 Efecto de las reactancias terminales en la curva de cargabilidad de una línea de 230 KV, sin compensaciones, $\Delta V=5\%$ y ME = 35%

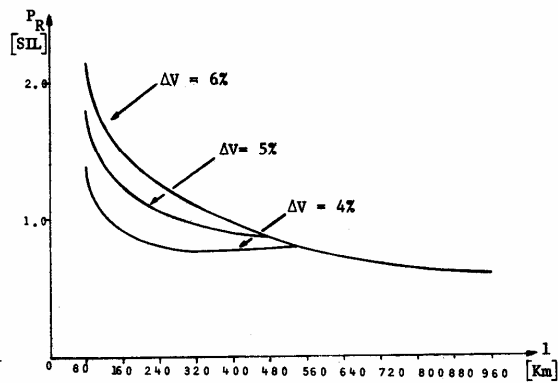


Fig. 8 Efecto de la caída de voltaje en la curva de cargabilidad de una línea de 230 KV, sin compensaciones, $X_1 = 1.9981\%$, $X_2 = 3.1986\%$ y ME = 35%

Se establece que con mayor grado de solidez del sistema se tiene niveles más altos de cargabilidad. Este efecto es más significativo en líneas de longitudes cortas y medianas, mientras que en longitudes largas se aprecia una pequeña influencia de la variación de las reactancias terminales. De este análisis se deduce que las reactancias terminales constituyen una parte considerable de la impedancia total del sistema.

En las curvas de cargabilidad obtenidas con algunas potencias de cortocircuito de los sistemas terminales, para una línea de transmisión, se mantienen invariantes las zonas de predominio de los factores limitantes^[1].

La reducción de los niveles de cargabilidad por efecto de la disminución de la solidez del sistema es más severa en líneas de altos voltajes que de bajos voltajes^{[1][4]}.

3.3 Efecto de la caída de voltaje

Utilizando la curva de cargabilidad de la línea Paute-Pascuales, realizada con las reactancias reales de los equivalentes de los sistemas terminales de Paute y Pascuales, se analiza el efecto del criterio de caída de voltaje para tres valores: 4%, 5% y 6%, con 35% de margen de estabilidad.

La limitación de caída de voltaje tiene influencia en líneas de longitudes cortas y medianas, la cual al disminuir reduce la cantidad de potencia transferida. Este efecto se traduce en una extensión de la restricción de caída de voltaje a longitudes mayores a los 280 Km^[1].

La variación de la caída de voltaje es más significativa en la cargabilidad de líneas de bajos voltajes que de altos voltajes^{[1][4]}.

3.4 Efecto del margen de estabilidad

Con las reactancias reales de los sistemas terminales de Paute y Pascuales, se estudia la cargabilidad de la línea Paute-Pascuales, para tres márgenes de estabilidad en estado estable: 25%, 35%, 45%, con 5% de caída de voltaje.

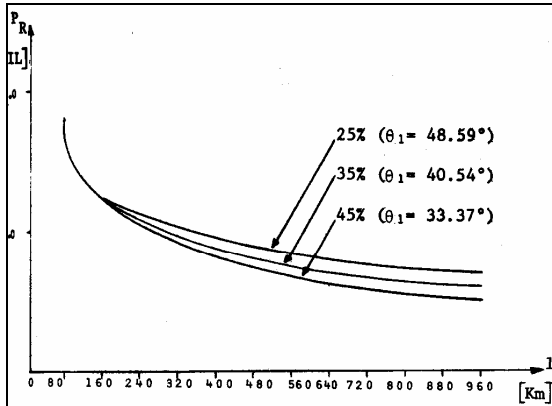


Fig. 9 Efecto del margen de estabilidad en la curva de cargabilidad de una línea de 230 KV, sin compensaciones, $X_1=1.9981\%$, $X_2=3.1986\%$ y $\Delta V = 5\%$

Al incrementar el margen de estabilidad en estado estable se reducen los niveles de cargabilidad de la línea, siendo más claro este efecto en líneas de longitudes largas. Con altos márgenes de estabilidad la zona de dominio de esta limitación llega a longitudes menores a los 280 Km.

Cabe anotar que con la variación del margen de estabilidad no se consigue incrementar tan significativos como con la variación de la caída de voltaje o de las reactancias terminales. Además, el nivel de voltaje es un parámetro de poca influencia en la magnitud de los efectos del margen de estabilidad.

4. REQUERIMIENTOS DE POTENCIA REACTIVA

Considerando el siguiente modelo de la línea de transmisión, se procede a demostrar la influencia crítica del soporte de potencia reactiva en la determinación de los límites de potencia a ser transferida por la línea.

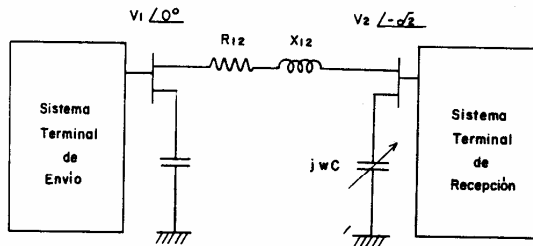


Fig. 10 Modelo de la línea de transmisión para determinar los requerimientos de potencia reactiva

Las ecuaciones del flujo de potencia por la línea y determinadas en el terminal de recepción están dadas por:

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{|Z_{12}|} \cos(\theta_{12} + \delta_2) - \frac{V_2^2}{|Z_{12}|} \cos(\theta_{12}) \quad (23)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2}{|Z_{12}|} \sin(\theta_{12} + \delta_2) - \frac{V_2^2}{|Z_{12}|} \sin(\theta_{12}) + V_2^2 \omega c \quad (24)$$

4.1 Transferencia de potencia con soporte infinito de reactivos

La función del capacitor variable utilizado en la barra de recepción de la línea es la de proveer al sistema de un soporte infinito de potencia reactiva. Esta adición puede controlar el factor de potencia o el voltaje terminal de la línea.

4.1.1 Control de voltaje. Es la función más utilizada del capacitor variable colocado en el terminal de recepción de la línea. Si se desea realizar perfecto control de voltaje en la barra de recepción ($|V_2|$ constante), el capacitor variable deberá ser de una capacitancia c continuamente variable e ilimitada, dotando al sistema de un soporte infinito de potencia reactiva.

Bajo la consideración de perfecto control en ambos terminales de la línea, las restricciones de cargabilidad son únicamente el margen de estabilidad y límite térmico, siendo esta última utilizada en líneas cortas o en voltajes de operación relativamente bajos (inferiores a los 138 KV).

Con perfecto control de voltaje en ambos terminales y para líneas ideales ($\theta_{12} = 90^\circ$), la máxima transferencia de potencia ocurre cuando $\delta_2 = -\theta_{12}$, y el flujo de potencia es solamente función del ángulo δ_2 , como se puede observar en la figura 11.

