

فصل پنجم

مدل سازی خطوط انتقال

بهروز آدینه

بهار ۹۵

در فصل چهارم، پارامترهای هر فاز خطوط انتقال بدست آمد. این فصل نمایش و عملکرد¹ خطوط انتقال را در شرایط بهره‌برداری عادی مطرح می‌سازد. خطوط انتقال توسط مدار معادل و با پارامترهای مناسب برای هر فاز نمایش داده می‌شوند. ولتاژ پایانه‌ها به صورت خط به خشی و جریان برای یک فاز در نظر گرفته شده و در نتیجه سیستم سه‌فاز به سیستم تک‌فاز کاهش می‌یابد.

مدل بکار گرفته شده برای محاسبه ولتاژها، جریان‌ها و پخش توان‌ها به طول خط بستگی دارد. در این فصل ابتدا پارامترهای مدار و روابط ولتاژ و جریان برای خطوط کوتاه² و متوسط³ نشان داده می‌شوند. سپس مسائل مربوط به تنظیم و تلفات خطوط و بهره‌برداری از آن‌ها در شرایط ولتاژهای ثابت پایانه ارائه می‌گردند.

در مرحله بعد، نظریه خط بلند⁴ ارائه شده و روابطی برای ولتاژ و جریان در طول گسترده خط بدست می‌آیند. ثابت انتشار⁵ و امپدانس مشخصه⁶ تعریف شده و نشان داده می‌شود که توان الکتریکی در طول خطوط تقریباً با سرعت نور انتقال می‌یابد. از آنجایی که شرایط پایانه‌ها در دو سمت خط دارای اهمیت زیادی است، مدار معادل π برای خطوط طولانی ارائه شده است. در نهایت، جبران‌سازی خط برای بهبود رفتار آن در حالت بی‌باری و بارگذاری بحث می‌شود.

¹ Performance

² Short Lines

³ Medium Lines

⁴ Long Lines

⁵ Propagation Constant

⁶ Characteristic impedance

مدل خط کوتاه

اگر طول خطوط کم تر از حدود 80 km (50 مایل) باشد یا ولتاژ بیشتر از 69 kV نباشد، اغلب می توان از ظرفیت خازنی خط بدون ایجاد خطای زیاد، چشم پوشی نمود. امپدانس سری در مدل خط کوتاه از حاصل ضرب طول خط و امپدانس سری در واحد طول بدست می آید:

$$Z = (r + j\omega L)l = R + jX \quad (1.4)$$

که در آن r و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس در واحد طول هر فاز و l طول خط می باشد. مدل خط کوتاه براساس هر فاز در شکل ۱.۴ نشان داده شده است. در این شکل V_S و I_S ولتاژ و جریان در سمت ابتدای (ارسال^۱) خط و V_R و I_R ولتاژ و جریان در سمت انتهای (دریافت^۲) خط می باشند. اگر یک بار سه فاز با توان ظاهری $S_R(\tau\phi)$ به انتهای خط انتقال وصل شود، جریان در انتهای خط از رابطه زیر بدست می آید:

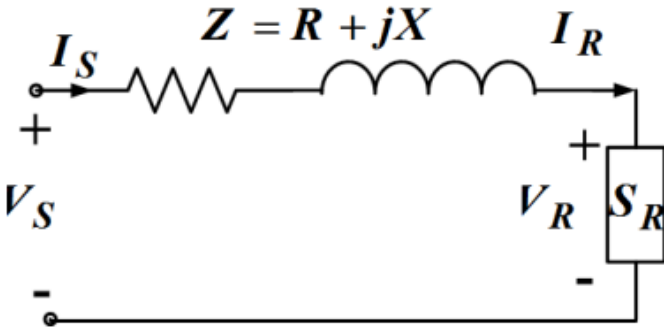
$$I_R = \frac{S_R^*(\tau\phi)}{\sqrt{3}V_R^*} \quad (2.4)$$

ولتاژ فاز در ابتدای خط برابر است با:

