

Estudio de la variación de la estabilidad de una línea simple al transformarla en dúplex (*)

Por L. GASPAR VEGA ARGÜELLES

Profesor de Sistemas Hidroeléctricos
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Santander

La transformación de líneas de transporte de energía eléctrica de alta tensión proyectadas como simples y convertidas a dúplex plantea una serie de problemas técnicos de natural repercusión económica, cuyo planteamiento y resolución se estudian en este artículo.

En el presente estudio se analizan una serie de circunstancias motivadas por la variación de los parámetros de una línea de transporte de energía eléctrica de alta tensión que en su día fue proyectada como una línea simple y que, por motivos de la demanda, años más tarde se decide su transformación a una línea dúplex.

Para lo cual hemos estimado conveniente analizar un caso concreto en donde el rigor de las cifras nos avalen los resultados que resumimos en las conclusiones.

En el desarrollo del método se ha seguido el siguiente proceso:

- a) Toma de datos de la línea simple y características del transporte.
- b) Determinación de los parámetros $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$ y $\dot{D}$ de la línea simple.
- c) Transformación a dúplex mediante cable idéntico al utilizado en la línea simple.
- d) Determinación de los parámetros $\dot{A}'$, $\dot{B}'$, $\dot{C}'$ y $\dot{D}'$ de la línea dúplex.
- e) Posibilidades del transporte en ambas líneas.
- f) Conclusiones.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de abril de 1984.

ESTUDIO DE LA VARIACION DE ESTABILIDAD DE UNA LINEA SIMPLE AL TRANSFORMARLA EN DUPLEX

1. Características de la línea simple

Disposición de los cables: en capa. Distancia entre cada dos fases: 10, 10 y 20 m. Tipo de conductor: ACSR. Denominación: «ÓRIOL». Composición: 30/7. Diámetro exterior: $\varnothing_{\text{ext.}} = 18,82$ mm. Radio medio geométrico: $D_{\text{SL}} = 7,77$ mm. Intensidad máxima permanente: 530 A.; $R_{\text{L}} = 0,1865$ Ohm/km.

2. Características del transporte

La longitud de la línea es de 400 km., con una tensión nominal de 220 kV en el extremo receptor.

Nos planteamos las siguientes cuestiones:

1. Si la carga absorbe la máxima intensidad permanente con factor de potencia igual a 0,85 en retraso, ¿qué potencia reactiva ha de inyectarse en la carga para que la tensión del extremo emisor no modifique su tensión a un valor superior en un 10 por 100 de la del receptor?

2. El valor de la potencia máxima que puede transportar la línea permaneciendo constantes las tensiones en los dos extremos e iguales a los del apartado anterior.

3. Determinación de los parámetros de la línea

Debemos puntualizar aquí que de la precisión con que se realicen los cálculos de los parámetros de la línea dependerá la fiabilidad de los resultados.

Coefficiente de autoinducción:

$$L = 2 \times 10^{-7} \times \ln(D_m/D_{sL}) =$$

$$= 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{(D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31})^{1/3}}{D_{sL}} =$$

$$= 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{\sqrt[3]{10 \times 10 \times 20}}{7,77 \times 10^{-3}} = 14,78 \times$$

$$\times 10^{-7} \text{ H/m} = \underline{1,478 \text{ mH/km.}}$$

Reactancia inductiva unitaria:

$$jX_L = j\omega L = j314 \times 1,478 \times 10^{-3} =$$

$$= \underline{0,464 / 90^\circ \text{ Ohm/km.}}$$

Impedancia unitaria:

$$\hat{Z} = 0,1865 + j0,464 = \underline{0,5004 / 68,11^\circ \text{ Ohm/km.}}$$

Impedancia total:

$$\hat{Z}_t = 400 \times 0,5004 / 68,11^\circ =$$

$$= \underline{200,17 / 68,11^\circ \text{ Ohm.}}$$

Capacidad de la línea:

$$C = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0}{\ln(D_m/D_{sc})} = \frac{0,055555}{\ln \frac{\sqrt[3]{10 \times 10 \times 20}}{9,41 \times 10^{-3}}} =$$

$$= \underline{0,007716 \mu\text{F/km.}}$$

Susceptancia capacitiva:

$$\dot{Y}_c = jB_c = j\omega C = j314 \times 0,007716 \times 10^{-6} =$$

$$= \underline{j2,4241 \mu\text{mhos/km.}}$$

Admitancia total:

$$\dot{Y}_t = \dot{Y}_c \times L = j2,4241 \times 400 = \underline{969,67 \times}$$

$$\times 10^{-6} / 90^\circ \text{ mhos.}$$

Angulo característico:

$$\theta^2 = \dot{Y}_t \times \hat{Z}_t = 969,67 / 90^\circ \times$$

$$\times 200,17 / 68,11^\circ = \underline{0,1941 / 158,11^\circ}$$

$$\theta = \underline{0,4405 / 79,05^\circ}$$

En función del ángulo característico determi-

namos el coseno hiperbólico de θ y el seno hiperbólico de θ dividido por θ .

$$\text{Ch}\theta = 0,912 / 2,2^\circ ; \frac{\text{Sh}\theta}{\theta} = 0,9702 / 0,7^\circ$$

Los parámetros de la línea serán:

$$\dot{A} = \dot{D} = \text{Ch}\theta = 0,912 / 2,2^\circ$$

$$\dot{B} = \hat{Z} \times (\text{Sh}\theta)/\theta = 200,17 / 68,11^\circ \times$$

$$\times 0,9702 / 0,7^\circ = \underline{194,20 / 68,81^\circ \text{ Ohm.}}$$

$$\dot{C} = \dot{Y}_t \times (\text{Sh}\theta)/\theta = 969,67 \times 10^{-6} \times$$

$$\times 0,9702 / 90^\circ + 0,7^\circ = \underline{940,77 \times 10^{-6} / 90,7^\circ \text{ mhos.}}$$