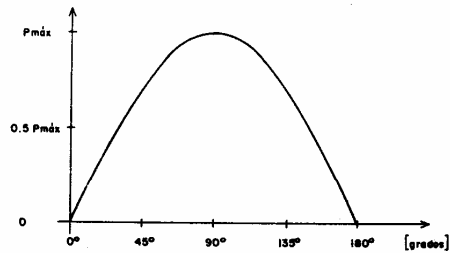


Fig. 11 Flujo de potencia por la línea con perfecto control de voltaje en ambos terminales

4.1.2 Control de factor de potencia. El capacitor variable c de la figura 10, es utilizado para realizar un perfecto control del fac

tor de potencia unitario en la carga ($Q = 0$). Para lo que se debe asegurar que el flujo de Potencia reactiva por la línea sea igual a cero, así el capacitor variable aplicado en el terminal de recepción debe ser continuamente variable e ilimitado, y el sistema cumplirá con:

$$V_1 \sin(\delta_2 + \theta_{12}) = V_2 \sin \theta_{12} \quad (25)$$

De ahí que la potencia activa en terminal de recepción está dado por:

$$P_2 = \frac{V_1^2 \sin(2\delta_2 + 2\theta_{12})}{2|Z_{12}| \sin(\theta_{12})} - \frac{V_1^2 \cos(\theta_{12}) \sin^2(\delta_2 + \theta_{12})}{|Z_{12}| \sin^2(\theta_{12})} \quad (26)$$

Con perfecto control del factor de potencia unitario en la barra de recepción, la máxima transferencia de potencia activa por la línea se consigue cuando $\delta_2 = -\theta_{12}/2$, en líneas sin pérdidas con $\delta_2 = -45^\circ$.

Por lo que es un error considerar en este caso un desplazamiento angular de 44° ; como el adecuado para transmitir una potencia operación con un margen de estabilidad en estado estable del 30%.

4.2 Transferencia de potencia con soporte finito de potencia reactiva.

El considerar un soporte finito de reactivos es, lógicamente un estudio más realista que cuando se asume reserva ilimitada de potencia reactiva.

4.2.1 Máxima transferencia de potencia con compensación estática. Si la fuente de reactivos de la barra de recepción, está formada por un capacitor de capacitancia fija, entonces el criterio de máxima transferencia de potencia es totalmente diferente. Se debe analizar el Jacobiano de las ecuaciones (23) y (24), considerando c constante⁹.

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{V_1 V_2}{|Z_{12}|} \sin(\delta_2 + \theta_{12}) & \frac{V_1 \cos(\delta_2 + \theta_{12}) - 2V_2 \cos(\theta_{12})}{|Z_{12}|} \\ \frac{V_1 V_2 \cos(\delta_2 + \theta_{12})}{|Z_{12}|} & \frac{V_1 \sin(\delta_2 + \theta_{12}) - 2V_2 \sin(\theta_{12}) - |Z_{12}| \omega c}{|Z_{12}|} \end{bmatrix} \quad (27)$$

La máxima transferencia de potencia ocurre cuando la matriz del Jacobiano es singular, asumiendo una línea ideal, la singularidad ocurre cuando:

$$2V_2 \cos(\delta_2) (1 - X_{12} \omega c) = V_1 \quad (28)$$

En forma general el sistema cumple con:

$$Q_2 = P_2 \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right) = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(-\delta_2) \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right) \quad (29)$$

La condición de máxima transferencia para cualquier factor de potencia de la carga, ocurre cuando:

$$V_2 = \frac{V_1 \cos(\delta_2) + V_1 \sin(\delta_2) \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right)}{1 - X_{12} \omega c} \quad (30)$$

Reemplazando la ecuación (30) en la ecuación (28), se obtiene:

$$\cos^2 \delta_2 + \cos \delta_2 \sin \delta_2 \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right) = \frac{1}{2} \quad (31)$$

Resolviendo esta ecuación, se tiene:

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right)^2} \cos(2\delta_2 - \phi) = 0 \quad (32)$$

El ángulo de máxima transferencia de potencia es:

$$\delta_2 = -\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (33)$$

Como se puede notar del desarrollo anterior, el ángulo de máxima transferencia de potencia es independiente de las características eléctricas de la línea. Por otra parte se puede notar que el voltaje de la barra de recepción es función de las características eléctricas y proporcional a la compensación paralelo aplicada en este terminal.

Para factores de potencia en atraso (cargas inductivas) no se puede obtener ángulos críticos más allá de 45° :

En la tabla 1, se puede ver claramente el efecto del factor de potencia de la carga y de la compensación paralelo en las condiciones de máxima transferencia de potencia.

$\frac{\sin \phi}{\cos \phi}$	FP	$X_{12} \omega c$	Voltaje crítico en la barra de recepción	
-0.6	-0.86	0	1.015	-60.48°
		0.1	1.127	-60.48°
-0.3	-0.96	0.2	1.047	-53.35°
		0.3	1.196	-53.35°
0.0	1.00	0.2	0.884	-45.00°
		0.3	1.010	-45.00°
0.3	0.96	0.3	0.890	-36.65°
		0.4	1.039	-36.65°
0.7	0.82	0.3	0.805	-27.50°
		0.4	0.939	-27.50°

Tabla 1. Efecto del factor de potencia y de la compensación paralelo en el voltaje de máxima transferencia de potencia.

4.2.2 Determinación del ángulo crítico. Considerando la adición de un compensador sincrónico de capacidad máxima Q_{\max} en la barra de recepción, las ecuaciones del flujo de potencia por la línea y determinados en este terminal, están dados por:

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{|Z_{12}|} \sin(\delta_2 + \theta_{12}) - \frac{V_2^2}{|Z_{12}|} \cos(\theta_{12}) \quad (34)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2}{|Z_{12}|} \text{sen}(\delta_2 + \theta_{12}) - \frac{V_2^2}{|Z_{12}|} \text{sen}(\theta_{12}) + V_2^2 \omega c + Q_{\text{máx}} \quad (35)$$

Asumiendo también:

- 1) Línea sin pérdidas
- 2) ωc fijo determinado por la capacitancia de la línea.
- 3) Factor de potencia unitario en la carga, ($Q_2 = 0$).
- 4) Se desea mantener el control de voltaje en la barra de recepción ($V_2 = V_1$)

Cuando el compensador sincrónico llega a su límite máximo puede ser interpretado como una fuente fija de reactivos.