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (3.4)$$

¹ Sending End

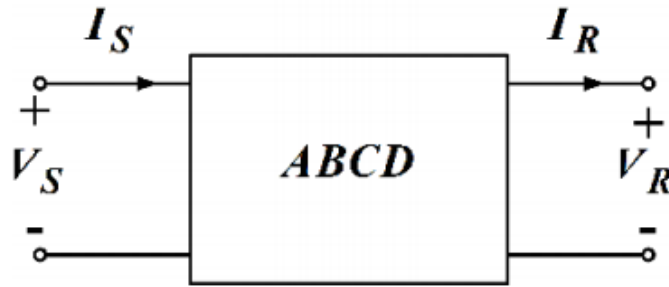
² Receiving End



شکل ۱.۴ مدل خط کوتاه.

و از آنجایی که از ظرفیت خازنی خط چشم‌پوشی شده است، جریان‌های ابتدا و انتهای خط با هم برابر هستند، یعنی:

$$I_S = I_R \quad (4.4)$$



خط انتقال ممکن است با یک شبکه دو قطبی مطابق شکل ۲.۴ نشان داده شده و روابط بالا را می‌توان برحسب ثابت‌های عمومی^۱ مدار، که معمولاً ثابت‌های ABCD نامیده می‌شوند، به صورت زیر نوشت:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (5.4)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (6.4)$$

یا به صورت ماتریسی خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

شکل ۲.۴ نمایش دو قطبی یک خط انتقال.

^۱ Generalized Constants

طبق روابط (۳.۴) و (۴.۴) برای مدل خط کوتاه داریم:

$$A = 1, B = Z, C = 0, D = 1 \quad (۸.۴)$$

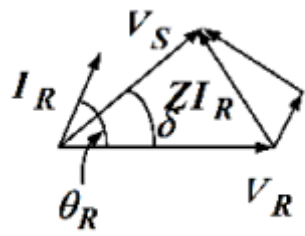
تنظیم ولتاژ^۱ خط را می‌توان برحسب درصد تغییر ولتاژ در انتهای خط (بیان شده برحسب درصد ولتاژ در بار کامل) از حالت بی‌باری تا بار کامل تعریف نمود:

$$\%V.R. = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100 \quad (۹.۴)$$

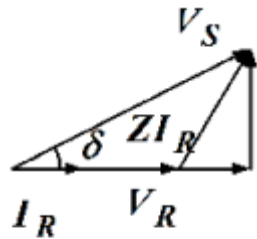
در بی‌باری $I_R = 0$ بوده و با استفاده از رابطه (۵.۴) می‌توان نوشت:

$$V_{R(NL)} = \frac{V_S}{A} \quad (۱۰.۴)$$

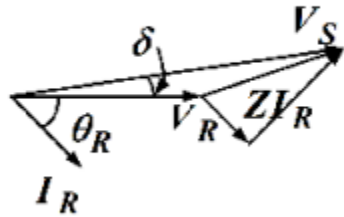
در خط کوتاه $A = 1$ و $V_{R(NL)} = V_S$ است. تنظیم ولتاژ معیاری از افت ولتاژ بوده و به ضریب قدرت بار بستگی دارد. تنظیم ولتاژ در بارهای با مقادیر کوچک ضریب قدرت پس‌فاز کم‌تر خواهد بود. با بارهای خازنی، یعنی بارهای با ضریب قدرت پیش‌فاز، تنظیم ولتاژ ممکن است منفی شود. این موضوع با نمایش فازوری شکل ۳.۴ نشان داده شده است.



(پ) بار با ضریب قدرت پیش‌فاز



(ب) بار با ضریب قدرت واحد



(الف) بار با ضریب قدرت پس‌فاز

شکل ۳.۴ نمایش فازوری برای خط کوتاه.