Sin compensador síncrono la tensión en el extremo emisor tendría que ser:

$$\dot{V}'_1 = \dot{A}\dot{V}_1 + \dot{B}\dot{I}_1$$

$$V'_1 = 220 / \sqrt{3} / 0^\circ \times 0,912 / 2,2^\circ + 194,2 / 68,81^\circ \times$$

$$\times 0,53 / -31,78^\circ = \underline{115,83 / 2,2^\circ +}$$

$$+ \underline{102,93 / 37,03^\circ} = \underline{208,76 / 18,55^\circ \text{ kV.}}$$

y la compuesta:

$$V' = \sqrt{3} V'_1 = \underline{361,6 \text{ kV}}$$

cuyo valor es inadmisible para el nivel de tensión de 220 kV.

Para determinar la potencia reactiva a inyectar por el compensador síncrono, no tendremos más que calcular el punto N de intersección del vector $\dot{B}\dot{I}_1$, cuyo argumento es $90^\circ + \beta$, con el L.G. de $\dot{V}'_1$. (Ver figura 1).

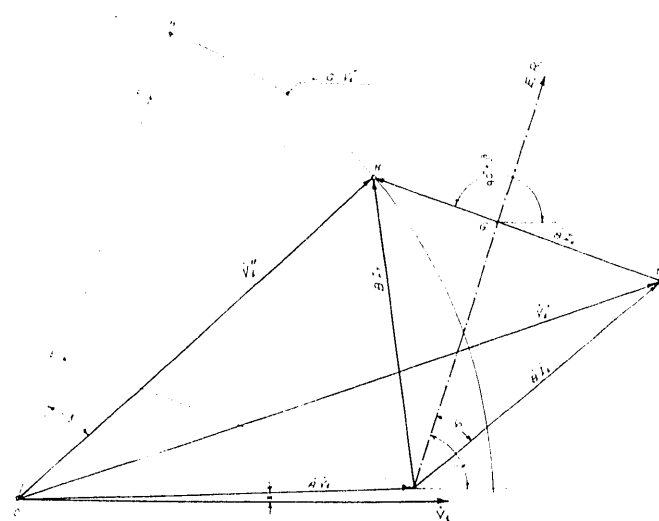


Figura 1.

VARIACION DE LA ESTABILIDAD DE UNA LINEA SIMPLE AL TRANSFORMARLA EN DUPLEX

Dicho L.G. tiene por radio:

$$V_1'' = 1,1 \times V_1 = 1,1 \times 220/\sqrt{3} = 139,71 \text{ kV}$$

Teniendo presente que el E.R. forma un ángulo de β con respecto al origen, el ángulo que forma la tensión V_1'' con el referido eje lo obtendremos de:

$$\cos \gamma = \frac{\overline{O-F}}{\overline{O-N}} = \frac{AV_1 \cos(\beta - \alpha) + BI_1 \cos \varphi}{V_1''} =$$

$$= (45,98 + 87,49)/139,71 = 0,96 \Rightarrow$$

por tanto:

$$\gamma = 17,19^\circ$$

el segmento

$$\overline{F-N} = V_1'' \times \sin \gamma = 139,71 \times$$

$$\times \sin(17,19^\circ) = 41,29 \text{ kV}$$

el

$$\overline{F-M} = \overline{F-G} + \overline{G-M} = AV_1 \times \sin(\beta - \alpha) + BI_1 \times$$

$$\times \sin \varphi = 115,83 \times \sin(66,61^\circ) + 102,93 \times$$

$$\times \sin(31,78^\circ) = 106,31 + 54,22 = 160,53 \text{ kV}$$

por tanto:

$$\overline{M-N} = \overline{F-M} - \overline{F-N} = 160,53 - 41,29 = 119,24 \text{ kV}$$

el vector $\dot{B}_c$ será:

$$\dot{B}_c = \overline{M-N} = 119,24/90^\circ + 68,81^\circ =$$

$$= 119,24/158,81^\circ \text{ kV}$$

con lo que la intensidad en el compensador es:

$$i_c = \frac{\overline{M-N}}{\dot{B}} = \frac{119,24/158,81^\circ}{194,20/68,81^\circ} =$$

$$= 0,614/90^\circ \text{ kA}$$

La potencia reactiva del compensador síncrono será:

$$Q_c = -j\sqrt{3}VI_c = -233,97/90^\circ \text{ MVAR}$$

Supongamos que la transformación de la línea a dúplex se realiza colocando un cable tipo ACSR idéntico al ya existente y separado 40 cm. (ver figura 2).

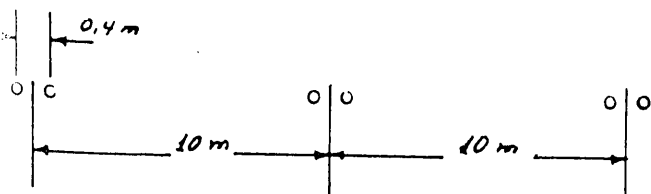


Figura 2.