Cuando el condensador sincrónico ha llegado a su límite y manteniendo controlado el voltaje de barra de recepción ($V_2 = V_1$), el ángulo crítico está dado por:

$$\hat{\delta}_2 = -\cos^{-1} \left| 1 - X_{12} \omega c - \frac{X_{12}}{V_2^2} Q_{\text{máx}} \right| \quad (36)$$

Para incrementar el nivel de carga de la línea, es preciso analizar la posibilidad de lograr tal incremento sacrificando el control de voltaje en la barra de recepción ($V_2 \neq V_1$), para lo que se resuelve la siguiente expresión:

$$0 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos \delta_2 - \frac{V_2^2}{X_{12}} |1 - X_{12} \omega c| + Q_{\text{máx}} \quad (37)$$

y V_2 está dado por:

$$V_2 = \frac{V_1 \cos(\delta_2) + \sqrt{V_1^2 \cos^2(\delta_2) + 4 Q_{\text{máx}} X_{12} (1 - X_{12} \omega c)}}{2(1 - X_{12} \omega c)} \quad (38)$$

Igualando la ecuación 38 con la condición de V_2 para máxima transferencia de potencia con c fijo (28), el ángulo de máxima transferencia se lo determina con la siguiente ecuación:

$$\delta_2^* = -\cos^{-1} \frac{V_1}{\sqrt{2V_1^2 + 4Q_{\text{máx}} X_{12} (1 - X_{12} \omega c)}} \quad (39)$$

El cálculo del ángulo crítico puede resumirse en:

$$\delta_{2c} = \begin{cases} -90^\circ & \text{Si } Q_{\text{máx}} > V_1^2 \left(\frac{1}{X_{12}} - \omega c \right) \\ \text{Máx } \left\{ |\delta_2^*|, |\hat{\delta}_2| \right\} & \text{Si } Q_{\text{máx}} < V_1^2 \left(\frac{1}{X_{12}} - \omega c \right) \end{cases} \quad (40)$$

En la tabla 2, se presenta el efecto del compensador sincrónico en el ángulo de máxima transferencia de potencia.

X_{12} p.u.	0.1	0.1	0.1	0.1
ωc p.u.	1.0	1.0	3.0	1.0
$Q_{\text{máx}}$ p.u.	0.0	2.0	2.0	3.0
V_1 p.u.	1.0	1.0	1.0	1.0
$\hat{\delta}_2$ °	-25.84°	-45.57°	-60°	-53.13°
δ_2^* °	-45°	-52.67°	-51.32°	-55.26°
δ_{2c} °	-45°	-52.67°	-60°	-55.26°
V_2 con Q límite p.u.	1.0	1.0	1.0	1.0
V_2 con δ_{2c} p.u.	0.785	0.916	1.0	0.975
P_2 con Q límite p.u.	4.36	7.14	8.66	8.0
P_2 con δ_{2c} p.u.	5.55	7.28	8.66	8.01

Tabla 2. Condiciones críticas de operación con soporte finito y continuamente variable de potencia reactiva.

Conforme se incrementa la potencia máxima del compensador sincrónico, $Q_{\text{máx}}$, se extiende el desplazamiento angular y aumenta el nivel de voltaje en la barra de recepción, resultando en incrementos de la potencia en condiciones de máxima transferencia. Pudiéndose llegar a tener un desplazamiento angular de 90° , con un adecuado soporte de potencia reactiva. ^[1]

5. DETERMINACION DEL MINIMO SOPORTE DE REACTIVOS

Se presenta un método de cálculo para encontrar los efectos del soporte limitado de potencia reactiva sobre la potencia transferida y el margen de estabilidad.

A continuación se detalla el algoritmo para la determinación del mínimo soporte de potencia reactiva, ubicada en la barra de recepción de la línea, para conseguir niveles aceptables de voltaje y márgenes especificados de estabilidad en estado estable.

Para la formulación del problema se consideran:

Líneas de transmisión ideales, $|Z_{12}| = jX_{12}$.

Carga con factor de potencia unitario, ($Q_2 = 0$).

Permitir en lo posible un perfecto control de voltaje en la barra de recepción, $V_2 = V_1$.

Soporte de potencia reactiva sin restriccion sobre el limite inferior.

Para la solucion del algoritmo se necesita contar con los siguientes datos:

Caracteristicas electricas de la linea, (X_{12} , ωc).

Potencia de operacion estable, P_2^0 .

Margen deseado de estabilidad en estado estable en la operacion, (MEd).

Voltaje de la barra de envio de la linea, (V_1).

Mínimo voltaje admisible en la barra de recepcion, (V_2L).

La solucion del problema se obtiene al determinar:

El soporte mínimo de potencia reactiva para conseguir:

El voltaje de operacion estable dentro de un rango aceptable ($V_2L < V_2^0 < V_1$).

El voltaje de operacion máximo dentro del mismo rango aceptable ($V_2L < V_2 \text{ máx} < V_1$).

El margen de estabilidad en estado estable mayor o igual que el deseado.

El punto de operacion de la linea V_2^0 , δ_2^0 , P_2^0 , ME⁰.

El punto de operacion que permite contar con el margen deseado de estabilidad en estado estable $V_2 \text{ máx}$, $\delta_2 \text{ máx}$, $P_2 \text{ máx}$.

El punto de máxima transferencia de potencia: V_2c , δ_2c , P_2c .

5.1 Algoritmo

Para la solucion del algoritmo, se desarrolla un proceso de cálculo realizado en diez pasos:

- 1) Se determina en este paso si la potencia de operacion estable admite solucion

si $P_2^0 > \frac{V_1^2}{X_{12}}$ no hay solucion posible

- 2) Se determina si el margen de estabilidad es mayor, igual o menor que el deseado.

$$P_2 \text{ máx} = P_2^0 \left(\frac{100}{100 - \text{MEd}} \right) \quad (41)$$

Si $P_2 \text{ máx} > \frac{V_1^2}{X_{12}}$ Margen de estabilidad menor al deseado con $\delta_2c = -90^\circ$ (sigue en el paso 3).

Si $P_2 \text{ máx} < \frac{V_1^2}{X_{12}}$ Margen de estabilidad mayor o igual que el deseado. (sigue en el paso 4).

- 3) Se encuentra solucion con un margen de estabilidad menor o a lo sumo igual al deseado con:

$$V_2c = V_2 \text{ máx} = V_1$$

$$\delta_2c = \delta_2 \text{ máx} = -90^\circ$$

$$P_2 \text{ máx} = P_2c$$

$$V_2^0 = V_1$$

$$\delta_2^0 = -\text{sen}^{-1} \left(\frac{P_2^0 X_{12}}{V_1^2} \right) \quad (42)$$

$$\text{ME}^0 = \left(1 - \frac{P_2^0}{P_2c} \right) 100$$

$$\text{mín } Qc = \frac{V_1^2}{X_{12}} (1 - X_{12} \omega c) \quad (43)$$

- 4) Se determina el voltaje crítico con el cual se puede transmitir $P_2 \text{ máx}$, para lo que se resuelve las ecuaciones siguientes:

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{sen}(\delta_2) \quad (44)$$

y

$$2V_2 \cos(\delta_2)(1 - X_{12} \omega c) = V_1 \quad (45)$$

Siendo el voltaje crítico $V_2c \text{ME}$, dado por la siguiente expresion:

$$V_2c \text{ME} = \sqrt{\left(\frac{P_2 \text{ máx} X_{12}}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_1}{2(1 - X_{12} \omega c)} \right)^2} \quad (46)$$

Si $V_2c \text{ME} \geq V_2^0$, la cargabilidad de la linea está limitado por el criterio de estabilidad en estado estable.