^۱ Voltage Regulation

پس از محاسبه ولتاژ ابتدای خط، توان ابتدای خط از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_{S(\tau\phi)} = \sqrt{3} V_S I_S^* \quad (11.4)$$

تلفات کل خط برابر است با:

$$S_{L(\tau\phi)} = S_{S(\tau\phi)} - S_{R(\tau\phi)} \quad (12.4)$$

و بازده خط انتقال به صورت زیر است:

$$\eta = \frac{P_{R(\tau\phi)}}{P_{S(\tau\phi)}} \quad (13.4)$$

که در آن $P_{R(\tau\phi)}$ و $P_{S(\tau\phi)}$ به ترتیب توان حقیقی کل در انتها و ابتدای خط می‌باشند.

$\cos \varphi_R$ ضریب قدرت انتهای خط (بار)

$\cos \varphi_s$ ضریب قدرت ابتدای خط (مولد)

$$\begin{aligned}\varphi_R &= (V_R, I_R) \\ \varphi_s &= (V_s, I_s)\end{aligned}\quad (15.4)$$

$$S_s = V_s I_s^* = P_s + jQ_s \rightarrow \begin{cases} P_s = |V_s| |I_s| \cos \varphi_s \\ Q_s = |V_s| |I_s| \sin \varphi_s \end{cases}, \varphi_s = \tan^{-1} \frac{Q_s}{P_s} \quad (16.4)$$

$$S_R = V_R I_R^* = P_R + jQ_R, \varphi_R = \tan^{-1} \frac{Q_R}{P_R} \quad (17.4)$$

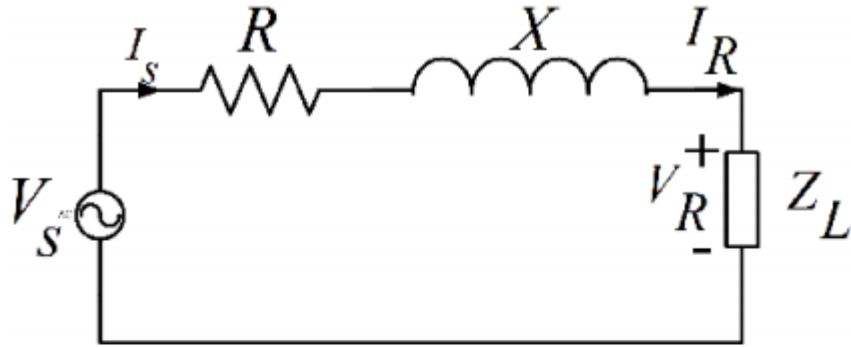
$$\left. \begin{aligned} P_s &= P_R + P_{Loss} \\ P_{Loss} &= R |I|^2 \end{aligned} \right\} \rightarrow \eta\% = \frac{P_R}{P_s} \times 100\% \quad (18.4)$$

توان اکتیو مصرفی خط: $P_{Loss} = R |I|^2$

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_R + Q_L \\ Q_s &= Q_R \times X (I)^2\end{aligned}\quad (19.4)$$

توان راکتیو مصرفی خط: $Q_s = Q_R \times X (I)^2$

توان راکتیو مصرفی خط: $Q_s = Q_R \times X(I)^2$



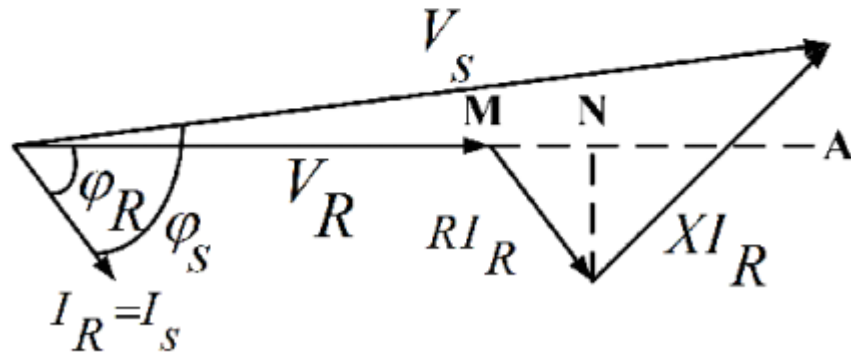
شکل ۴.۴ مدل خط کوتاه.