Los nuevos parámetros de la línea son:

Coeficiente de autoinducción:

$$L' = 2 \times 10^{-7} \times \ln(D_m/D_{sl}) =$$

$$= 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}}{\sqrt{D_{sl} \times d}} =$$

$$= 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{\sqrt[3]{10 \times 10 \times 20}}{10^{-3} \sqrt{7,77 \times 400}} =$$

$$= 10,84 \times 10^{-7} \text{ H/m} = 1,084 \text{ mH/km.}$$

Reactancia inductiva unitaria:

$$jX_L = j\omega L' = j314 \times 1,084 \times 10^{-3} =$$

$$= 0,3405/90^\circ \text{ Ohm/km.}$$

Impedancia unitaria:

La resistencia óhmica será la mitad, por ser los dos conductores iguales y estar en paralelo.

$$R_{L'} = (1/2) R_L = (1/2) \times 0,1865 =$$

$$= 0,09325 \text{ Ohm/km.}$$

por lo que la impedancia unitaria será:

$$\dot{Z} = 0,09325 + j0,3405 =$$

$$= 0,3531/74,68^\circ \text{ Ohm/km.}$$

La impedancia total

$$\dot{Z}_t = \dot{Z} \times L = 0,3531/74,68^\circ \times 400 =$$

$$= 141,24/74,68^\circ \text{ Ohm.}$$

Si comparamos este resultado de la línea dúplex con el de la simple, vemos que es inferior en un 29,44 por 100 y no en un 50 por 100, como podría deducirse de un primer análisis simplista.

Por el contrario, el argumento de la línea dúplex se ha incrementado en 9,64 por 100 respecto de la simple; como veremos, esta situación afecta de forma decisiva a la estabilidad del transporte de energía.

La capacidad de la línea:

$$C' = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0}{\ln(D_m/D_{sc})} = \frac{0,055555}{\ln \frac{10 \times 10 \times 20}{10^{-3} \sqrt{9,41 \times 400}}} =$$

$$= 0,01043 \text{ F/km.}$$

VARIACION DE LA ESTABILIDAD DE UNA LINEA SIMPLE AL TRANSFORMARLA EN DUPLEX

La susceptancia capacitativa:

$$\dot{Y}_c = jB_c = j\omega C = j314 \times 0,01043 \times 10^{-6} = j3,2777 \mu\text{mhos/km.}$$

Y la admitancia total:

$$\dot{Y}_t = \dot{Y}_c \times L = (0 + jB_c) \times L = 1,311,10 \times 10^{-6} / 90^\circ \text{ mhos.}$$

Por tanto, el ángulo característico:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}' &= \dot{Y}_t \times \dot{Z}_t = 1,311 \times 10^{-3} \times \\ &\times 141,24 / 90^\circ + 74,68^\circ = 0,1851 / 164,68^\circ \\ \dot{\theta}' &= 0,4303 / 82,34^\circ \end{aligned}$$

Las funciones hiperbólicas complejas las obtendremos de forma análoga a la de la línea simple.

$$\text{El } \frac{\text{Sh} \dot{\theta}'}{\dot{\theta}'} = 0,9704 / 0,48^\circ$$

$$\text{y el } \text{Ch} \dot{\theta}' = 0,912 / 1,5^\circ$$

Por tanto, los parámetros de la nueva línea serán:

$$\dot{A}' = \dot{D}' = \text{Ch} \dot{\theta}' = 0,912 / 1,5^\circ$$

$$\dot{B}' = \dot{Z}_t \times \frac{\text{Sh} \dot{\theta}'}{\dot{\theta}'} = 141,24 \times$$

$$\times 0,9704 / 74,68^\circ + 0,48^\circ = 137,05 / 75,16^\circ \text{ ohm}$$

$$\dot{C}' = \dot{Y}_t \times \frac{\text{Sh} \dot{\theta}'}{\dot{\theta}'} = 1,311 \times 10^{-3} \times$$

$$\times 0,9704 / 90^\circ + 0,48^\circ$$

Supongamos que se pretende transportar la energía correspondiente a una intensidad doble de la permanente (1.060 A) y que permanecen constantes la tensión y el factor de potencia.

Para la tensión en el extremo emisor tendremos:

$$\dot{V}_t' = \dot{A}' \dot{V}_1 + \dot{B}' \dot{I}_1$$

$$\dot{V}_t' = \frac{220}{\sqrt{3}} \times 0,912 / 0^\circ + 1,5^\circ + 137,05 \times$$

$$\times 1,06 / 75,16^\circ - 31,78^\circ = 115,83 / 1,5^\circ + 145,27 / 43,38^\circ = 244,09 / 24,91^\circ \text{ kV}$$

y la compuesta:

$$V_{ct}' = \sqrt{3} V_t' = \sqrt{3} \times 244,09 = 422,77 \text{ kV}$$

El cálculo de la potencia reactiva necesaria para regular la tensión en el extremo emisor con el mismo porcentaje que en el caso de la línea simple nos obliga a seguir los mismo pasos desarrollados anteriormente.

Por tanto

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{\overline{O-F}}{\overline{O-N}} = \frac{A' V_1 \cos(\beta' - \alpha') + B' I_1 \cos \varphi}{V_t'} = \\ &= \frac{32,59 + 123,48}{139,71} = \frac{156,07}{139,71} > 1 \end{aligned}$$

lo cual nos dice que es imposible; ello es debido a que la potencia a transmitir es superior a la máxima definida por el límite de estabilidad permanente.