Luego el voltaje $V_2 \text{ máx} = V_2c = V_1$ (sigue en el paso 5).

Si $V_2L < V_2c \text{ME} < V_1$, la cargabilidad de la linea está limitada por el criterio de estabilidad en estado estable.

Luego el voltaje $V_2 \text{ máx} = V_2c = V_2c \text{ME}$ (sigue en el paso 6).

Si $V_2c \text{ME} < V_2L$, la cargabilidad de la linea está limitado por el criterio de caída de voltaje.

El sistema debe forzarse a trabajar con $V_2 \text{ máx} = V_2L$. (sigue en el paso 7).

- 5) Se determina el punto de operacion máxima, que coincide con el punto de máxima transferencia de potencia, con:

$$V_2 \text{ máx} = V_2c = V_1$$

$$\delta_2 \text{ máx} = \delta_2c = -\text{sen}^{-1} \left(\frac{P_2 \text{ máx} X_{12}}{V_1^2} \right) \quad (47)$$

$$P_2c = P_2 \text{ máx}$$

$$\min Q_c = \frac{V_1^2}{X_{12}} (1 - X_{12} \omega c - \cos \delta_{2c}) \quad (48)$$

(sigue en el paso 8).

- 6) Se determina el punto de operación máxima y punto de operación crítica, que también coincide:

$$V_{2m\acute{a}x} = V_{2c} = V_{2cME}$$

$$P_{2m\acute{a}x} = P_{2c}$$

$$\delta_{2m\acute{a}x} = \delta_{2c} = -\text{sen}^{-1} \left(\frac{P_{2m\acute{a}x} X_{12}}{V_1 V_{2cME}} \right) \quad (49)$$

$$\min Q_c = \frac{V_{2cME}^2}{X_{12}} (1 - X_{12} \omega c) - \frac{V_1 V_{2cME}}{X_{12}} \cos(\delta_{2m\acute{a}x}) \quad (50)$$

(sigue en el paso 8).

- 7) Se determina los puntos de operación máxima:

El punto de operación máxima está dado por:

$$V_{2m\acute{a}x} = V_{2L}$$

$$\delta_{2m\acute{a}x} = -\text{sen}^{-1} \left(\frac{P_{2m\acute{a}x} X_{12}}{V_1 V_{2L}} \right) \quad (51)$$

$$\min Q_c = \frac{V_{2L}^2}{X_{12}} (1 - X_{12} \omega c) - \frac{V_1 V_{2L}}{X_{12}} \cos(\delta_{2m\acute{a}x}) \quad (52)$$

El punto crítico de operación está dado por:

$$\delta_{2c} = -\text{cos}^{-1} \frac{V_1}{\sqrt{2V_2^2 + 4 \min Q_c X_{12} (1 - X_{12} \omega c)}} \quad (53)$$

$$V_{2c} = \frac{V_1 \cos(\delta_{2c}) + \sqrt{V_1^2 \cos^2(\delta_{2c}) + 4 \min Q_c X_{12} (1 - X_{12} \omega c)}}{2(1 - X_{12} \omega c)} \quad (54)$$

$$P_{2c} = \frac{V_1 V_{2c}}{X_{12}} \text{sen}(-\delta_{2c}) \quad (55)$$

(sigue en el paso 8).

- 8) Se investiga la posibilidad de operar a la línea en estado estable con perfecto control de voltaje, con lo que el punto de separación requerido está dado por:

$$V_2^0 = V_1$$

$$\delta_{2R}^0 = -\text{sen}^{-1} \left(\frac{P_2^0 X_{12}}{V_1^2} \right) \quad (56)$$

$$Q_R^0 = \frac{V_1^2}{X_{12}} (1 - X_{12} \omega c - \cos(\delta_{2R}^0)) \quad (57)$$

Si $Q_R^0 < \min Q_c$, entonces $V_2^0 = V_1$

(sigue en el paso 9).

Si $Q_R^0 > \min Q_c$, entonces el voltaje de operación es diferente del voltaje de la barra de envía, asumiendo que todo el soporte de potencia reactiva, $\min Q_c$, se utiliza en el punto de operación normal (sigue en el paso 10).

- 9) Se determina el punto de operación estable con $V_2^0 = V_1$, por lo que:

$$V_2^0 = V_1$$

$$\delta_2^0 = -\text{sen}^{-1} \left(\frac{P_2^0 X_{12}}{V_1^2} \right) \quad (58)$$

$$Q^0 = \frac{V_1^2}{X_{12}} (1 - X_{12} \omega c - \cos(\delta_2^0)) \quad (59)$$

$$ME^0 = \left(1 - \frac{P_2^0}{P_{2c}} \right) 100$$

(termina el estudio)

- 10) Se evalúa el punto de operación estable con: $\min Q_c = Q^0$, con lo cual se tiene:

$$\delta_2^0 = \frac{1}{2} \left(\text{tg}^{-1} \left[\frac{P_2^0}{\min Q_c} \right] - \text{cos}^{-1} \left[\frac{\min Q_c V_1^2 - 2 X_{12} P_2^0 (1 - X_{12} \omega c)}{V_1^2 \sqrt{(\min Q_c)^2 + P_2^0}} \right] \right) \quad (60)$$

$$V_2^0 = \frac{P_2^0 X_{12}}{V_1 \text{sen}(\delta_2^0)} \quad (61)$$

$$Q^0 = \min Q_c$$

$$ME^0 = \left(1 - \frac{P_2^0}{P_{2c}} \right) 100 \quad (\text{termina el estudio})$$

5.2 Diagrama de flujo

El procedimiento requerido para los cálculos se presentan en el siguiente diagrama.