$$AM = AN + MN = RI_R \cos \varphi_R + XI_R \sin \varphi_R$$

$$\Rightarrow \% \text{Reg} = \frac{RI_R \cos \varphi_R + XI_R \sin \varphi_R}{V_R} \times 100 \quad (20.4)$$

رگولاسیون برحسب توان مصرف کننده:

$$\% \text{Reg} = \frac{RP_R + XQ_R}{V_R^2} \times 100 \quad (21.4)$$

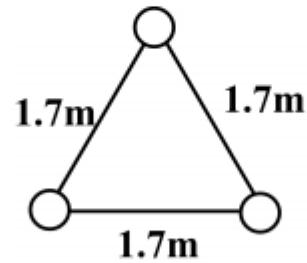


شکل ۵.۴ نمودار برداری خط کوتاه.

بنابراین افت ولتاژ اولاً به دلیل امپدانس خط ایجاد می شود. یعنی اگر امپدانس خط صفر باشد آنگاه افتی نخواهیم داشت. ولی اگر امپدانس صفر نباشد آنگاه P_R و Q_R یعنی توانی که از خط می کشیم نیز در افت موثرند. چون توان راکتیو و اکتیو با هم از خط عبور داده می شوند. هر دو افت ایجاد می کنند. می توانیم P_R را از نیروگاه بگیریم ولی Q_R را در محل بگیریم یعنی نیروگاه فقط مقدار توان راکتیو مصرفی خط را تامین می کند و بدین ترتیب رگولاسیون بهبود داده می شود.

$$\% \text{Reg} = \frac{RP_R}{V_R^2} \times 100 \quad (22.4)$$

مثال: یک خط سه فاز ۱۱ کیلوولت، به طول ۱۵ کیلومتر و توان ۱۳ مگاوات را تحویل مصرف‌کننده می‌دهد. تلفات خط ۱۰ درصد توان مصرفی است. ضریب قدرت با ۰.۸ پس‌فاز خط انتقال دارای آرایش مثلث و فاصله هادی‌ها از یکدیگر ۱.۷ متر است. ولتاژ ابتدای خط و رگولاسیون را بدست آورید. شعاع هادی ۵ میلی‌متر و فرکانس ۵۰ هرتز است.



شکل ۶.۴ مثال.

خط کوتاه است. $V_R = 11kv$ و $l = 15km$

$$X = 2\pi fl = 2\pi \times 50 \times 2 \times 10^{-7} Ln \frac{1.7}{0.7788 \times 10^{-3} \times 5} \frac{\Omega}{m} \times 15000m = 5.72\Omega$$

$$P_{Loss} = \frac{10}{100} \times 3 \times 10^6 = 3 \times 10^5 = 3RI^2 \quad \text{توان مصرفی:}$$

$$P_R = \sqrt{3} V_R I_R \cos \phi_R \Rightarrow 3 \times 10^6 = \sqrt{3} \times 11 \times 10^4 \times |I_R| \times 0.8$$

$$\Rightarrow |I_R| = 197A \Rightarrow I_R = 197 \angle -36.9$$

$$3 \times 10^5 = 3RI^2 \Rightarrow R = 2.58\Omega$$

$$Z = 2.58 + j 5.72\Omega$$

حال باید رگولاسیون خط را بدست آوریم. پس باید V_s را حساب کنیم.

$$V_s = AV_R + BI_R \rightarrow V_s = V_R + ZI_R \Rightarrow V_s = \frac{11000}{\sqrt{3}} + (2.58 + j5.72)(197 \angle -36.9)$$

$$\Rightarrow V_s = 7432 + j595.4 = 7456 \angle 4.58^\circ$$

V_s فازی است چون $V_R = \frac{11000}{\sqrt{3}}$ را قرار دادیم.