El valor de la potencia máxima que se puede transportar en la línea simple la obtendremos teniendo presente que:

$$\overline{E-H} = \overline{O-H} - \overline{O-E} = 139,71 - 45,98 = 93,73 \text{ kV}$$

$$\overline{E-H} = I_{mx} \cos \varphi_H \times B$$

y la componente activa de la corriente es:

$$I_{mx} \cos \varphi_H = \frac{\overline{E-H}}{B} = \frac{93,73}{194,2} = 0,4826 \text{ kA}$$

la potencia máxima:

$$\begin{aligned} P_{Hmx} &= \sqrt{3} V I_{mx} \cos \varphi_H = \sqrt{3} \times 220 \times \\ &\times 0,4826 = 183,91 \text{ MW.} \end{aligned}$$

Dicho valor máximo para la línea dúplex será (ver figura 3):

$$\begin{aligned} \overline{E'H'} &= \overline{O-H'} - \overline{O-E'} = 139,71 - 32,59 = \\ &= 107,12 \text{ kV.} \end{aligned}$$

la componente activa de la corriente, en este caso,

$$I'_{mx} \cos \varphi_{H'} = \frac{\overline{E'-H'}}{B'} = \frac{107,12}{137,05} = 0,7816 \text{ kA}$$

y la potencia máxima:

$$\begin{aligned} P_{Hmx} &= \sqrt{3} V I'_{mx} \cos \varphi_{H'} = \sqrt{3} \times 220 \times \\ &\times 0,7816 = 297,82 \text{ MW.} \end{aligned}$$

Del precedente análisis deducimos que la máxima potencia que puede ser transportada por la línea dúplex es solamente un 61,94 por 100 superior que la de la línea simple y no el 100 por 100.

VARIACION DE LA ESTABILIDAD DE UNA LINEA SIMPLE AL TRANSFORMARLA EN DUPLEX

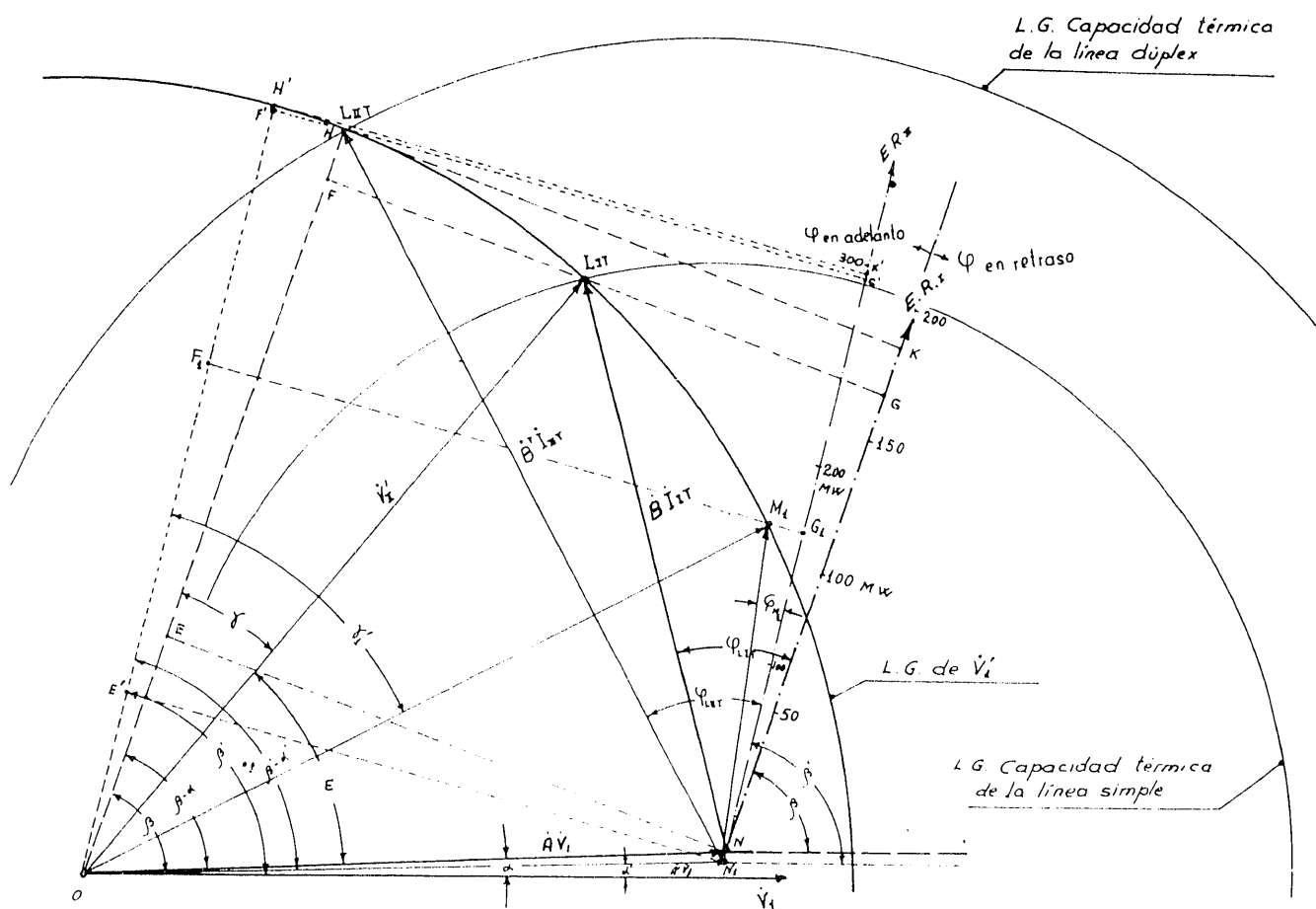


Figura 3.

Para determinar el valor de la intensidad en la línea determinaremos primero su factor de potencia:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_H &= \frac{\overline{F'-G'}}{\overline{E'-H'}} = \frac{A' V_1 \operatorname{sen} (\beta' - \alpha')}{O-H' - O-E'} = \\ &= \frac{111,15}{107,12} = 1,037 \end{aligned}$$

$$\varphi_H = 46,06^\circ \Rightarrow \cos \varphi_H = 0,6937$$

y el valor de la intensidad será:

$$I'_{mx} = \frac{0,7816}{0,6937} = 1,1263 \text{ kA}$$

Funcionamiento en los puntos límites atendiendo a la capacidad térmica del conductor:

En la línea simple el punto de funcionamiento es el L_T (ver figura 3).