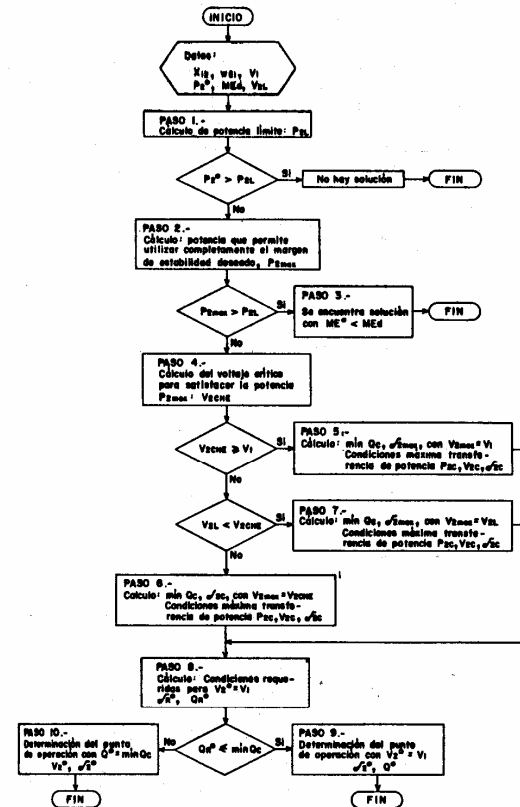


Fig. 12 Diagrama de flujo del algoritmo "Determinación del Mínimo Soporte de Potencia Reactiva."

5.3 Ejemplo de aplicación

En la siguiente tabla se presenta como ejemplos del algoritmo para la determinación del mínimo soporte de potencia reactiva, el análisis de una línea de transmisión

sin pérdidas, reactancia serie $X_{12} = j0.1$, a la que se la hace operar con 30% de margen de estabilidad y 1.0 p.u. de voltaje en la barra de envío.

P_2^0	V_2L	wc	$P_{2m\acute{a}x}$	$V_{2m\acute{a}x}$	$\delta_{2m\acute{a}x}$	$m\acute{i}nQc$	δ_{2c}	V_{2c}	P_{2c}	δ_2^0	V_2^0	Q^0	ME^0
p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.	grados	p.u.	grados	p.u.	p.u.	grados	p.u.	p.u.	%
3.0	0.90	0.0	4.29	0.90	-28.44	0.19	-46.03	0.72	5.18	-18.01	0.97	0.19	42.1
3.0	0.95	0.0	4.29	0.95	-26.82	0.55	-47.83	0.74	5.52	-17.46	1.00	0.46	45.7
3.0	0.95	1.0	4.29	0.95	-26.82	-0.36	-43.04	0.76	5.19	-17.46	1.00	-0.54	42.2
4.0	0.90	0.0	5.71	0.90	-39.41	1.15	-50.38	0.78	6.04	-23.58	1.00	0.83	33.8
4.0	0.90	1.0	5.71	0.90	-39.41	0.34	-46.64	0.81	5.88	-23.58	1.00	-0.17	32.0
4.0	0.95	0.0	5.71	0.95	-36.98	1.44	-51.45	0.80	6.27	-23.58	1.00	0.83	36.2
5.0	0.90	0.0	7.14	0.90	-52.53	2.62	-55.07	0.87	7.16	-30.00	1.00	1.34	30.2
5.0	0.95	0.0	7.14	0.95	-48.75	2.76	-55.42	0.88	7.25	-30.00	1.00	1.34	31.1
5.0	0.95	1.0	7.14	0.95	-48.75	1.86	-52.26	0.91	7.18	-30.00	1.00	0.34	30.3
6.0	0.95	0.0	8.57	0.99	-59.74	4.85	-59.74	0.99	8.57	-36.87	1.00	2.00	30.0
6.0	0.95	1.0	8.57	1.00	-59.00	3.85	-59.00	1.00	8.57	-36.87	1.00	1.00	30.0
6.0	0.95	2.0	8.57	1.00	-59.00	2.85	-59.00	1.00	8.57	-36.87	1.00	0.00	30.0
7.0	0.95	0.0	10.00	1.00	-90.00	10.00	-90.00	1.00	10.00	-44.43	1.00	2.86	30.0
7.0	0.95	1.0	10.00	1.00	-90.00	9.00	-90.00	1.00	10.00	-44.43	1.00	1.86	30.0
7.0	0.95	2.0	10.00	1.00	-90.00	8.00	-90.00	1.00	10.00	-44.43	1.00	0.86	30.0
8.0	0.95	2.0	11.43	1.00	-90.00	8.00	-90.00	1.00	10.00	-53.13	1.00	2.00	20.0
9.0	0.95	2.0	12.86	1.00	-90.00	8.00	-90.00	1.00	10.00	-64.16	1.00	3.64	10.0
10.0	0.95	2.0	14.29	1.00	-90.00	8.00	-90.00	1.00	10.00	-90.00	1.00	8.00	0.0
12.0	0.95	2.0											

N O H A Y S O L U C I O N

Tabla 3. Ejemplo de Aplicación del Algoritmo "Determinación del Mínimo Soporte de Potencia Reactiva"

6. APLICACIONES

El programa digital que resuelve el algoritmo para la determinación de potencia reactiva se aplica en los puntos de operación de la curva de cargabilidad obtenida para la línea de 230 KV con las impedancias terminales propias del sistema y en las condiciones de operación de la línea Paute-Pascuales.

reserva infinita de reactivos; en esta aplicación se evalúa y demuestra la factibilidad de alcanzar los niveles de la curva de cargabilidad de líneas con reserva finita de reactivos.

6.1 Determinación de la potencia reactiva para la curva de cargabilidad

En el desarrollo de las características de cargabilidad se consideró que la condición de máxima transferencia se lo obtiene siempre con un desplazamiento angular de 90°, la misma que es posible considerando al sistema con

El análisis se lo realiza para la línea de 230 KV, ejemplificada por los parámetros de la línea Paute - Pascuales y con las mismas restricciones realizadas en la obtención de la curva real de cargabilidad, Fig.6. Los requerimientos de reactivos se hallan para dos condiciones de carga: puntos normales y puntos máximos de operación, y los resultados se presentan en la tabla 4.