$$V_s = \sqrt{3} \times 7456 \times 10^{-3} = 12.91 \text{ kv}$$

$$I_s = I_R = 197 \angle -36.9^\circ$$

$$\begin{cases} V_R = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ v} \\ I_R = 197 \angle -36.9^\circ \end{cases} \begin{cases} V_s = 7456 \angle 4.58^\circ \\ I_s = 197 \angle -36.9^\circ \end{cases}$$

$$\% \text{Reg} = \frac{7456 - 6350}{6350} \times 100 = 17\%$$

بهترین راه برای محاسبه ضریب قدرت ابتدای خط این است که توان را ابتدا حساب کنیم.

$$S_s = V_s I_s^* = (7456 \angle 4.58^\circ)(197 \angle 36.9^\circ) = 7456 \times 197 \angle 41.48^\circ = 1.47 \text{ MW} + j1.1 \text{ MVar} = P_s + jQ_s$$

$$S_{s(\tau\phi)} = 3.3 + j3.7 = \frac{3}{3.3} = 0.909 \text{ or } 90.9\%$$

مثال: یک خط انتقال سه فاز 220 kV دارای طول 40 km می باشد. مقاومت اهمی هر فاز $0.15\ \Omega$ در هر کیلومتر و اندوکتانس هر فاز 1.3263 mH در هر کیلومتر است. از ظرفیت خازنی موازی صرف نظر شده است. با استفاده از مدل خط کوتاه، ولتاژ و توان در ابتدای خط و تنظیم ولتاژ و بازده آن را وقتی بارهای زیر را تغذیه می نماید، محاسبه کنید: (فرکانس را 60 هرتز در نظر بگیرید).

الف) 381 MVA در ضریب قدرت 0.8 پس فاز و ولتاژ 220 kV

ب) 381 MVA در ضریب قدرت 0.8 پیش فاز و ولتاژ 220 kV

حل: الف) امپدانس سری هر فاز برابر است با:

$$Z = (r + j\omega L)l = (0.15 + j2\pi \times 60 \times 1.3263 \times 10^{-3})40 = 6 + j20\ \Omega$$

$$V_R = \frac{220 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 127 \angle 0^\circ\text{ kV}$$

ولتاژ در سمت دریافت در هر فاز عبارتست از:

توان ظاهری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_R(\tau\phi) = 381 \angle \cos^{-1} 0.8 = 381 \angle 36.87^\circ = 304.8 + j228.6\text{ MVA}$$

$$I_R = \frac{S_R^*(\tau\phi)}{\sqrt{3}V_R^*} = \frac{381 \angle -36.87^\circ \times 10^{-3}}{3 \times 127 \angle 0^\circ} = 1000 \angle -36.87^\circ\text{ A}$$

جریان هر فاز مطابق زیر بدست می آید:

با استفاده از رابطه (۳.۴) ولتاژ ابتدای خط برابر است با:

$$V_S = V_R + ZI_R = 127 \angle 0^\circ + (6 + j20)(1000 \angle -36.87^\circ)(10^{-3}) = 144.33 \angle 4.93^\circ \text{ kV}$$

اندازه ولتاژ خط به خط در ابتدای خط عبارتست از: $|V_{S(L-L)}| = \sqrt{3} |V_S| = 250 \text{ kV}$

توان ابتدای خط به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} S_{S(\text{r}\phi)} &= 3V_S I_S^* = 3 \times 144.33 \angle 4.93^\circ \times 1000 \angle -36.87^\circ \times 10^{-3} = 322.8 \text{ MW} + j288.6 \text{ MVar} \\ &= 433 \angle 41.8^\circ \text{ MVA} \end{aligned}$$

تنظیم ولتاژ برابر است با: $\%V.R. = \frac{250 - 220}{220} \times 100 = 13.6\%$

بازده خط انتقال مطابق زیر محاسبه می‌شود: $\eta = \frac{P_{R(\text{r}\phi)}}{P_{S(\text{r}\phi)}} = \frac{304.8}{322.8} \times 100 = 94.4\%$

ب) جریان برای 381 MVA با ضریب قدرت 0.8 پیش‌فاز برابر است با:

$$I_R = \frac{S_{R(\text{r}\phi)}^*}{3V_R^*} = \frac{381 \angle 36.87^\circ \times 10^{-3}}{3 \times 127 \angle 0^\circ} = 1000 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

ولتاژ ابتدای خط عبارتست از:

$$V_S = V_R + ZI_R = 127 \angle 0^\circ + (6 + j20)(1000 \angle -36.87^\circ)(10^{-3}) = 121.39 \angle 9.29^\circ \text{ kV}$$

اندازه ولتاژ خط به خط در ابتدای خط به صورت زیر بدست می‌آید:

$$|V_{S(L-L)}| = \sqrt{3} |V_S| = 210.26 \text{ kV}$$

توان ابتدای خط برابر است با:

$$\begin{aligned} S_{S(3\phi)} &= 3V_S I_S^* = 3 \times 121.39 \angle 9.29^\circ \times 1000 \angle -36.87^\circ \times 10^{-3} = 322.8 \text{ MW} - j168.6 \text{ MVar} \\ &= 364.18 \angle -27.58^\circ \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$\text{تنظیم ولتاژ برابر است با: } \% V.R. = \frac{210.26 - 220}{220} \times 100 = -4.43 \%$$

$$\eta = \frac{P_{R(3\phi)}}{P_{S(3\phi)}} = \frac{304.8}{322.8} \times 100 = 94.4\% \text{ بازده خط انتقال مطابق زیر محاسبه می‌شود:}$$

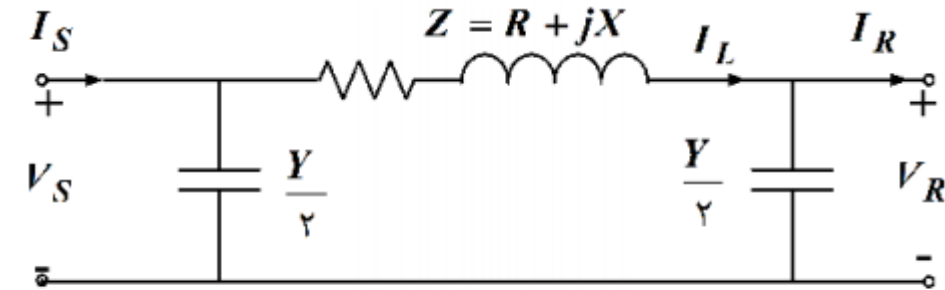
مدل خط متوسط

با افزایش طول خط، جریان باردهی خط^۱ بیشتر شده و باید ظرفیت خازنی موازی را در نظر گرفت. خطوط با طول بیشتر از ۸۰ km (۵۰ مایل) و کم تر از ۲۵۰ km (۱۵۰ مایل)، خطوط با طول متوسط^۲ نامیده می شوند. برای خطوط با طول متوسط، نصف ظرفیت خازنی موازی به صورت متمرکز (فشرده^۳)

در دو طرف خط در نظر گرفته می شود. این مدل به عنوان مدل اسمی^۴ π نامیده شده و در شکل ۷.۴ نشان داده شده است. در این مدل Z امپدانس سری کل خط است و از رابطه (۱.۴) بدست می آید و Y admittانس^۱ موازی کل خط است و از رابطه زیر تعیین می شود:

$$Y = (g + j\omega C)l \quad (۲۳.۴)$$

در شرایط عادی، رسانایی^۲ موازی در واحد طول که جریان نشتی مقره ها و ناشی از پدیده کرونا را نشان می دهد، قابل چشم پوشی بوده و g برابر صفر فرض می شود. در اینجا C ظرفیت خازنی نسبت به ختشی در هر کیلومتر و l طول خط انتقال می باشد. ولتاژ و جریان در ابتدای خط در مدل π به صورت زیر بدست می آیند:



شکل ۷.۴ مدل اسمی π برای خط متوسط.

¹ Line charging current

² Medium length lines

³ Lumped

⁴ Nominal

¹ Admittance

² Conductance

با استفاده از KCL، جریان در امپدانس سری که با I_L نشان داده می‌شود برابر است با:

$$I_L = I_R + \frac{Y}{\gamma} V_R \quad (24.4)$$

با بکارگیری KVL، ولتاژ ابتدای خط عبارتست از:

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (25.4)$$

با جایگزینی I_L از رابطه (24.4)، داریم:

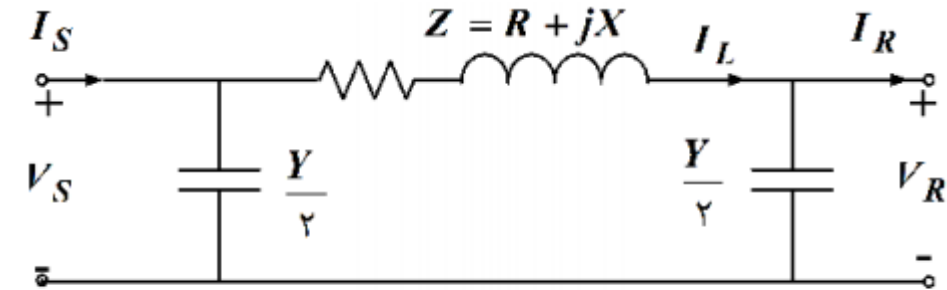
$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{\gamma}\right) V_R + Z I_R \quad (26.4)$$

جریان در ابتدای خط برابر است با:

$$I_S = I_L + \frac{Y}{\gamma} V_S \quad (27.4)$$

با جایگزینی I_L و V_S خواهیم داشت:

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{\gamma}\right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{\gamma}\right) I_R \quad (28.4)$$



شکل ۷.۴ مدل اسمی π برای خط متوسط.

از مقایسه روابط (۲۵.۴) و (۲۷.۴) با روابط (۵.۴) و (۶.۴) ثابت‌های ABCD برای مدل اسمی π عبارتند از:

$$A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \quad B = Z \Omega \quad (29.4)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \quad D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \quad (30.4)$$

برای پریونیت کردن چون A و D واحد ندارند، پس تغییری نمی‌کنند ولی B باید به Z_b و C به Y_b باید تقسیم شود تا پریونیت شوند.

معمولا ثابت‌های ABCD اعداد مختلط بوده و از آنجایی که مدل π یک شبکه دوقطبی می‌باشد، $A = D$ است. علاوه بر این، چون این مدار یک مدار خطی غیرفعال^۱ و یک شبکه دوقطبی دوطرفه^۲ است، دترمینان ماتریس انتقال^۳ در رابطه (۷.۴) برابر واحد می‌باشد، یعنی:

$$AD - BC = 1 \quad (31.4)$$

از حل معادله (۷.۴) کمیت‌های انتهایی برحسب کمیت‌های ابتدایی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (32.4)$$

¹ Passive

² Bilateral

³ Transmission Matrix

مثال: یک خط انتقال سه فاز، ۲۳۰ کیلوولت و طول ۱۵۰ متر از هادی‌ها ACSR با کد پارت‌تریج $GMR = 0.0066m$ تشکیل شده است. خط انتقال دارای آرایش افقی و فاصله هر هادی متوالی ۵ متر است. مقاومت هر فاز $0.2 \frac{\Omega}{km}$ است. اگر در انتهای خط ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و توان مصرفی ۲۰۰ مگاوات با ضریب قدرت ۰.۸۵ باشد، محاسبه کنید. (شعاع $r = 0.00815m$)

الف) ولتاژ ابتدای خط

ب) رگولاسیون خط

ج) ضریب توان ابتدای خط

د) راندمان خط

ه) بررسی تعادل توان راکتیو و اکتیو در خط
مرحله اول: محاسبه امپدانس خط:

در شبکه‌های انتقال $X > R$

در شبکه‌های توزیع $X < R$

$$Z = R + jX, R = 0.2 \frac{\Omega}{km} \times 150 km = 30 \Omega,$$

$$\left. \begin{aligned} D_s &= 0.0217' \times 0.3048 = 0.0066m \\ D_{eq} &= \sqrt{5 \times 5 \times 10} = 6.3m \end{aligned} \right\} \rightarrow X = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 2 \times 10^{-7} \times Ln \frac{6.3}{0.0066} \frac{\Omega}{m} \times 150000m = 64.65 \Omega$$

$$Z = 30 + j64.65 = 71.27 \angle 65.1^\circ$$

مرحله دوم: محاسبه Y خط:

$$r = \frac{0.642''}{2 \times 12} \times 0.3048 = 0.00815m$$

$$Y = j 2\pi f C = j 2\pi 50 \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \Omega}{Ln \frac{6.3}{0.00815}} \times 150000 = j 3.94 \times 10^{-4} = 3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ$$

مرحله سوم: محاسبه ABCD:

$$\begin{cases} V_s = AV_R + BI_R \\ I_s = CV_R + DI_R \end{cases}$$

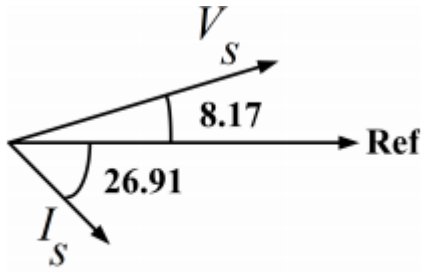
$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(71.27 \angle 65.1^\circ)(3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)}{2} = 0.9872 + j 0.0059 = 0.9872 \angle 0.34^\circ$$

معمولا زاویه ی A خیلی کوچک است.

$$B = Z = 71.27 \angle 65.1^\circ$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = (3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ) \left(1 + \frac{(71.27 \angle 65.1^\circ)(3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)}{4}\right) = 3.91 \times 10^{-4} \angle 90.17^\circ$$

مرحله چهارم: تعیین V_R و I_R



شکل ۸.۴ نمودار برداری خط متوسط مثال.

$$V_R = \frac{230 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 132800 \angle 0^\circ, P_R = \sqrt{3} |V_R| |I_R| \cos \varphi_R$$

$$\Rightarrow 200 \times 10^6 = \sqrt{3} \times 230 \times 10^3 |I_R| \times 0.85 \Rightarrow |I_R| = 590.64 \Rightarrow I_R = 590.64 \angle -31.8^\circ$$

مرحله پنجم: محاسبه V_s و I_s

$$V_s = (0.9872 \angle 0.34^\circ)(132800 \angle 0^\circ) + (71.27 \angle 65.1^\circ)(590.64 \angle -31.8^\circ)$$

$$\Rightarrow V_s = 167960 \angle 8.17^\circ, (V_s)_L = 290.93 \text{ kv}$$

$$I_s = CV_R + DI_R = (3.91 \times 10^{-4} \angle 90.17^\circ)(132800 \angle 0^\circ) + (0.9872 \angle 0.34^\circ)(590.64 \angle -31.8^\circ)$$

$$\Rightarrow I_s = 557.6 \angle -26.91^\circ \text{ A}$$

$$\% \text{Reg} = \frac{\frac{290.93}{0.9872} - 230}{230} \times 100\% = 28.1\%$$

$$\cos \varphi_s = \cos(8.17 + 26.91), \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_R}{P_s} \times 100$$

تعداد توان:

چون V_s خطی را گذاشتیم، پس توان سه فاز است.

الف) اکتیو: تفاوت P_s و P_R باید به اندازه‌ای باشد که روی R مصرف می‌شود.

$$S_s = V_s I_s^* = (167970 \angle 8.17^\circ)(557.6 \angle 26.91^\circ) = 167970 \times 557.6 \angle (8.17^\circ + 26.91^\circ)$$

$$S_s = 167970 \times 557.6 \cos(8.17^\circ + 26.91^\circ) + j 167970 \times 557.6 \sin(8.17^\circ + 26.91^\circ)$$

ب) راکتیو: تفاوت Q_s و Q_R باید در خازن‌ها و سلف باشد.