Del triángulo formado por la composición vectorial de

$$\dot{V}' = \dot{A} \dot{V}_1 + \dot{B} I_T$$

deducimos:

$$\begin{aligned} (B I_T)^2 &= (V')^2 + (A V_1)^2 - 2 \times V' \times A V_1 \times \cos \varepsilon \\ \cos \varepsilon &= \frac{(V')^2 + (A V_1)^2 - (B I_T)^2}{2 \times V' \times A V_1} = \\ &= \frac{139,71^2 + 115,83^2 - (194,2 \times 0,53)^2}{2 \times 139,71 \times 115,83} = 0,6903 \end{aligned}$$

con lo que

$$\varepsilon = \arccos (0,6903) = 46,34^\circ$$

por tanto:

$$\gamma = \beta - \alpha - \varepsilon = 66,61^\circ - 46,34^\circ = 20,26^\circ$$

el segmento

$$\begin{aligned} \overline{F-L_T} &= V' \operatorname{sen} \gamma = 139,71 \times \operatorname{sen} (20,26^\circ) = \\ &= 48,38 \text{ kV} \end{aligned}$$

y el

$$\begin{aligned} \overline{F-E} &= \overline{O-F} - \overline{O-E} = V' \cos \gamma - A V_1 \cos (\beta - \alpha) = \\ &= 139,71 \times \cos (20,26^\circ) - 115,83 \times \cos (66,61^\circ) = \\ &= 131,06 - 45,98 = 85,08 \text{ kV.} \end{aligned}$$

con lo que el factor de potencia

$$\cos \varphi_{LIT} = \frac{\overline{F-E}}{B I_{LIT}} = \frac{85,08}{102,93} = 0,8266 \quad \text{en adelante.}$$

$$\varphi_{LIT} = \arccos(0,8266) = 34,24^\circ$$

La potencia compleja correspondiente al punto de funcionamiento L_{IT} será:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{LIT} &= \sqrt{3} V I_{LIT} \angle -\varphi_{LIT} = \\ &= \sqrt{3} \times 220 \times 0,53 \angle -34,24^\circ = \\ &= 201,95 \angle 34,24^\circ \text{ MVA} = 166,95 - \\ &\quad - j113,63 \text{ (MW ; MVAR)} \end{aligned}$$

En la línea dúplex el punto de funcionamiento es el L_{IT} y, por composición vectorial, tendremos:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{B' I_{LIT}} &= \overrightarrow{O-L_{IT}} - \overrightarrow{A' V_1} = 139,71 \angle 68,81^\circ - \\ &\quad - 115,82 \angle 1,5^\circ = 143 \angle 117,16^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

así que:

$$\varphi_{LIT} = 117,16^\circ - \beta' = 117,16^\circ - 75,16^\circ = 42^\circ$$

y el factor de potencia

$$\cos \varphi_{LIT} = \cos(42^\circ) = 0,7431 \quad \text{en adelante.}$$

Su potencia compleja

$$\begin{aligned} \dot{S}_{LIT} &= \sqrt{3} V I_{LIT} \angle -\varphi_{LIT} = \sqrt{3} \times 220 \times \\ &\quad \times (2 \times 0,53) \angle -42^\circ = 403,91 \text{ MVA} = \\ &= 300,16 - j270 \text{ (MW ; MVAR)} \end{aligned}$$

La potencia de línea dúplex es un 79,79 por 100 superior que la de la simple para una misma seguridad térmica; no obstante, esta potencia adicional de 133,21 MW. nos sitúa en puntos mucho más próximos al límite estático de estabilidad de la línea en la dúplex que en la simple. Comparemos la proximidad relativa de L_{IT} con H' y la de L_{IT} con H .

Pero la potencia reactiva necesaria a inyectar para regular la tensión con las condiciones preestablecidas es de 137,61 por 100 superior en el caso de línea dúplex que en la simple, partiendo en ambos casos de factor de potencia unidad en la carga.

Supongamos, en el siguiente análisis, que la línea dúplex está trabajando en un estado de

carga igual a la máxima potencia correspondiente al límite térmico de la línea simple.

Con este supuesto, las proyecciones de las dos intensidades sobre los respectivos ejes $E.R._I$ y $E.R._{II}$ serán iguales:

$$\frac{\overline{N-G}}{B} = \frac{\overline{N_1-G_1}}{B'}$$

por lo que:

$$\begin{aligned} \overline{N_1-G_1} &= \overline{N-G} \times (B'/B) = 85,08 \times \\ &\quad \times (137,05/194,20) = 60,04 \text{ kV} \end{aligned}$$

la proyección

$$\overline{O-F_1} = \overline{O-E'} + \overline{N_1-G_1} = 32,59 + 60,04 = 92,63 \text{ kV}$$

y el

$$\cos \gamma'_1 = \frac{\overline{O-F_1}}{V'_1} = \frac{92,63}{139,71} = 0,6630$$

$$\gamma'_1 = \arccos(0,6630) = 48,46^\circ$$

La caída de tensión $\overline{M_1-G_1}$ en cuadratura con $E.R._{II}$ será igual a:

$$\begin{aligned} \overline{M_1-G_1} &= \overline{E'-N_1} - \overline{F_1-M_1} = A' V_1 \sin(\beta' - \alpha') - \\ &\quad - V'_1 \sin \gamma'_1 = 111,15 - 104,58 = 6,56 \text{ kV} \end{aligned}$$

por tanto:

$$\operatorname{tg} \varphi_{M_1} = \frac{\overline{M_1-G_1}}{\overline{N_1-G_1}} = \frac{6,56}{60,04} = 0,1093$$