L Km	P_2^0/SIL	P_2^0 p.u.	$V_{2m\acute{a}x}$ p.u.	$\delta_{2m\acute{a}x}$ grados	$P_{2m\acute{a}x}$ p.u.	$m\acute{i}nQc$ p.u.	δ_{2c} grados	V_{2c} p.u.	P_{2c} p.u.	ME^0 %	V_2^0 p.u.	δ_2^0 grados	Q^0 p.u.
80	1.81	4.95	0.95	-20.03	7.62	0.09	-45.21	0.71	11.87	58.30	0.99	-12.37	0.09
160	1.23	3.37	0.95	-24.92	5.18	0.26	-46.10	0.74	6.88	51.06	1.00	-15.08	0.15
240	1.05	2.87	0.95	-32.30	4.42	0.47	-47.64	0.78	5.03	42.90	1.00	-19.27	0.04
320	0.98	2.68	0.95	-41.02	4.12	0.69	-49.59	0.85	4.27	37.22	1.00	-23.91	-0.03
400	0.90	2.46	0.95	-47.78	3.78	0.74	-50.53	0.91	3.80	35.21	1.00	-27.21	-0.16
480	0.85	2.33	1.00	-51.35	3.58	0.81	-51.35	1.00	3.58	35.00	1.00	-30.49	-0.28
560	0.78	2.13	1.00	-54.57	3.28	0.62	-54.57	1.00	3.28	35.00	1.00	-31.98	-0.47
640	0.72	1.97	1.00	-56.58	3.03	0.38	-56.58	1.00	3.03	35.00	1.00	-32.86	-0.67
720	0.67	1.83	1.00	-57.64	2.82	0.12	-57.64	1.00	2.82	35.00	1.00	-33.30	-0.89
800	0.64	1.75	1.00	-59.62	2.69	-0.08	-59.62	1.00	2.69	35.00	1.00	-34.11	-1.09
880	0.61	1.67	1.00	-60.02	2.57	-0.35	-60.02	1.00	2.57	35.00	1.00	-34.26	-1.32
960	0.60	1.64	1.00	-62.32	2.53	-0.52	-62.32	1.00	2.53	35.00	1.00	-35.14	-1.53

Tabla 4. Requerimientos mínimos de potencia reactiva para la curva real de cargabilidad de la línea de 230KV, $\Delta V = 5\%$, $ME = 35\%$, S. base = 100 MVA

A continuación se grafican los requerimientos mínimos de potencia reactiva para las condiciones normales y máximas de operación en función de la longitud.

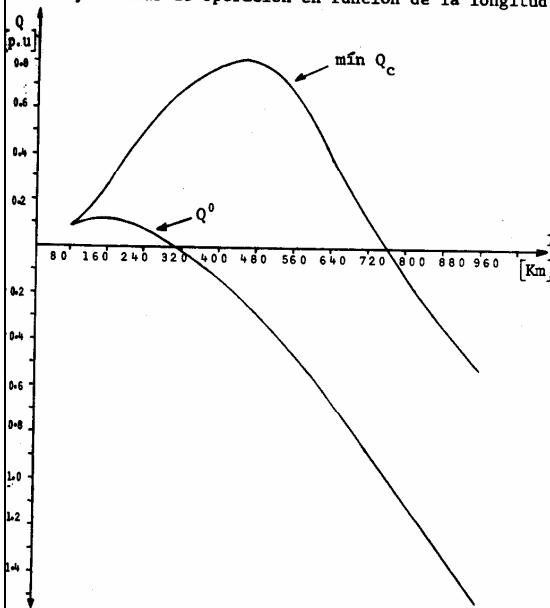


Fig. 13 Requerimientos normales y máximos de potencia reactiva en función de la longitud de la línea.

La potencia reactiva, Q° , para la condición normal, necesaria para transmitir P_2^g , disminuye conforme se reduce la potencia transmitida. Esta reducción es más notoria a partir de los 280 Km, a pesar de que a partir de esta longitud los cambios en los niveles de cargabilidad no varían mayormente, por lo que la reducción de la potencia reactiva requerida es función inversa del efecto de las capacitancias de la línea [1].

El soporte mínimo de potencia reactiva, $\text{mín} Q_c$, necesario para alcanzar la potencia con el margen deseado de estabilidad, $P_2^{\text{máx}}$, ejerciendo control de voltaje en la barra de recepción, se incrementa a partir de los 80 Km alcanzando su máximo alrededor de los 480 Km, longitud hasta la que el criterio de caída de voltaje es el factor más restrictivo. En este rango de longitudes la potencia reactiva es utilizada para permitir el desplazamiento angular deseado y el control de voltaje en la barra de recepción de la línea. Para longitudes mayores, el soporte necesario de reactivos va disminuyendo, debido a que se lo utiliza solamente para permitir el desplazamiento angular de esta condición de carga, ya que el factor más restrictivo es el margen de estabilidad.

Mientras más alto es el nivel de voltaje, mayor es el soporte de potencia reactiva requerido para cumplir con las curvas de cargabilidad y por ende para su operación [1].

6.2 Determinación de la potencia reactiva para la operación de la línea PAUTE - PASCUALES

Se aplica el algoritmo de la determinación de potencia reactiva para encontrar las reser-

vas necesarias de reactivos en la operación de la línea PAUTE - PASCUALES, con distintas caídas de voltaje y márgenes de estabilidad, considerando un voltaje de 1.05 en el terminal de envío. Los parámetros eléctricos de la línea se describen en 3.1, y se asume una longitud de 187 Km aproximadamente, debido a que no se considera la subestación ni la carga conectada en Milagro. En los gráficos siguientes se presentan los requerimientos normales y máximos de potencia reactiva, para distintas condiciones estables de transmisión de potencia.

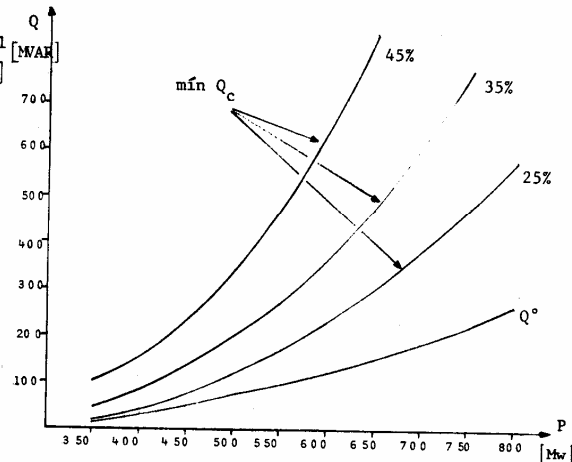


Fig. 14 Requerimientos mínimos de potencia reactiva para la operación de la línea Paute-Pascuales, con $V_1 = 1.05$ p.u., $\Delta V = 5\%$ y $ME = 25\%, 35\%, 45\%$.

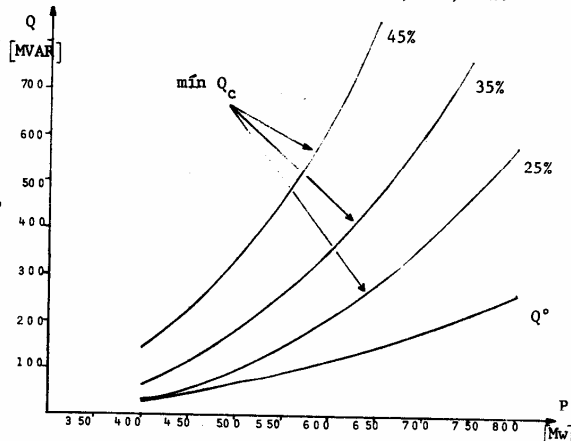


Fig. 15 Requerimientos mínimos de potencia reactiva para la operación de la línea Paute-Pascuales, con $V_1 = 1.05$ p.u., $\Delta V = 8\%$ y $ME = 25\%, 35\%, 45\%$.

La potencia reactiva necesaria para operar la línea es menor mientras más bajo es el margen deseado de estabilidad en la transmisión. Con el incremento del voltaje de la barra de envío se consigue elevar la potencia máxima a ser transferida por la línea, manteniendo constante el margen de estabilidad, lo cual repercute en una elevación de la potencia de operación normal. En bajos niveles de potencia transferida, con el incremento de caída de voltaje se reducen los requerimientos de potencia reactiva en las condiciones de carga analizadas.

7. CONCLUSIONES

Al término cargabilidad de líneas de transmisión se le puede generalizar a todos los niveles de voltaje de transmisión con la siguiente definición de ser la capacidad de una línea para transportar potencia sujeta a un conjunto de criterios de funcionamiento: caída de voltaje y margen de estabilidad, a asunciones de los parámetros del sistema y a la reserva de potencia requerida para la operación.

La curva de cargabilidad, expresada en por unidad del SIL, se la puede considerar independiente de los parámetros de la línea, y para un cierto grupo de asunciones de los parámetros del sistema y de los criterios de operación, es también independiente del nivel de voltaje.

La restricción de caída de voltaje, con márgenes adecuados de estabilidad (20% - 40%), presenta mayor influencia en líneas de longitudes cortas y medias, hasta 480 kilómetros, aproximadamente. Existe una relación directa entre el criterio de caída de voltaje y su zona de influencia.

La restricción del margen de estabilidad, con caídas moderadas de voltaje (4% - 6%), influyen predominantemente en líneas de longitudes largas, superiores a los 480 kilómetros, aproximadamente. En este caso, existe una relación inversa entre el criterio del margen de estabilidad y su zona de influencia.

Por efecto del cambio en los criterios de caída de voltaje, solidez del sistema e incluso del margen de estabilidad, y por el cambio de la potencia reactiva inyectada en el terminal de recepción, se produce variaciones en los niveles de cargabilidad más significativas en líneas cortas y medias que en largas.

La restricción del margen de estabilidad en estado estable basada en la curva de cargabilidad de St. Clair o su equivalente obtenido de desarrollado analíticamente, únicamente se aplica cuando se dispone de una gran cantidad de reserva de reactivos, capaz de permitir la transferencia de potencia que alcance un desplazamiento angular crítico de 90° a lo largo de la línea y sus sistemas terminales.

Debido a la marcada influencia del soporte finito de potencia reactiva en la determinación de los límites de cargabilidad se pueden conseguir desplazamientos angulares críticos a lo largo de la línea menores a 90°.

El comportamiento de los requerimientos de potencia reactiva en función de la potencia transmitida a la carga, expresado en por unidad de SIL, es similar e independiente de la longitud y del nivel de voltaje, como se concluye de los resultados de los algoritmos realizados. Cuando la línea alimentada a una carga mayor o menor que su SIL, se necesita inyectar o absorber reactivos, según sea el caso; pero si la carga tiene un valor igual a 1.0 SIL, la potencia reactiva generada en las capacitancias propias de la línea satisface el consumo de la parte inductiva de la misma.

La reserva de reactivos debe ser capaz de ejercer control de voltaje en condiciones de operación mayores a los nominales. Es decir que

el mínimo soporte de potencia reactiva debe ser mayor que el necesario para satisfacer el punto máximo del margen deseado de estabilidad en estado estable.

Si una línea con control de voltaje en su terminal de recepción alcanza el punto de máxima transferencia de potencia cuando se encuentra en el límite de la reserva de potencia reactiva, el desplazamiento angular puede quedar por debajo de su valor crítico.

APENDICE

EFEECTO DE LONGITUD, POTENCIA, Y FACTOR DE POTENCIA EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN SIN COMPENSACION

Se considera una línea de transmisión con control de voltaje únicamente en la barra de envío, en la cual se analiza la conducta natural, los efectos del factor de potencia y la longitud de la línea en las condiciones de operación. Con una potencia de carga $P_2 + jQ_2$ y un voltaje de envío $V_1|_0$, el sistema debe cumplir con:

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{sen}(-\delta_2) \quad (A1)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{cos}(-\delta_2) - \frac{V_2^2}{X_{12}} + V_2^2 \omega c \quad (A2)$$

$$\text{Factor de potencia} = \text{cos} \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{Q_2}{P_2} \right) \right] \quad (A3)$$

despejando Q_2 , se tiene:

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{sen}(-\delta_2) \frac{\text{sen} \phi}{\text{cos} \phi} \quad (A4)$$

igualando las expresiones de Q_2 y agrupando términos,

$$\frac{V_1 V_2}{\text{cos} \phi} [\text{cos}(\delta_2 - \phi)] = V_2^2 (1 - X_{12} \omega c) \quad (A5)$$

Con lo que el voltaje de recepción y la potencia activa de la carga están dados por:

$$V_2 = \frac{V_1 \text{cos}(\delta_2 - \phi)}{\text{cos} \phi (1 - X_{12} \omega c)} \quad (A6)$$

$$P_2 = \frac{V_1^2 \text{sen}(2\delta_2 - \phi)}{2 \text{cos} \phi (1 - X_{12} \omega c)} \quad (A7)$$

Fijando V_1 y ϕ , la potencia P_2 y el voltaje V_2 son función únicamente del desplazamiento angular a lo largo de la línea.

La condición de máxima transferencia se obtiene al encontrar el máximo de P_2 en función de δ_2 :

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = - \frac{V_1^2}{\text{cos} \phi [1 - X_{12} \omega c]} \text{cos}(2\delta_2 - \phi) = 0 \quad (A8)$$

El ángulo de máxima transferencia de potencia, es:

$$\text{cos}(2\delta_2 - \phi) = 0 \quad (A9)$$

$$\delta_{2c} = -\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (A10)$$

De esta forma simple se demuestra que la condición de máxima transferencia de potencia, ecuación A 10 igual a la obtenida en 3.2.1, se alcanza cuando la matriz del Jacobiano (26) es singular.

Aplicando el análisis anterior en la línea de transmisión Paute-Pascuales, del Sistema Nacional Interconectado, operando a doble circuito, cuyas características eléctricas están dadas en 3.1, se obtienen los resultados descritos en los gráficos siguientes:

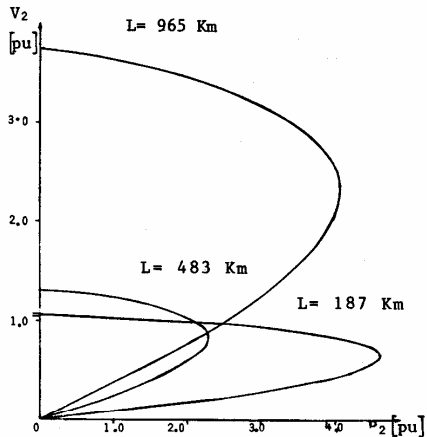


Fig. A 1. Efecto de la longitud y carga con factor de potencia 0.95 en atraso, en la línea de 230 KV, sin compensación, $S_B = 100$ MVA $V_1 = 1.05$ p.u.