$$\varphi_{M_1} = \arctg(0,1093) = 6,23^\circ$$

el módulo de la caída de tensión es:

$$B' I_{M_1} = \frac{\overline{N_1-G_1}}{\cos \varphi_{M_1}} = \frac{60,04}{\cos(6,23^\circ)} = 60,39 \text{ kV}$$

por tanto, la intensidad

$$I_{M_1} = \frac{\overline{N_1-G_1}}{B' \cos \varphi_{M_1}} = \frac{60,39}{137,05} = 0,4407 \text{ kA}$$

y su expresión vectorial

$$\dot{I}_{M_1} = I_{M_1} \angle \varphi_{M_1} = 440,7 \angle 6,23^\circ \text{ A}$$

por lo que la potencia aparente compleja será

$$\begin{aligned} S_{M_1} &= \sqrt{3} V I_{M_1} \angle -\varphi_{M_1} = \sqrt{3} \times 220 \times \\ &\quad \times 0,4407 \angle -6,23^\circ = 167,92 \angle -6,23^\circ \text{ MVA} = \\ &= 166,94 - j18,22 \text{ (MW ; MVAR)} \end{aligned}$$

VARIACION DE LA ESTABILIDAD DE UNA LINEA SIMPLE AL TRANSFORMARLA EN DUPLEX

Una apreciación importante es la siguiente: Para transportar los 166,95 MW. en la línea simple era necesario inyectar una potencia reactiva de -113,63 MVAR., mientras que para transportar la misma potencia en la dúplex sólo es necesario inyectar -18,22 MVAR. De lo cual se infiere que la regulación de tensión en la línea dúplex es mucho más sencilla que en la simple para una misma potencia a transmitir.

Ello es debido a la modificación del parámetro B , que se transforma en el B' ; he aquí que estimemos totalmente necesario que la determinación de los parámetros A , B , C y D de la línea se realicen con la máxima precisión, puesto que de ellos dependen las conclusiones que estamos analizando.

Veamos una comparación de los rendimientos en el transporte de energía eléctrica para el estado de carga precedente en ambas líneas.

La intensidad en el extremo emisor en la línea simple es:

$$\dot{I}_{IT} = \dot{C}\dot{V}_1 + \dot{D}\dot{I}_{IT}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{IT} &= 940,77 \times 10^{-6} \times 127/90,7^\circ + 0,912 \times \\ &\times 0,53/2,2^\circ + 34,25^\circ = 0,1195/90,7^\circ + \\ &+ 0,4834/36,45^\circ = 0,5616 \quad 77/46,39^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

y la potencia aparente compleja en el extremo emisor es

$$\begin{aligned}\dot{S}_{IT} &= \sqrt{3} \dot{V}_1 \dot{I}_{IT}^* = \sqrt{3} \times 220 \times 1,1 \times \\ &\times 0,5616/48,54^\circ - 46,39^\circ = 235,40/2,15^\circ \text{ MVA} = \\ &= 235,23 + j8,83 \text{ (MW ; MVAR)}\end{aligned}$$

por lo que el rendimiento será:

$$\eta_{IT}(\%) = \frac{166,95}{235,23} \times 100 = 70,97 \%$$

La intensidad en el extremo emisor en la línea dúplex es:

$$\dot{I}_{M1} = \dot{C}'\dot{V}_1 + \dot{D}'\dot{I}_{M1}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{M1} &= 1.272,29 \times 10^{-6} \times 127/90,48^\circ + \\ &+ 0,912 \times 0,4407/1,5^\circ + 6,23^\circ = \\ &= 0,1616/90,48^\circ + 0,4019/7,73^\circ = \\ &= 0,4517/28,51^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

su potencia vectorial compleja tendrá por

valor:

$$\begin{aligned}\dot{S}_{M1} &= \sqrt{3} \dot{V}_1 \dot{I}_{M1}^* = \sqrt{3} \times 220 \times 1,1 \times \\ &\times 0,4517/75,16^\circ - 48,26^\circ - 28,51^\circ = \\ &189,33/-1,61^\circ \text{ MVA} = 189,26 - \\ &- j5,34 \text{ (MW ; MVAR)}\end{aligned}$$

que tiene por rendimiento

$$\eta_{M1}(\%) = \frac{166,94}{189,26} \times 100 = 88,20 \%$$

La potencia ahorrada en el transporte por la línea dúplex es de

$$P_{AH} = 235,23 - 189,26 = 45,97 \text{ MW.}$$

dato que por sí sólo puede justificar el cambio.

Veamos, a modo de resumen, los puntos de funcionamiento desarrollados anteriormente en un diagrama circular de potencias doble, expresando los resultados en por unidad (p.u.) para tener así una mayor generalidad del problema tratado, puesto que casos semejantes pueden ser analizados en el mismo diagrama sin más que efectuar las oportunas correcciones de los parámetros base (ver figura 4).

Para la construcción del diagrama circular doble de potencias hemos tomado como parámetros bases la potencia y la tensión

$$\begin{aligned}V_B &= 300 \text{ MVA.} \\ V_B &= 220 \text{ kV.}\end{aligned}$$

de los que deducimos los siguientes valores en p.u.:

Radio del L. G. de $\dot{S}$ para la línea simple:

$$\begin{aligned}(VV'/B)_{p.u.} &= (1,1 \times 220^2)/194,2 \times 300 = \\ &= 0,9138 \text{ p.u.}\end{aligned}$$

Radio del L.G. de $\dot{S}$ para la línea dúplex:

$$\begin{aligned}(VV'/B')_{p.u.} &= (1,1 \times 220^2)/(137,05 \times 300) = \\ &= 1,2949 \text{ p.u.}\end{aligned}$$

Situación del centro H_s del diagrama circular del extremo receptor para la línea simple:

$$\begin{aligned}(AV^2/B)_{p.u.} &= (0,912 \times 220^2)/(194,2 \times 300) = \\ &= 0,7577 \text{ p.u.}\end{aligned}$$

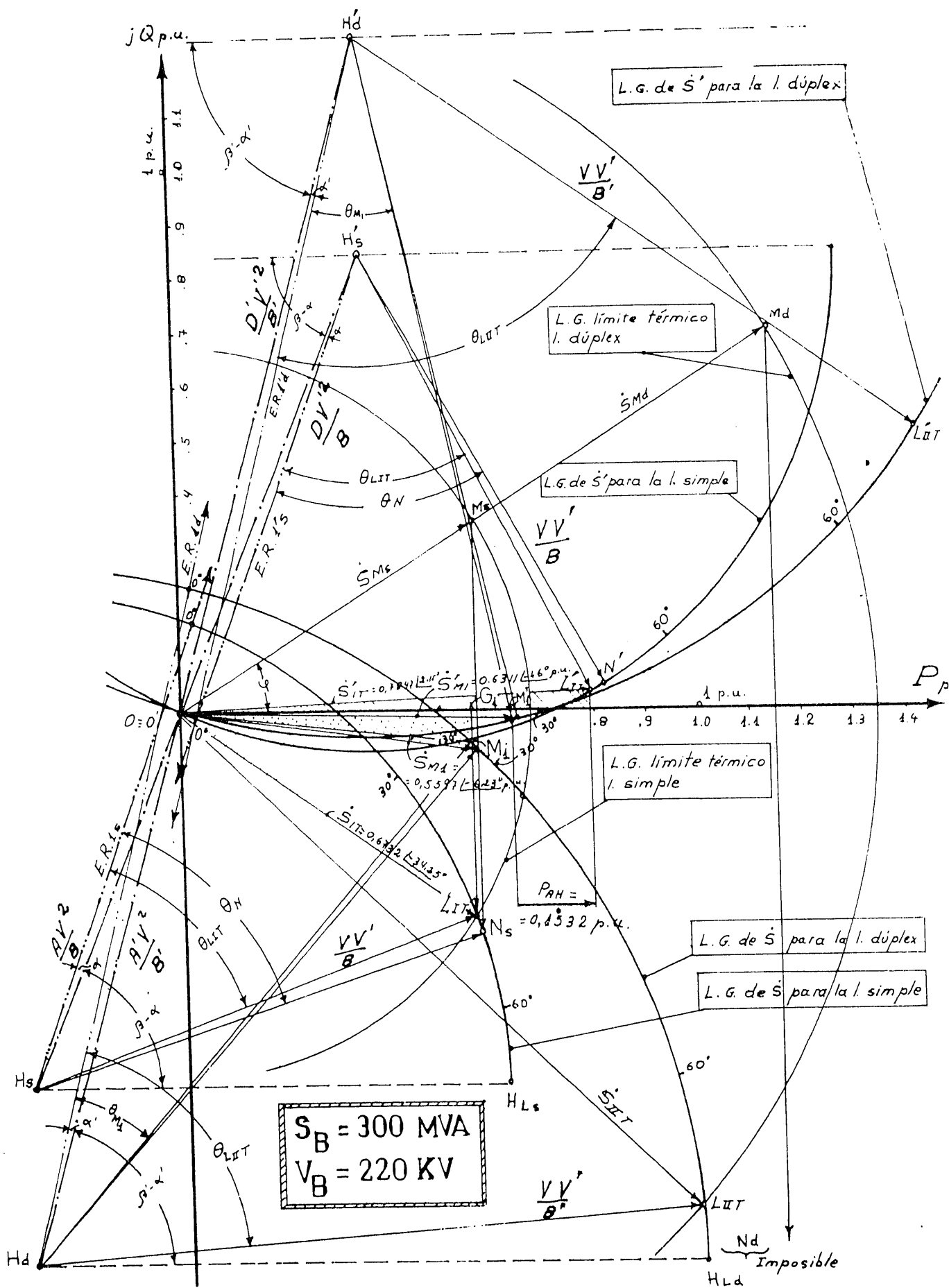


Figura 4.—Diagrama circular doble (p.u.).

VARIACION DE LA ESTABILIDAD DE UNA LINEA SIMPLE AL TRANSFORMARLA EN DUPLEX

Situación del centro H_d del diagrama circular del extremo receptor para la línea dúplex:

$$A' V^2/B'_{p.u.} = (0,912 \times 220^2)/(137,05 \times 300) = 1,0736 \text{ p.u.}$$

Situación del centro H_s' del diagrama circular del extremo emisor para la línea simple:

$$(DV'^2/B)_{p.u.} = 0,912 \times (1,1 \times 220)^2/(194,2 \times 300) = 0,9168 \text{ p.u.}$$

Situación del centro H_d' del diagrama circular del extremo emisor para la línea dúplex:

$$(D' V'^2/B')_{p.u.} = 0,912 \times (1,1 \times 220)^2/(137,05 \times 300) = 1,299 \text{ p.u.}$$

El L.G. del límite térmico para la línea simple es un arco de circunferencia que tiene por radio:

$$S_{IT} = 0,6732 \text{ p.u.}$$

Y el L.G. del límite térmico para la línea dúplex será un arco de circunferencia de radio:

$$S_{IIT} = 1,3454 \text{ p.u.}$$

La recta de $\cos \varphi = 0,85$ en retraso intercepta al L.G. límite térmico de la línea simple en M_s . Inyectando potencia reactiva desde este punto llegamos a cortar al L.G. de $\dot{S}$ para la línea simple en el punto de funcionamiento N_s del extremo receptor.

La misma recta de $\cos \varphi = 0,85$ corta al L.G. límite térmico de la línea dúplex en M_d , con lo que vemos que no existe potencia reactiva alguna capaz de regular la tensión en los límites preestablecidos al no cortarse la inyección de potencia reactiva capacitiva con el L.G. de S para la línea dúplex.

La intersección del L.G. límite térmico con el L.G. de $\dot{S}$ para la línea simple nos define el punto de funcionamiento L_T al que le corresponde una potencia compleja:

$$\dot{S}_{IT} = 0,6732 / -34,25^\circ \text{ p.u.}$$

y un ángulo de par

$$\theta_{IT} = 48,54^\circ$$

La misma situación, pero para el estado de funcionamiento en la línea dúplex, le correspon-

de una potencia de

$$\dot{S}_{IIT} = 1,3464 / -42^\circ \text{ p.u.}$$

con un ángulo de par

$$\theta_{IIT} = 69,49^\circ$$

Para esta situación de carga se ve que la línea dúplex se encuentra en una situación mucho más comprometida en lo que respecta a su estabilidad estática que la línea simple (proximidad del punto L_{IIT} respecto del límite H_{Ld} frente a proximidad del L_T respecto de su límite H_{Ls}).

El punto homólogo del L_T para el extremo emisor es el L'_T , el cual se determina llevando sobre el E.R.I._s el mismo ángulo de par, correspondiéndole la potencia compleja

$$\dot{S}'_T = 0,7847 / 2,15^\circ \text{ p.u.} = 0,7841 + j0,0294 \text{ p.u.}$$

Para transportar la misma potencia activa en la línea dúplex que la correspondiente al punto de funcionamiento L_T tendremos que determinar el punto M_1 intersección del cateto de la potencia reactiva con el L.G. de $\dot{S}$ para la línea dúplex.

A dicho punto le corresponde una potencia compleja de

$$\dot{S}_{M1} = 0,5597 / -6,23^\circ \text{ p.u.}$$

y un ángulo de par

$$\theta_{M1} = 26,68^\circ$$

La situación de su homólogo M'_1 sobre su correspondiente L.G., en el extremo emisor, la obtendremos de forma análoga a la del L'_T , proporcionándonos una potencia compleja de

$$\dot{S}_{M1} = 0,6311 / -1,6^\circ \text{ p.u.} = 0,6309 - j0,0176 \text{ p.u.}$$

Evidentemente, la diferencia entre las componentes reales de $\dot{S}_{IT}$ y $\dot{S}_{M1}$ nos proporciona la potencia ahorrada para un mismo transporte, al ser efectuado mediante la línea dúplex en lugar de la línea simple.

$$P_{AH} = 0,7841 - 0,6309 = 0,1532 \text{ p.u.}$$

la cual representa un 27,53 por 100 de la potencia transportada.

CONCLUSIONES

Del análisis precedente extraemos como más interesante las siguientes:

- No siempre es posible transportar, en una línea dúplex, una potencia igual a la definida por el límite térmico del conductor, ya que este valor puede ser superior al definido por el límite de estabilidad.
- La máxima potencia que puede transportar una línea dúplex no es el doble de la simple, sino una cantidad sensiblemente menor (incremento del 61,94 por 100 en nuestro caso).
- Para una misma seguridad térmica la línea dúplex tampoco transporta el 100 por 100 más de potencia que la simple (el 79,79 por 100 para el caso analizado).
- Con la misma regulación de tensión e igualdad de potencia a transportar es necesaria una menor inyección de potencia reactiva en la línea dúplex que en la simple.
- En todos los casos el rendimiento de la línea dúplex es superior a la de la simple (para una potencia de 166,94 MW. la mejora ha sido de un 17,23 por 100).

Teniendo presente que hoy día se puede disponer de equipos especializados en trabajos bajo tensión que permiten modificar la línea sin suspender el suministro y la mejora del rendimiento antes mencionado, se pueden abordar, con rentabilidad, transformaciones de líneas que en su día estudios económicos no lo aconsejaron.

Damos por terminado este breve estudio con la esperanza de haber contribuido a un mejor conocimiento del transporte de la energía eléctrica en líneas de A.T.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- STEVENSON, W. D.: «Análisis de los sistemas eléctricos de potencia». McGraw-Hill. 1976.
- WESTINGHOUSE (varios): «Electrical transmission and distribution reference book». 1950.
- WEEDY, B. M.: «Sistemas eléctricos de gran potencia». Reverté. 1978.
- WARRINGTON, A. R.: «Protective Relays» (2 tomos). Chapman and Hall. London. 1978.
- RAS, E.: «Teoría de líneas» (2 tomos). Marcombo. 1975.
- ALVAREZ ISASI, R.: «Cálculo de los tendidos de líneas aéreas». E.T.S.I.I. de Bilbao. 1972.
- PUIG, A., y varios: «Interconexión de centrales y redes eléctricas». E.T.S.I.I. de Madrid. 1950.

Luis Gaspar Vega Argüelles



Nacido en Campo de Caso (Asturias). Perito industrial por la Escuela de Gijón en 1964, ingeniero industrial por la Escuela de Bilbao en 1970, catedrático por oposición libre del Grupo XI «Electricidad I» de EU de Ingeniería Técnica Industrial en 1971, doctor ingeniero industrial por la ETSII de Bilbao en 1982. en la actualidad es catedrático del Grupo XIII «Centrales y Líneas», de la EUITI de Santander y profesor colaborador del Grupo XXVIII «Sistemas Eléctricos».