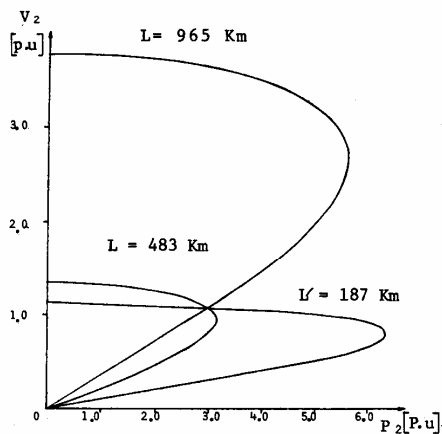


Fig. A 2. Efecto de la longitud y carga con factor de potencia 1.0, en la línea de 230 KV, sin compensación, $S_B = 100$ MVA $V_1 = 1.05$ p.u.

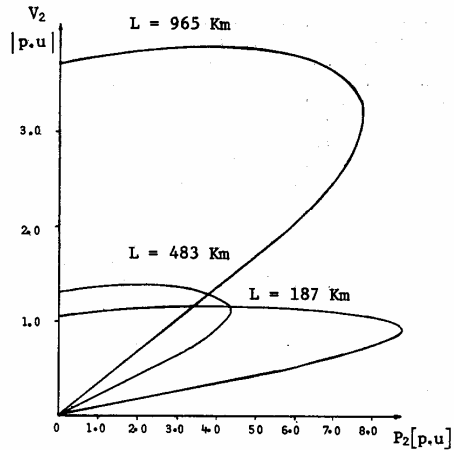


Fig. A 3. Efecto de la longitud y carga con factor de potencia 0.95 en adelante, en la línea de 230 KV, sin compensación $S_B = 100$ MVA, $V_1 = 1.05$ p.u.

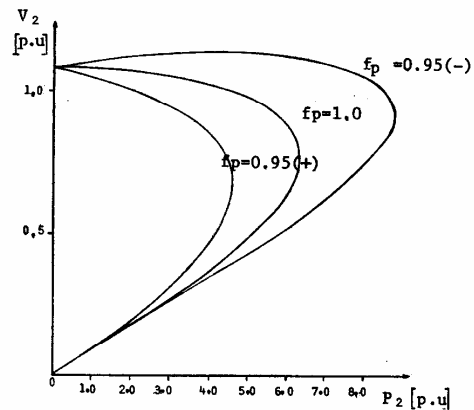


Fig. A 4. Efecto del factor de potencia, en la línea de 230 KV, sin compensación, longitud igual a 187 Km, $S_B = 100$ MVA $V_1 = 1.05$ p.u.

Con el incremento de la longitud de la línea, los voltajes de recepción crecen, por cuanto a mayor longitud se tiene mayor capacitancia y por ello mayor soporte natural de reactivos.

La magnitud de la potencia máxima a ser transferida por la línea es función de su longitud, para un mismo factor de potencia. La misma que está determinada por el nivel de voltaje que se alcanza en la barra de recepción y de la reactancia serie de la línea. El desplazamiento angular de máxima transferencia es función únicamente del factor de potencia.

Para factor de potencia unitario, las curvas potencia - voltaje se cortan en el punto de potencia igual a 1.0 SIL, con igual voltaje en las barras de envío y recepción.

Con el incremento de la longitud, se aprecia más sensiblemente la variación del voltaje con la potencia de carga. A medida que la línea es más larga, aumenta la necesidad de contar con control de voltaje en el terminal de recepción.

Cuando una línea abastece cargas con diversos factores de potencia, se concluye que:

Cargas con factores de potencia en atraso producen una paulatina reducción del voltaje de recepción con el incremento de la potencia de carga.

Cargas con factores de potencia en adelanto, producen una elevación del voltaje de recepción con el incremento de la potencia de carga.

Las potencias de transferencia se incrementan con la elevación del voltaje de envío de la línea.

- 6) E. Kimbark, "A New Look At Shunt Compensations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, January, 1983, pp. 212-218.
- 7) S. Linke, "Surge Impedance Loading and Power Transmission Capability Revisited", IEE PES Winter Meeting, A 77 249-6, New York, Jan. 30-Feb. 4, 1977, pp. 1-6.
- 8) T.J.E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", John Willey & Sons, New York, 1982.
- 9) F.D. Galiana, "Power Voltage Limitations Imposed by the Network Structure of a Power System", Proceedings of the 1975 Power Industry Computer Applications(PICA) Conference, June, 1975, pp. 355-363.
- 10) F. Ruiz, "Programa Digital Para Calcular la cargabilidad de una Línea de Transmisión Mediante un Modelo Matemático", Anales de las Jornadas de Ingeniería Eléctrica, Vol. 1, 1980.

REFERENCIAS

- 1) N. Noboa, "Influencia del Soporte de Potencia Reactiva en la Cargabilidad de Líneas de Transmisión", Escuela Politécnica Nacional, Tesis de Grado, Quito, Marzo, 1985.
- 2) E. Clarke, S.B. Crary, "Stability Limitations of Long Distance A-C Power Transmission Systems", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 60, 1941, pp. 1051-9, 1299-1303.
- 3) H.P. St. Clair, "Practical Concepts in Capability and Performance of Transmission Lines", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.72,1953,pp.1152-1157.
- 4) R.D. Dunlop, R. Gutman, P.P. Marchenko, "Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, 1979, pp. 606-617.
- 5) T.W. Kay, P.W. Sauer, R.D. Shultz, R. A. Smith, "EHV and UHV Line Loadability Dependence on Var Suply Capability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, September, 1982, pp. 3568 - 3575,

BIOGRAFIAS



Napoleón Noboa G. Nació en Quito, Ecuador, el 31 de Julio de 1959. Obtuvo su título de Bachiller en el Colegio Municipal Sebastián de Benalcázar en Julio de 1977. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, en donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en Marzo de 1985.



Jesús Játiva I. Nació en Atuntaqui, Imbabura, el 8 de Noviembre de 1957. Obtuvo su título de Bachiller en el Colegio Nacional Mejía en Julio de 1975. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, en donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en Diciembre de 1981. Desde su incorporación hasta la presente fecha ha trabajado como Profesor a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la E.P.N.

El Ingeniero Játiva es un profesional registrado en el Colegio de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos de Pichincha, CIEEPI y es un miembro de The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE.