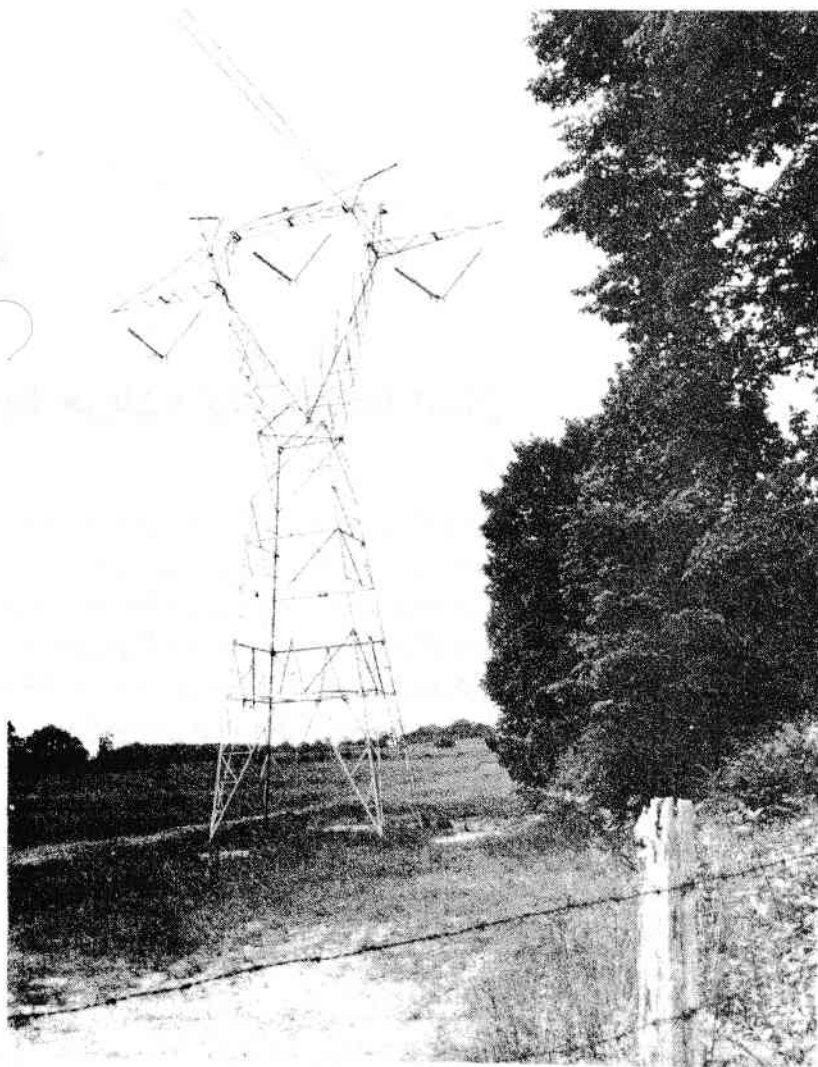


روابط جریان و ولتاژ در خط انتقال

اکنون که پارامترهای خط انتقال را شناختیم، آماده‌ایم تا به بررسی خط انتقال به عنوان جزیی از سیستم قدرت بپردازیم. شکل ۵-۱، یک خط 500 kV را با هادیهای گروهی نشان می‌دهد. در خط هوایی هادیها به دکل آویخته می‌شوند و مقره‌هایی، که تعدادشان را ولتاژ خط تعیین می‌کند هادیها را نسبت به یکدیگر و نسبت به دکل عایق می‌سازد. هر رشته مقره در شکل ۵-۱ دارای ۲۲ مقره است. دو بازوی کوتاه‌تر دکل در بالای هادیهای فازها، سیم‌هایی معمولاً از جنس فولاد حمل می‌کنند. این سیمها که قطرشان بسیار کوچکتر از سیم فازهاست در تصویر دیده نمی‌شوند، اما از نظر الکتریکی به دکل متصل و بنا بر این با زمین هم پتانسیل‌اند. این سیمها سیم زمین نامیده می‌شوند و هادیهای فازها را در مقابل آذرخش محافظت می‌کنند.

یکی از مسائل مهم در طراحی و بهره‌برداری از سیستم قدرت، نگه داشتن ولتاژ در محدوده‌ای مشخص در نقاط مختلف سیستم است. در این فصل به فرموله‌ای دست خواهیم یافت که به وسیله آنها می‌توان ولتاژ، جریان و توان را در هر نقطه از خط انتقال به دست آورد، چنانچه این مقادیر در یک نقطه از خط که معمولاً یکی از دوسر خط است معلوم باشد. این فصل در ضمن، مقدمه‌ای بر مطالعه پدیده‌های گذرا در خطوط بی‌اتلاف است تا نشان دهد چه مسائلی بر اثر ضربه‌های حاصل از آذرخش و قطع و وصل خطوط پیش می‌آید. لیکن، هدف این فصل، تنها به دست آوردن معادلات مربوط نیست، بلکه این فرصت را نیز فراهم می‌آورد. که از تأثیر پارامترهای خط بر ولتاژ شینه‌ها و گذر توان در طول



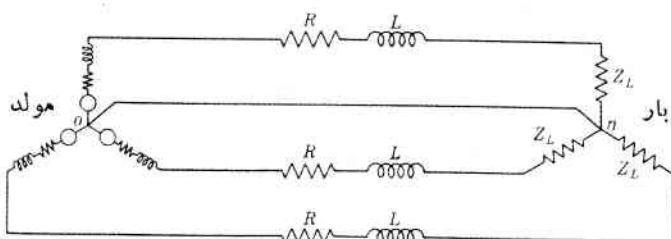
شکل ۵-۱ یک خط انتقال ۵۰۰ kV، با هادیهای از نوع ACSR ۷۶/۱۹ و سطح مقطع آلومینیوم ۲۵۱۵۰۰۰ cmil. فاصله گذاری بین فازها ۳۰ فوت و ۳ اینچ است و دو سیم هر گروه ۱۸ اینچ از هم فاصله دارند.

خط آگاه شویم. به این طریق می‌توانیم اهمیت طراحی خط را دریابیم و مباحثی را که در فصلهای آینده مطرح خواهد شد بهتر درک کنیم.

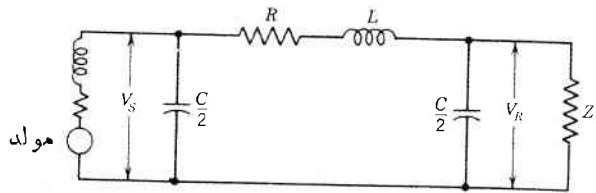
در سیستمهای قدرت امروزی، داده‌ها از سراسر سیستم مدام، به منظور کنترل و داشتن اطلاعات، به کامپیوترهای تغذیه مستقیم، خورانده می‌شود. بررسیهای توزیع بار که به وسیله کامپیوتر انجام می‌شود، به سرعت پاسخ سؤالاتی مربوط به تأثیر وارد و خارج کردن خطوط انتقال از سیستم و یا تغییرات پارامترهای خطوط را در اختیار می‌گذارد. لیکن، اهمیت معادله‌های به دست آمده در این فصل در این است که در پدید آمدن درکی کلی از آنچه در سیستم می‌گذرد و در محاسبه بازدهی انتقال، اتلافها، و محدودیتهای گذر توان در خط چه در حالت مانا و چه در حالت گذرا کمک می‌کند.

۱-۵ نمایش خطهای انتقال

معادله‌های کلی ربط دهنده ولتاژ و جریان در خط انتقال مؤید این امرند که هر چهار پارامتر خط انتقال که در دو فصل پیش، بررسی شدند در طول خط، توزیع یکنواخت دارند. این معادله‌ها را بعداً به دست خواهیم آورد، اما نخست پارامترهای فشرده را به کار می‌بریم که برای خط انتقال کوتاه و خط با طول متوسط دقت کافی فراهم می‌کنند. اگر یک خط هوائی به عنوان کوتاه، طبقه‌بندی شود ظرفیت موازی به قدری کوچک است که با حفظ دقت کافی می‌تواند نادیده گرفته شود و تنها لازم است مقاومت متوالی R و اندوکتانس متوالی L را برای طول خط در نظر بگیریم شکل ۲-۵، ژنراتوری اتصال-ستاره‌ای را نشان می‌دهد که از طریق خط انتقال کوتاهی بار متعادل اتصال-ستاره‌ای را تغذیه می‌کند. R و L به صورت پارامترهای متمرکز، یا فشرده، نشان داده شده‌اند. اگر از ادمیتانس موازی خط صرف نظر شود، تا آنجا که به مقادیر اندازه‌گیری شده در دوسر خط مربوط می‌شود، تفاوتی نمی‌کند که پارامترهای خط را به صورت فشرده در نظر بگیریم یا به صورت گسترده زیرا در این حالت، جریان در سراسر خط یک مقدار دارد. ژنراتور را امپدانس متوالی با emf تولیدی هر فاز نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۵ ژنراتوری در حال تغذیه باری اتصال-ستاره‌ای از طریق خط انتقالی که در آن مقاومت R و اندوکتانس L برای تمام طول خط است. از ظرفیت خط صرف نظر شده است.



شکل ۳-۵ معادل تکفاز مدار شکل ۲-۵ با افزودن نیمی از ظرفیت کل خط نسبت به خنثی به هر سرخط.

خط انتقال با طول متوسط را نیز می‌توان با برخورداری از دقت کافی به کمک پارامترهای R و L فشرده، مطابق شکل ۳-۵، با نیمی از ظرفیت خط نسبت به خنثی به‌طور فشرده در هر سرمدار هم‌ارز خط نمایش داد. رسانایی موازی خط، G ، چنانکه گفتیم، معمولاً هنگام محاسبه ولتاژ و جریان خطوط انتقال قدرت هوایی نادیده گرفته می‌شود. تا آنجا که مسئله ظرفیت مطرح است، خطوط انتقال هوایی 60 Hz کوتاه‌تر از حدود 80 km (50 mi)، خط کوتاه به‌شمار می‌آیند. خطوط انتقال متوسط حدوداً بین 80 km (50 mi) و 240 km (150 mi) اند. در محاسبات خطوط طولانی‌تر از 240 km (150 mi)، در صورت نیاز به دقت زیاد، باید پارامترهای گسترده را به‌کار برد. اگر چه در محاسبات خاصی می‌توان برای نمایش خط‌های به‌طول تا 320 km (200 mi) نیز از پارامترهای فشرده بهره گرفت.

خطوط انتقال، معمولاً با بارهای سه فاز متعادل بهره‌برداری می‌شوند. و با اینکه فاصله‌گذاری متقارن و جایگشت ندارند عدم تقارن حاصل در آنها بسیار جزئی است و فازها متعادل در نظر گرفته می‌شوند.

برای تشخیص امپدانس متوالی کل خط از امپدانس متوالی واحد طول، نمادهای زیر را به‌کار می‌بریم

$$Z = \text{امپدانس متوالی واحد طول هر فاز}$$

$$Y = \text{ادمیتانس موازی واحد طول هر فاز نسبت به خنثی}$$

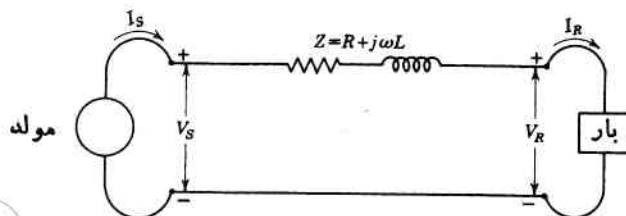
$$l = \text{طول خط}$$

$$Z = z l = \text{امپدانس متوالی کل هر فاز}$$

$$Y = y l = \text{ادمیتانس موازی کل هر فاز نسبت به خنثی}$$

۲-۵ خط انتقال کوتاه

مدار معادل خط انتقال کوتاهی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، که در آن I_S و I_R ، جریانهای سרוته خط و V_S و V_R ولتاژهای خط خنثای سروته خط هستند.



شکل ۴-۵ مدار معادل خط انتقال کوتاهی که در آن R و L ، مقاومت و اندوکتانس کل خط است.

حل این مدار عیناً مانند حل يك مدار متوالی ساده جریان متناوب است. چون هیچ شاخه موازی در مدار نیست، جریان سروه خط یکی است و

$$I_S = I_R \quad (۱-۵)$$

ولتاژ سرخط عبارت است از

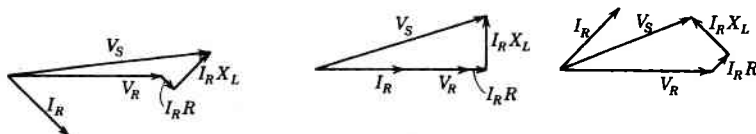
$$V_S = V_R + I_R Z \quad (۲-۵)$$

که در آن Z برابر z ، امپدانس متوالی خط است.

تأثیر تغییر ضریب توان بار بر فروافت ولتاژ خط برای خط انتقال کوتاه به سادگی قابل درک است و بنا بر این در همین جا بررسی می شود. فروافت ولتاژ خط انتقال عبارت است از افزایش ولتاژ ته خط، بر حسب درصدی از ولتاژ بار کامل، زمانی که بار کامل یا ضریب توان معینی از روی خط برداشته شود در حالی که ولتاژ سر خط ثابت بماند. به صورت معادله

$$\text{فروافت ولتاژ درصدی} = \frac{|V_{R, NL}| - |V_{R, FL}|}{|V_{R, FL}|} \times 100 \quad (۳-۵)$$

که در آن $|V_{R, NL}|$ اندازه ولتاژ ته خط در حالت بی باری و $|V_{R, FL}|$ اندازه ولتاژ ته خط در بار کامل است، وقتی $|V_S|$ ثابت بماند. پس از برداشتن بار از روی خط انتقال کوتاه شکل ۴-۵، ولتاژ ته خط با ولتاژ سر خط برابر می شود. در شکل ۴-۵، هنگامی که بار به خط وصل است، ولتاژ ته خط با V_R که اندازه اش برابر $|V_{R, FL}|$ است، و ولتاژ سر خط با $|V_S|$ که اندازه اش برابر $|V_{R, NL}|$ است نشان داده می شود. نمودارهای فاز برداری شکل ۵-۵ برای جریانها و ولتاژهای ته خط یکسانی رسم شده اند و نشان



(الف) ضریب توان بار = ۷۰ درصد پسا رفتی

(ب) ضریب توان بار = ۱۰۰ درصد

(ج) ضریب توان بار = ۷۰ درصد پیش رفتی

شکل ۵-۵ نمودارهای فاز برداری خط انتقال کوتاه، V_R و I_R در هر سه نمودار، يك مقدار دارند.

می‌دهند که برای تأمین ولتاژ معینی در تخط، زمانی که جریان بار نسبت به ولتاژ پس‌افت دارد، نیاز به ولتاژ بیشتری در سرخط داریم تا زمانی که همان جریان با ولتاژ همفاز است. هنگامی که جریان بار نسبت به ولتاژ پیش‌افت دارد به ولتاژ سرخط کوچکتر از زمانی که جریان و ولتاژ همفازند، نیاز داریم. افت ولتاژ در طول خط در هر حالت به حالت يك اندازه دارد اما به علت ضرب توانهای متفاوت، فاز بردار افت ولتاژ در هر حالت با زاویه متفاوتی با فاز بردار ولتاژ ته خط جمع می‌شود. افت ولتاژ در ضریب توانهای پس‌افتی حداکثر و در ضریب توانهای پیش‌افتی حداقل، یا حتی منفی است. ریکتنانس القایی هر خط انتقال از مقاومتش بسیار بزرگتر است، واصل فروافت ولتاژ که در شکل ۵-۵ به نمایش گذاشته شده است برای هر باری که از مداری عمدتاً القایی تغذیه شود معتبر است. اندازه افت ولتاژهای $I_R X_L$ و $I_R R$ خط کوتاه در نمودارهای شکل ۵-۵ بسیار بزرگتر از واقع نسبت به V_R رسم شده‌اند تا مطلب روشنتر به نمایش درآید. رابطه بین ضریب توان و فروافت ولتاژ برای خطهای طولانی‌تر نیز شبیه خطهای کوتاه است اما به این سادگی به نمایش در نمی‌آید.

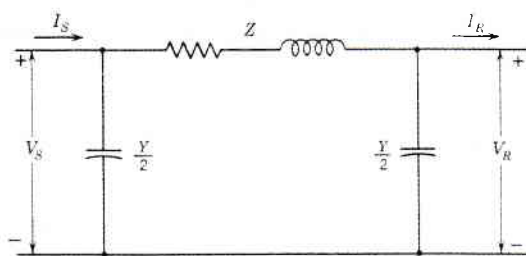
۳-۵ خط انتقال با طول متوسط

ادمیتانس موازی، غالباً به صورت سرقت خازنی، در محاسبات مربوط به خط با طول متوسط وارد می‌شود. اگر نیمی از ادمیتانس موازی خط را در سرخط ونیمی دیگر را در ته خط در نظر بگیریم مدار π نامی به دست می‌آید. برای به دست آوردن معادله‌ها به شکل ۵-۶ رجوع می‌کنیم. با توجه به اینکه جریان در خازن ته خط $V_R Y/2$ و جریان در امدانس متوالی خط $I_R + V_R Y/2$ است، V_S را حساب می‌کنیم

$$V_S = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R \quad (4-5)$$

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R \quad (5-5)$$

برای به دست آوردن I_S ، جریان خازن موازی سرخط یعنی $V_S Y/2$ را با جریان امدانس متوالی خط جمع می‌کنیم



شکل ۵-۶ مدار π نامی خط انتقالی با طول متوسط.

$$I_S = V_S \frac{Y}{\varphi} + V_R \frac{Y}{\varphi} + I_R \quad (۶-۵)$$

اگر از معادله (۵-۵)، مقدار V_S را در معادله (۶-۵) بگذاریم نتیجه می‌دهد.

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{ZY}{\varphi} \right) + \left(\frac{ZY}{\varphi} + 1 \right) I_R \quad (۷-۵)$$

شیبه همین معادله‌ها را می‌توان برای مدار T نامی خط انتقال با طول متوسط، کسه در آن تمام ادمیتانس موازی خط در يك شاخه موازی در وسط و امپدانس متوالی خط بدصورت دوبخش مساوی در دو طرف آن قرار می‌گیرد، به‌دست آورد. معادله‌های (۵-۵) و (۷-۵) را می‌توان به‌صورت کلی زیر بیان کرد:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (۸-۵)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (۹-۵)$$

که در آنها

$$A = D = \frac{ZY}{\varphi} + 1$$

$$B = Z \quad C = Y \left(1 + \frac{ZY}{\varphi} \right) \quad (۱۰-۵)$$

ثابت‌های ABCD را گاهی ثابت‌های عمومی مدار خط انتقال می‌نامند. در حالت کلی این ثابت‌ها اعدادی مختلط‌اند. A و D، بی‌دیمانسیون‌اند و در صورتی که خط از دوسر، به‌نظر یکسان آید باهم برابرند. دیمانسیون B و C به‌ترتیب Ω (اهم) و Ω^{-1} (مو) است. این ثابت‌ها برای شبکه‌های چهار قطبی خطی، تافعال و دو طرفه که دو جهت سر دارند به‌کار می‌روند. به‌سادگی می‌توان به‌این ثابت‌ها معنی فیزیکی داد. باصفر شدن I_R در معادله (۸-۵) می‌بینیم که A، نسبت V_S/V_R در حالت بی‌باری است. به‌همین ترتیب B، باصفر شدن V_R ، نسبت V_S/I_R در حالت ته خط اتصال کوتاه شده است. ثابت A برای محاسبه فروافت ولتاژ مفید است. اگر $V_{R,FL}$ ولتاژ ته خط در بار کامل به‌ازای ولتاژ سرخط V_S باشد، معادله (۳-۵) می‌شود.

$$\text{درصد فروافت ولتاژ} = \frac{|V_S|/|A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (۱۱-۵)$$

ثابت‌های ABCD کاربرد گسترده‌ای ندارند. علت مطرح کردنشان در اینجا این است که آنها کار با معادله‌ها را ساده‌تر می‌کنند. جدول پیوست پ-۶، ثابت‌های ABCD را برای شبکه‌های مختلف و ترکیبات شبکه‌ها به‌دست می‌دهد.

۴-۵ خط انتقال بلند: حل معادله‌های دیفرانسیل

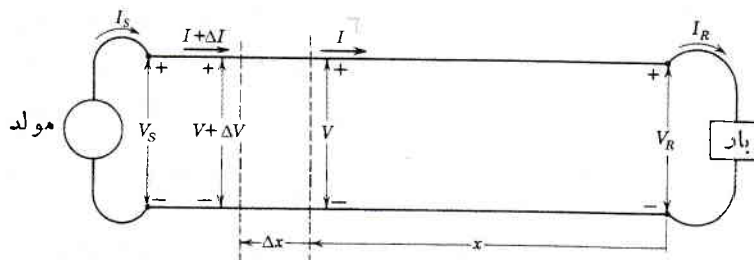
در بررسی دقیق خطهای انتقال، به‌ویژه خطهای طولانی تر از حدود ۱۵۰ mi، باید این حقیقت را در نظر داشت که پارامترهای خط، فشرده نیستند بلکه توزیع یکنواخت در طول خط دارند.

شکل ۷-۵، یک فاز وسیم خنثای خط انتقال سه‌فازی را نشان می‌دهد. پارامترهای فشرده در این شکل نشان داده نشده است، زیرا آماده‌ایم تا با استفاده از امپدانس و ادمیتانس گسترده به بررسی خط بپردازیم. همین نمودار می‌تواند نشان دهنده یک خط انتقال تک‌فاز نیز باشد در صورتی که به جای امپدانس متوالی یک فاز از خط سه‌فاز، امپدانس متوالی حلقه خط تک‌فاز را امپدانس متوالی خط در نظر بگیریم و به جای ادمیتانس موازی خط سه‌فاز نسبت به خنثی، ادمیتانس موازی دوهادی مدار تک‌فاز را ادمیتانس موازی خط انتخاب کنیم. جزء بسیار کوچکی از خط را در نظر می‌گیریم و تفاوت بین ولتاژها و جریانهای دوسر جزء را محاسبه می‌کنیم. هرگاه فاصله این جزء کوچک از ته خط، x و طول آن، Δx باشد امپدانس متوالی این جزء طول، $z \Delta x$ و ادمیتانس موازی آن $y \Delta x$ خواهد شد. ولتاژ نسبت به خنثی، در سری از جزء که نزدیک بار است را با V نشان می‌دهیم. مقدار مختلط ولتاژ مؤثر در آن نقطه است و اندازه و فاز آن با فاصله‌اش در طول خط تغییر می‌کند. ولتاژ در سری از جزء که نزدیک ژنراتور است $V + \Delta V$ خواهد بود. ΔV ، افزایش ولتاژ در جزء طول خط در جهت افزایش x ، یا به عبارت دیگر ولتاژ سر نزدیک به ژنراتور منهای ولتاژ سر نزدیک به بار از جزء است. افزایش ولتاژ در جهت افزایش x همچنین مساوی حاصل ضرب جریان گذرنده در خلاف جهت افزایش x و امپدانس جزء یعنی $Iz \Delta x$ است. لذا

$$\Delta V = Iz \Delta x \quad (۱۲-۵)$$

یا

$$\frac{\Delta V}{\Delta x} = Iz \quad (۱۳-۵)$$



شکل ۷-۵ نمودار طرح‌واره‌ای خط انتقالی که یک فاز و سیم بازگشت را همراه نمادهای خط و جزء طولی از آن نشان می‌دهد.

همینکه $\Delta x \rightarrow 0$ ، حد عبارت بالا می شود

$$\frac{dV}{dx} = Iz \quad (14-5)$$

از طرفی، جریان بیرون رونده از جزء به سوی بار، I است. به علت وجود ادمیتانس موازی گسترده، اندازه و فاز جریان I در طول خط بر حسب فاصله تغییر می کند. جریانی که از سمت ژنراتور وارد جزء می شود $I + \Delta I$ است. جریان ورودی به جزء از سرژنراتور، از جریان خروجی از جزء به سمت بار به اندازه ΔI بیشتر است. این اختلاف همان جریان $Vy \Delta x$ گذرنده از شاخه ادمیتانس موازی جزء است. پس

$$\Delta I = Vy \Delta x$$

و همینکه $\Delta x \rightarrow 0$ ، داریم

$$\frac{dI}{dx} = Vy \quad (15-5)$$

یا مشتق گرفتن از معادله های (14-5) و (15-5) نسبت به x ، نتیجه می گیریم

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \quad (16-5)$$

و

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} \quad (17-5)$$

با گذاردن مقادیر dI/dx و dV/dx از معادله های (14-5) و (15-5)، به ترتیب، در معادله های (16-5) و (17-5)، نتیجه می گیریم

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = yzV \quad (18-5)$$

و

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = yzI \quad (19-5)$$

اکنون متغیرها در معادله (18-5)، تنها V و x و در معادله (19-5) تنها I و x اند. پاسخهای معادله های (18-5) و (19-5) باید چنان باشند که مشتق دوم آنها نسبت به x همان عبارت ابتدایی ضرب در yz باشد. پس پاسخهای آنها باید شکل نمایی داشته باشند. فرض کنید

پاسخ معادله (۱۸-۵) چنین است*

$$V = A_1 \exp(\sqrt{yz} x) + A_2 \exp(-\sqrt{yz} x) \quad (20-5)$$

گرفتن مشتق دوم V نسبت به x در معادله (۲۰-۵) نتیجه می‌دهد

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = yz [A_1 \exp(\sqrt{yz} x) + A_2 \exp(-\sqrt{yz} x)] \quad (21-5)$$

که yz برابر پاسخ فرض شده برای V است. بنابراین معادله (۲۰-۵)، پاسخ معادله (۱۸-۵) است. هرگاه مقدار به‌دست آمده برای V از معادله (۲۰-۵) را در معادله (۱۴-۵) بگذاریم، نتیجه می‌دهد

$$I = \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_1 \exp(\sqrt{yz} x) - \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_2 \exp(-\sqrt{yz} x) \quad (22-5)$$

ثابت‌های A_1 و A_2 را می‌توان از شرایط ته خط که به‌ازای $x=0$ داریم $V=V_R$ و $I=I_R$ به‌دست آورد. گذاردن این مقادیر در معادله‌های (۲۰-۵) و (۲۲-۵) نتیجه می‌دهد

$$V_R = A_1 + A_2 \quad \text{و} \quad I_R = \frac{1}{\sqrt{z/y}} (A_1 - A_2)$$

گذاردن Z_c به‌جای $\sqrt{z/y}$ و حل این معادله‌ها بر حسب A_1 و A_2 نتیجه می‌دهد

$$A_1 = \frac{V_R + I_R Z_c}{2} \quad \text{و} \quad A_2 = \frac{V_R - I_R Z_c}{2}$$

سپس با گذاردن مقادیر A_1 و A_2 در معادله‌های (۲۰-۵) و (۲۲-۵) و به‌فرض $\gamma = \sqrt{yz}$ نتیجه می‌گیریم

$$V = \frac{V_R + I_R Z_c}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_c}{2} e^{-\gamma x} \quad (23-5)$$

$$I = \frac{V_R/Z_c + I_R}{2} e^{\gamma x} - \frac{V_R/Z_c - I_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (24-5)$$

$Z_c = \sqrt{z/y}$ را امپدانس مشخصه و $\gamma = \sqrt{yz}$ را ثابت انتشار خط می‌نامند.

* در عباراتی از این نوع، جمله‌های به‌صورت e به‌توان M را به‌شکل $\exp(M)$ نشان خواهیم داد.

معادله‌های (۲۳-۵) و (۲۴-۵)، در صورت معلوم بودن V_R و I_R و پارامترهای خط، مقادیر مؤثر V و I و زاویه‌های فاز آنها را در هر نقطه از خط بر حسب فاصله x آن نقطه از ته خط به دست می‌دهند.

۵-۵ خط انتقال بلند: تفسیر معادله‌ها

γ و Z_c هر دو کمیت‌هایی مختلط‌اند. بخش حقیقی ثابت انتشار γ را ثابت تضعیف α می‌نامند و بر حسب نپر بر واحد طول می‌سنجند. بخش موهومی γ را نیز ثابت فلاز β می‌گویند و بر حسب رادیان بر واحد طول می‌سنجند بنا بر این

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (25-5)$$

و معادله‌های (۲۳-۵) و (۲۴-۵) می‌شوند

$$V = \frac{V_R + I_R Z_c}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} + \frac{V_R - I_R Z_c}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (26-5)$$

و

$$I = \frac{V_R / Z_c + I_R}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} - \frac{V_R / Z_c - I_R}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (27-5)$$

ویژگی‌های $e^{\alpha x}$ و $e^{j\beta x}$ به تشریح تغییرات مقادیر فاز برداری ولتاژ و جریان بر حسب فاصله در طول خط کمک می‌کنند. اندازه جمله $e^{\alpha x}$ با تغییر x تغییر می‌کند، اما $e^{j\beta x}$ که همان $\cos \beta x + j \sin \beta x$ است، همیشه اندازه‌ای مساوی یک دارد و باعث تغییر فازی معادل β رادیان بر واحد طول خط می‌شود.

جمله اول در معادله (۲۶-۵)، یعنی $\frac{1}{2} [V_R + I_R Z_c] e^{\alpha x} e^{j\beta x}$ ، با زیاد شدن فاصله از ته خط اندازه‌اش بزرگ‌تر می‌شود و پیش‌افتی فاز می‌یابد. برعکس، هر چه از ته خط به سوی سر خط پیش برویم، اندازه این جمله کوچک‌تر می‌شود و پس‌افتی فاز می‌یابد. این مشخصه یک موج رونده است، و به رفتار موج در آب شباهت دارد که اندازه‌اش در هر نقطه با زمان تغییر می‌کند، در حالی که متناسب با فاصله از منشأ، پس‌افتی فاز می‌یابد و مقدار ماکزیممش کم می‌شود. تغییر مقدار لحظه‌ای در این جمله بیان نشده است اما از آنجایی که V_R و I_R فاز بردارند، این تغییرات قابل درک است. جمله اول در معادله (۲۶-۵)، ولتاژ تابنده نامیده می‌شود.

جمله دوم در معادله (۲۶-۵)، رفتاری به عکس جمله اول دارد، و ولتاژ بازتابنده نامیده می‌شود. ولتاژ هر نقطه در طول خط حاصل جمع دو مؤلفه تابنده و بازتابنده ولتاژ در آن نقطه است.

از آنجایی که معادله جریان به معادله ولتاژ شباهت دارد، جریان را نیز می‌توان

مرکب از دو مؤلفه تابنده و بازتابنده جریان دانست. اگر خط انتقال به امپدانس مساوی با امپدانس مشخصه اش Z_0 ختم شود، ولتاژ ته خط، V_R مساوی با $I_R Z_0$ می شود، و همان طور که از گذاردن $I_R Z_0$ به جای V_R در معادله های (۲۶-۵) و (۲۷-۵) برمی آید، هیچ موج ولتاژ و جریان بازتابنده ای وجود نخواهد داشت. خطی را که به امپدانس مشخصه اش ختم شود خط هموار یا خط نامحدود می نامند. اطلاق نامحدود به این دلیل است که خطی با طول نامحدود، موج بازتابنده ندارد. معمولاً خط انتقال قدرت به امپدانس مشخصه اش ختم نمی شود، اما در خط مخابراتی این عمل صورت می گیرد تا امواج بازتابنده حذف شوند. مقدار نمونه وار Z_0 برای خط انتقال هوایی تک مداره 400Ω و برای خط دوبل 200Ω است. زاویه فاز Z_0 معمولاً بین صفر و 15° است. خط دارای هادیهای گروهی، Z_0 کوچکتری دارد زیرا در چنین خطی، L کوچکتر و C بزرگتر است تا در خط بایک سیم برای هر فاز.

در کار با سیستمهای قدرت، امپدانس مشخصه گاهی امپدانس ضربه ای نامیده می شود. لیکن، معمولاً اصطلاح امپدانس ضربه ای در مورد خط بی اتلاف به کار می رود. اگر خطی بی اتلاف باشد مقاومت رسانایش صفر است و امپدانس مشخصه اش به $\sqrt{L/C}$ که یک مقاومت خالص است ساده می شود. هنگامی که با فرکانسهای بالا یا با ضربه های حاصل از آذرخش سروکار داریم، غالباً اتلافها نادیده گرفته می شود و امپدانس ضربه ای خط، اهمیت می یابد. بارگذاری امپدانس ضربه ای (SIL) یک خط انتقال، توانی است که خط به یک بار مقاومتی خالص مساوی با امپدانس ضربه ای تحویل می دهد. با چنین باری جریانی که خط تحویل می دهد

$$|I_L| = \frac{|V_L|}{\sqrt{3} \times \sqrt{L/C}} \quad A$$

که در آن $|V_L|$ اندازه ولتاژ خط به خط بار است. چون بار، مقاومت خالص است

$$SIL = \sqrt{3} |V_L| \frac{|V_L|}{\sqrt{3} \times \sqrt{L/C}} \quad W$$

یا، با $|V_L|$ بر حسب kV،

$$SIL = \frac{|V_L|^2}{\sqrt{L/C}} \quad MW \quad (28-5)$$

مهندسین سیستم قدرت گاهی ترجیح می دهند توانی را که یک خط منتقل می کند بر حسب دریک SIL یعنی به صورت نسبت توان منتقل شده به بارگذاری امپدانس ضربه ای بیان کنند. برای مثال، بارگذاری مجاز یک خط انتقال ممکن است به صورت کسری از SIL خط بیان شود، و SIL، مبنای مقایسه ای برای توانایی انتقال توان خط می شود.

طول موج λ عبارت از فاصله‌ای در طول خط بین دو نقطه از يك موج است كه با هم 360° ، یا 2π رادیان اختلاف داشته باشند. اگر β تغییر فاز بر حسب رادیان بر مایل باشد، طول موج بر حسب مایل عبارت است از

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (29-5)$$

در فرکانس ۶۰ Hz، طول موج تقریباً برابر ۳۰۰۰ mi است. سرعت انتشار موج بر حسب مایل بر ثانیه عبارت است از حاصل ضرب طول موج بر حسب مایل و فرکانس بر حسب هرتز، یا

$$f\lambda = \text{سرعت} \quad (30-5)$$

اگر هیچ باری بر روی خط نباشد، I_R برابر با صفر است، و چنانکه از معادله‌های (۲۶-۵) و (۲۷-۵) برمی‌آید ولتاژهای تابنده و بازتابنده در ته خط، هم اندازه و هم فازند. در این حالت جریانهای تابنده و بازتابنده در ته خط، هم اندازه ولی با 180° اختلاف فازند. بنابراین، جریانهای تابنده و بازتابنده در ته خط با مدار باز یکدیگر را خنثی می‌کنند، اما نه در هیچ نقطه دیگر مگر اینکه خط انتقال کاملاً بی‌اتلاف باشد تا ثابت تضعیف α مساوی صفر شود.

۵-۶ خط انتقال بلند: شکل هذلولوی معادله‌ها

موجهای تابنده و بازتابنده ولتاژ به‌ندرت در هنگام محاسبه ولتاژ يك خط انتقال نمودار می‌شوند. دلیل بحث درباره ولتاژ و جریان خط بر حسب مؤلفه‌های تابنده و بازتابنده این است که چنین تحلیلی به درك کامل تر بعضی از پدیده‌های خط انتقال كمك می‌کند. شكل مناسب‌تر معادله‌ها برای محاسبه جریان و ولتاژ خط با به‌کار گرفتن توابع هذلولوی به‌دست می‌آید. توابع هذلولوی در شكل نمایی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sinh \theta = \frac{\epsilon^\theta - \epsilon^{-\theta}}{2} \quad (31-5)$$

$$\cosh \theta = \frac{\epsilon^\theta + \epsilon^{-\theta}}{2} \quad (32-5)$$

با بازآرایی معادله‌های (۲۳-۵) و (۲۴-۵) و گذاردن توابع هذلولوی به‌جای جملات نمایی، این معادله‌ها که ولتاژ جریان را در هر نقطه از خط به‌دست می‌دهند، به‌صورت زیر نوشته می‌شوند

$$V = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_c \sinh \gamma x \quad (33-5)$$

و

$$I = I_R \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_c} \sinh \gamma x \quad (۳۴-۵)$$

با در نظر گرفتن $x=l$ برای به دست آوردن ولتاژ و جریان در سر خط، خواهیم داشت

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_c \sinh \gamma l \quad (۳۵-۵)$$

و

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_c} \sinh \gamma l \quad (۳۶-۵)$$

از این معادله‌ها برمی آید که ثابتهای عمومی خط بلند عبارت‌اند از

$$A = \cosh \gamma l \quad C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} \quad (۳۷-۵)$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l \quad D = \cosh \gamma l$$

از معادله‌های (۳۵-۵) و (۳۶-۵) می‌توان I_R و V_R را بر حسب I_S و V_S به دست

آورد

$$V_R = V_S \cosh \gamma l - I_S Z_c \sinh \gamma l \quad (۳۸-۵)$$

و

$$I_R = I_S \cosh \gamma l - \frac{V_S}{Z_c} \sinh \gamma l \quad (۳۹-۵)$$

برای خطهای سه فاز متعادل، جریان در معادله‌های بالا جریان خط، و ولتاژ و ولتاژ خط به خطی یعنی ولتاژ خط به خط تقسیم بر $\sqrt{3}$ است. برای حل این معادله‌ها باید مقادیر توابع هذلولوی را به دست آورد. چون γl معمولاً کمیتی مختلط است، توابع هذلولوی مربوط نیز مختلط‌اند و نمی‌توان مقدارشان را از جدولهای معمول یا ماشینهای حساب به دست آورد. قبل از به کارگیری گسترده کامپیوترهای رقمی، نمودارهای مختلفی، که بعضی از آنها مخصوصاً برای انجام محاسبات مربوط به خطهای انتقال قدرت تهیه شده بودند، برای محاسبه مقادیر توابع هذلولوی با آرگومان مختلط به کار می‌رفت. امروزه محاسبات با چنین توابعی غالباً به وسیله کامپیوتر انجام می‌گیرد.

برای حل این گونه معادله‌ها بدون استفاده از کامپیوتر و یا نمودار نیز روشهای مختلفی وجود دارد. معادله‌های زیر بسط سینوس و کسینوس هذلولوی با آرگومان مختلط را بر حسب توابع مثلثاتی و هذلولوی با آرگومان حقیقی به دست می‌دهند:

$$\cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l \quad (۴۰-۵)$$

$$\sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh \alpha l \cos \beta l + j \cosh \alpha l \sin \beta l \quad (۴۱-۵)$$

معادله‌های (۵-۴۰) و (۵-۴۱)، محاسبه توابع هذلولوی با آرگومان مختلط را ممکن می‌سازند. واحد ریاضی صحیح برای βl ، رادیان است که از محاسبه مؤلفه موهومی γl نتیجه می‌شود. درستی معادله‌های (۵-۴۰) و (۵-۴۱) را می‌توان با گذاردن بسط نمایی عبارات طرفین آنها نشان داد.

روش مناسب دیگر، تعیین مقدار توابع هذلولوی، بسط آنها به سری توانی است. بسط با کمک سری مک‌لورن^۱ نتیجه می‌دهد

$$\cosh \theta = 1 + \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} + \frac{\theta^6}{6!} + \dots \quad (۵-۴۲)$$

و

$$\sinh \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} + \frac{\theta^7}{7!} + \dots \quad (۵-۴۳)$$

این سری برای مقادیر متداول γl در خط‌های انتقال قدرت به سرعت همگرا می‌شود و تنها محاسبه چند جمله اول آن دقت لازم را تأمین می‌کند.

روش سوم محاسبه توابع هذلولوی با آرگومان مختلط از معادله‌های (۵-۳۱) و (۵-۳۲) به دست می‌آید. با گذاردن $\alpha + j\beta$ به جای θ نتیجه می‌گیریم

$$\cosh(\alpha + j\beta) = \frac{e^{\alpha} e^{j\beta} + e^{-\alpha} e^{-j\beta}}{2} = \frac{1}{2} (e^{\alpha} \angle \beta + e^{-\alpha} \angle -\beta) \quad (۵-۴۴)$$

و

$$\sinh(\alpha + j\beta) = \frac{e^{\alpha} e^{j\beta} - e^{-\alpha} e^{-j\beta}}{2} = \frac{1}{2} (e^{\alpha} \angle \beta - e^{-\alpha} \angle -\beta) \quad (۵-۴۵)$$

مثال ۵-۱ یک خط انتقال سه فاز ۶۰ Hz تک مداره ۳۷۰ km (۲۳۰ mi) طول دارد. هادیهای آن نوع دوگانه^۲ اند و فاصله گذاری افقی ۷۷.۲۵ m (۲۳۸ ft) دارند. بار این خط، معادل ۱۲۵ MW در ولتاژ ۲۱۵ kV با ضرب توان ۱۰۰٪ است. ولتاژ، جریان و توان را در سر خط و افت ولتاژ خط را به دست آورید. همچنین طول موج و سرعت انتشار را در خط تعیین کنید.

حل: به منظور بهره‌گیری از جدولهای پ-۱ و پ-۳ از واحدهای فوت و مایل به جای متر و کیلومتر استفاده می‌کنیم.

$$D_{eq} = \sqrt[3]{2338 \times 2338 \times 476} \cong 300 \text{ ft}$$

و از روی جدولها برای هادی دوگانه،

$$z = 0.1603 + j(0.415 + 0.4127) = 0.8431 / 79.04^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$y = j[1 / (0.00950 + 0.01009)] \times 10^{-6} = 5105 \times 10^{-6} / 90^\circ \text{ S}/\text{mi}$$

$$\gamma l = \sqrt{yz} l = 230 \sqrt{0.8431 \times 5105 \times 10^{-6}} / \frac{79.04^\circ + 90^\circ}{2}$$

$$= 0.47772 / 84.52^\circ = 0.0456 + j0.4750$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{0.8431}{5105 \times 10^{-6}} / \frac{79.04^\circ - 90^\circ}{2}} = 406.24 / -54.8^\circ \Omega$$

$$V_R = \frac{215000}{\sqrt{3}} = 124130 / 0^\circ \text{ V نسبت به زمین}$$

$$I_R = \frac{125000000}{\sqrt{3} \times 215000} = 335.7 / 0^\circ \text{ A}$$

از معادله‌های (۴۰-۵) و (۴۱-۵)

$$\cosh \gamma l = \cosh 0.0456 \cos 0.475 + j \sinh 0.0456 \sin 0.475^\circ$$

$$= 1.0010 \times 0.8893 + j0.00456 \times 0.4573$$

$$= 0.88902 + j0.00209 = 0.88904 / 1.34^\circ$$

$$\sinh \gamma l = \sinh 0.0456 \cos 0.475 + j \cosh 0.0456 \sin 0.475^\circ$$

$$= 0.0456 \times 0.8893 + j1.0010 \times 0.4573$$

$$= 0.0405 + j0.4578 = 0.4596 / 84.94^\circ$$

سپس از معادله (۳۵-۵)

$$V_s = 124130 \times 0.88904 / 1.34^\circ + 335.7 \times 406.24 / -54.8^\circ$$

$$\times 0.4596 / 84.94^\circ$$

$$= 110495 + j2585 + 11480 + j61622$$

$$= 137851 / 27.77^\circ \text{ V}$$

واز معادله (۳۶-۵)

$$0.475 \text{ rad} = 27.2^\circ *$$

$$\begin{aligned}
 I_s &= 3357 \times 0.8904 / 133^\circ + \frac{124130}{20624 / -528^\circ} \times 0.4596 / 8293^\circ \\
 &= 29883 + j6999 - 103 + j14033 \\
 &= 33227 / 2633^\circ
 \end{aligned}$$

در سرخط

$$V = \sqrt{3} \times 13785 = 23888 \text{ kV}$$

$$\text{جریان خط} = 33223 \text{ A}$$

$$\cos(\text{ضریب توان}) = \cos(2778^\circ - 2633^\circ) = 0.9997 \cong 1.0$$

$$\text{توان} = \sqrt{3} \times 23888 \times 33223 \times 1.0 = 137440 \text{ kW}$$

از معادله (۵-۳۵) درمی یابیم که در حالت بی باری ($I_R = 0$)

$$V_R = \frac{V_s}{\cosh \gamma l}$$

بنابراین افت ولتاژ عبارت است از

$$\frac{137885 / 0.8904 - 12413}{12413} \times 100 = 24.7\%$$

طول موج و سرعت انتشار به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\beta = \frac{0.475}{230} = 0.002065 \text{ rad/mi}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{0.002065} = 3043 \text{ mi}$$

$$\text{سرعت} = f\lambda = 60 \times 3043 = 182580 \text{ mi/s}$$

در این مثال، به ویژه متوجه می شویم که در معادله های V_s و I_s ولتاژ باید بر حسب ولت بیان شود و ولتاژ خط به خنثی باشد.

□
مثال ۵-۲ ولتاژ و جریان سرخط را برای خط انتقال مثال ۵-۱ با استفاده از محاسبات در-یکی به دست آورید.

حل: برای رسیدن به ساده ترین مقادیر در-یکی، مبنا را ۱۲۵ MVA و ۲۱۵ kV اختیار می کنیم و امپدانس و جریان مبنا را به صورت زیر محاسبه کنیم:

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{(215)^2}{125} = 370 \Omega$$

$$\text{جریان مبنا} = \frac{125000}{\sqrt{3} \times 215} = 3357 A$$

بنابراین

$$Z_c = \frac{40694 / -54.8^\circ}{370} = 109.8 / -54.8^\circ \text{ در-يك}$$

$$V_R = \frac{215}{215} = \frac{215 / \sqrt{3}}{215 / \sqrt{3}} = 1.0 \text{ در-يك}$$

برای استفاده در معادله V_R (۳۵-۵) را ولتاژ مبنا گرفتیم. بنابراین

$$V_R = 1.0 / 0^\circ \text{ در-يك (ولتاژ خط به خطی)}$$

واز آنجایی که بار دارای ضریب توان يك است

$$I_R = \frac{3357 / 0^\circ}{3357} = 1.0 / 0^\circ$$

اگر ضریب توان بار، کمتر از ۱۰۰٪ بود I_R بزرگتر از يك می شد و زاویه فازش را ضریب توان تعیین کرد.

بر طبق معادله (۳۵-۵)

$$\begin{aligned} V_S &= 1.0 \times 0.8904 / 13.4^\circ + 1.0 \times 109.8 / -54.8^\circ \times 0.4596 / 84.94^\circ \\ &= 0.8902 + j0.0208 + 0.0923 + j0.4961 \\ &= 1.1102 / 27.75^\circ \text{ در-يك} \end{aligned}$$

و بنا بر معادله (۳۶-۵)

$$\begin{aligned} I_S &= 1.0 \times 0.8904 / 13.4^\circ + \frac{1.0 / 0^\circ}{109.8 / -54.8^\circ} \times 0.4596 / 84.94^\circ \\ &= 0.8902 + j0.0208 - 0.0031 + j0.4186 \\ &= 0.9990 / 26.35^\circ \text{ در-يك} \end{aligned}$$

در سر خط

$$= 238.7 \text{ kV} = 110.2 \times 215 = \text{ولتاژ خط}$$

$$= 332.3 \text{ A} = 0.990 \times 335.7 = \text{جریان خط}$$

توجه کنید که اگر مبنای ولتاژ خط به خط را در اندازه در-یکی ولتاژ ضرب کنیم اندازه ولتاژ خط به خط به دست می آید. لذا برای به دست آوردن ولتاژ خط به خنثی می بایست مبنای ولتاژ خط به خنثی را در ولتاژ در-یکی ضرب می کردیم. ضریب $1/\sqrt{3}$ ، پس از بیان همه کمیتها بر حسب در-یک، دیگر وارد محاسبات نمی شود. □

۵-۷ مدار معادل خط انتقال بلند

مدارهای T نامی و π نامی، خطوط انتقال را به دقت نمایش نمی دهند، زیرا گستردگی یکنواخت پارامترهای خط در آنها منظور نشده است. تمایز بین مدارهای T و π نامی و خط انتقال واقعی با افزایش طول خط، بیشتر می شود. لیکن، تا آنجا که مقادیر ولتاژ و جریان تنها سرهای خط مطرح باشد، می توان مدار معادل یک خط انتقال بلند را به کمک مداری از پارامترهای فشرده نشان داد. فرض می کنیم که یک مدار π شبیه مدار شکل ۵-۶، مدار معادل خط انتقال بلند باشد، شاخه متوالی این مدار را Z' و شاخه های موازی آن را $Y'/2$ می نامیم تا تمایزش را با مدار π نامی نشان داده باشیم. معادله (۵-۵)، ولتاژ سر خط را بر حسب ولتاژ و جریان ته خط برای یک مدار π متقارن به دست می دهد. با گذاردن Z' و $Y'/2$ به جای Z و $Y/2$ در معادله (۵-۵)، ولتاژ سر خط مدار معادل جدید را بر حسب امپدانس و ادمیتانس شاخه ها و ولتاژ و جریان ته خط به دست می آوریم:

$$V_S = \left(\frac{Z'Y'}{2} + 1 \right) V_R + Z' I_R \quad (5-46)$$

برای اینکه این مدار، معادل خط انتقال بلند باشد ضرایب V_R و I_R در معادله (۵-۴۶) باید، به ترتیب، همان ضرایب معادله (۵-۳۵) باشند. مساوی قرار دادن ضرایب I_R در دو معادله نتیجه می دهد

$$Z' = Z_e \sinh \gamma l$$

$$Z' = \sqrt{\frac{Z}{y}} \sinh \gamma l = z l \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{zy} l} \quad (5-47)$$

$$Z' = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \quad (5-48)$$

که در آن Z ، امپدانس کل خط و برابر با $z l$ است. جمله $(\sinh \gamma l)/\gamma l$ ، ضریبی است که امپدانس متوالی π نامی باید در آن ضرب شود تا امپدانس متوالی مدار معادل π خط

انتقال بلند به دست آید. برای مقادیر کوچک γl ، مقدار $\sinh \gamma l$ با خود γl تقریباً برابر می شود، و این نشان می دهد که تا آنجا که امپدانس متوالی مطرح است همان مدار π نامی می تواند به خوبی معرف یک خط انتقال با طول متوسط باشد.

برای بررسی شاخه های موازی مدار π معادل، ضرایب V_R را در دو معادله (۵-۳۵) و (۵-۴۶) برابر می گیریم

$$\frac{Z'Y'}{2} + 1 = \cosh \gamma l \quad (۵-۴۹)$$

گذارند $Z_c \sinh \gamma l$ به جای Z' نتیجه می دهد

$$\frac{Y'Z_c \sinh \gamma l}{2} + 1 = \cosh \gamma l \quad (۵-۵۰)$$

و

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} \quad (۵-۵۱)$$

با گذاردن اتحاد زیر در معادله (۵-۵۱) شکل دیگری از عبارت ادmittانس موازی مدار معادل به دست می آید

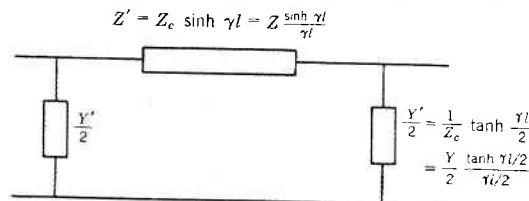
$$\tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} \quad (۵-۵۲)$$

این اتحاد با گذاردن اشکال نمایی معادله های (۵-۳۱) و (۵-۳۲) به جای توابع هذلولوی و با دانستن اینکه $\tanh \theta = \sinh \theta / \cosh \theta$ ، اثبات می شود. اکنون

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma l}{2} \quad (۵-۵۳)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \quad (۵-۵۴)$$

که در آن Y ، admittانس موازی کل خط و برابر yl است. معادله (۵-۵۴) ضریب تصحیح لازم برای تبدیل admittانس شاخه های موازی مدار π نامی به admittانس شاخه های موازی مدار π معادل یک خط بلند را نشان می دهد، چون $\tanh(\gamma l/2)$ و خود $\gamma l/2$ به ازای مقادیر کوچک γl تقریباً با هم برابرند، و چون قبلاً دیدیم که در طولهای متوسط ضریب تصحیح شاخه متوالی قابل صرف نظر کردن است، همان مدار π نامی می تواند با دقت کافی معرف یک خط انتقال با طول متوسط باشد. مدار π معادل را شکل ۵-۸ نشان می دهد. برای خط انتقال می توان مدار T معادل نیز به دست آورد.



شکل ۸-۵ مدار π معادل هر خط انتقال.

مثال ۳-۵ مدار π معادل خط انتقال مثال ۱-۵ را به دست آورید و آن را با مدار π نامی خط مقایسه کنید.

حل: با در دست داشتن مقدار $\sinh \gamma l$ و $\cosh \gamma l$ از مثال ۱-۵، معادله‌های (۴۷-۵) و (۵۱-۵) را به کار می‌بریم

$$Z' = 406.4 / -52.48^\circ \times 0.2596 / 82.94^\circ = 186.78 / 79.46^\circ \Omega$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{0.8902 + j0.208 - 1}{186.78 / 79.46^\circ} = \frac{0.1118 / 169.27^\circ}{186.78 / 79.46^\circ}$$

$$= 0.000599 / 89.81^\circ \Omega \text{ در هر شاخه موازی}$$

امپدانس سری مدار π نامی عبارت است از

$$Z = 230 \times 0.8431 / 79.04^\circ = 193.9 / 79.04^\circ \Omega$$

و شاخه‌های موازی برابر با هم

$$\frac{Y}{2} = \frac{5105 \times 10^{-6} / 90^\circ}{2} \times 230 = 0.000587 / 90^\circ \Omega$$

در این خط، امپدانس متوالی مدار π نامی از امپدانس متوالی مدار π معادل به میزان ۳۸٪ بیشتر است. رسانایی شاخه‌های موازی مدار π نامی، ۲۵٪ کمتر از رسانایی شاخه‌های موازی مدار π معادل است. پس نتیجه می‌گیریم که اگر دقت خیلی زیاد، لازم نباشد مدار π نامی می‌تواند برای نمایش خط‌های بلند نیز به کار رود. □

۸-۵ توزیع توان در طول خط انتقال

اگر چه توزیع توان در هر نقطه از خط انتقال را همیشه می‌توان با دانستن ولتاژ، جریان و ضریب توان به دست آورد، معادله‌های بسیار جالبی برای توان بر حسب ثابت‌های ABCD

خط نیز می‌توان یافت. البته این معادله‌ها در مورد هر شبکه چهار قطبی کاربرد دارند. از معادله (۵-۸)، جریان ته‌خط، I_R چنین به‌دست می‌آید

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (5-55)$$

$$I_R = \frac{V_S - AV_R}{B} \quad (5-56)$$

بافرض اینکه

$$A = |A| \angle \alpha \quad B = |B| \angle \beta$$

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ \quad V_S = |V_S| \angle \delta$$

نتیجه می‌گیریم

$$I_R = \frac{|V_S|}{|B|} \angle \delta - \beta - \frac{|A| \cdot |V_R|}{|B|} \angle \alpha - \beta \quad (5-57)$$

به این ترتیب توان مختلط $V_R I_R^*$ در ته‌خط عبارت است از

$$P_R + jQ_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \angle \beta - \delta - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \angle \beta - \alpha \quad (5-58)$$

و توانهای حقیقی و واکنشی در ته‌خط عبارت اند از

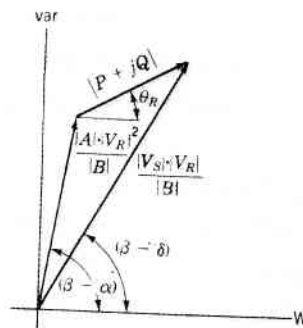
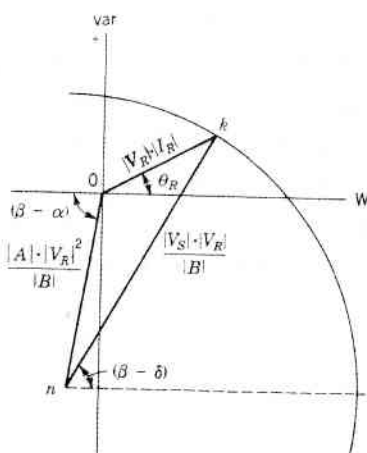
$$P_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (5-59)$$

$$Q_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \quad (5-60)$$

با توجه به اینکه توان مختلط بر طبق معادله (۵-۵۸) از ترکیب دوفاز بردار بانمایش قطبی به‌دست می‌آید می‌توان این دوفاز بردار را در مختصات مختلطی که محورهایش بر حسب واحد توانهای حقیقی و واکنشی (وات و وار) مدرج شده‌اند رسم کرد. شکل ۵-۹، دو کمیت مختلط نظیر معادله (۵-۵۸) و تفاضلشان را نشان می‌دهد. شکل ۵-۱۰، همان فاز بردارها را هنگامی که مبدأ مختصات به ابتدای بردار توان مختلط انتقال می‌یابد نشان می‌دهد. این شکل، نمودار توانی است که فاز بردارش دارای اندازه $|P_R + jQ_R|$ یا $|V_R| \cdot |I_R|$ است و زاویه θ_R را با محور افقی می‌سازد. همان طور که انتظار می‌رفت مؤلفه‌های حقیقی و موهومی $|P_R + jQ_R|$ عبارت اند از

$$P_R = |V_R| \cdot |I_R| \cos \theta_R \quad (5-61)$$

و



شکل ۵-۹ ترسیم فازبردادهای معادله (۵-۵۸) در مختصات مختلط، با نمایش اندازه‌ها و زاویه‌ها نشان.

شکل ۵-۱۰ نمودار قدرت پس از تغییر مبدأ مختصات شکل ۵-۹.

$$Q_R = |V_R| \cdot |I_R| \sin \theta_R \quad (۵-۶۲)$$

که در آنها θ_R ، چنانکه در فصل ۲ دیدیم زاویه پیشافت V_R نسبت به I_R است. علامت Q هم با قاعده‌ای که برای جریانهای پس‌افتی نسبت به ولتاژ، علامت توان واکنشی، مثبت است سازگاری دارد.

اکنون چند نقطه از نمودار توان شکل ۵-۱۰ را برای بارهای مختلف به‌ازای مقادیر ثابت $|V_S|$ و $|V_R|$ تعیین می‌کنیم. نخست، دیده می‌شود که مکان نقطه n به‌جریان I_R بستگی ندارد و تا زمانی که $|V_R|$ ثابت است تغییر نمی‌کند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که فاصله بین نقاط n و k برای مقادیر ثابت $|V_S|$ و $|V_R|$ ، ثابت است. بنابراین، از آنجایی که فاصله o تا k با مقدار بار تغییر می‌کند، و فاصله k باید از نقطه ثابت n همواره به یک اندازه باشد، مکان نقطه k ، به‌ازای بارهای مختلف باید دایره‌ای به مرکز n باشد. هر تغییری در P_R باید با تغییری در Q_R همراه باشد تا k بر روی دایره بماند. اگر مقدار تازه‌ای به $|V_S|$ داده شود درحالی که $|V_R|$ ثابت بماند محل نقطه n تغییر نمی‌کند اما دایره جدیدی به شعاع nk به‌دست می‌آید.

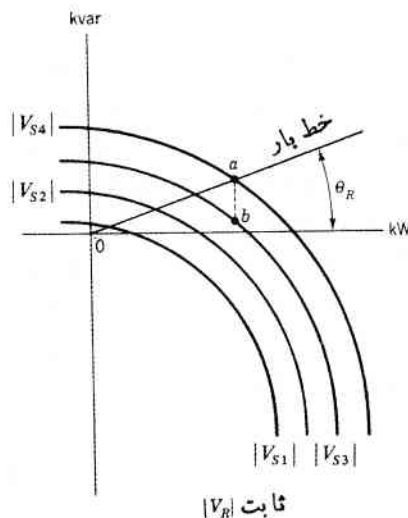
در معادله‌های (۵-۵۵) تا (۵-۶۲)، $|V_S|$ و $|V_R|$ ، ولتاژهای خط به‌خشی و مختصات هر نقطه از شکل ۵-۱۰، وات و وار هر فاز است. لیکن، اگر $|V_S|$ و $|V_R|$ ولتاژهای خط به‌خط باشند اندازه‌ها ۳ برابر می‌شوند و مختصات هر نقطه، وات و وار کل سه‌فاز خواهند بود. اگر ولتاژها بر حسب کیلوولت باشند، مختصات هر نقطه بر حسب مگاوات، و مگاوار خواهند بود.

اگر ولتاژ ته خط ثابت نگه داشته شود، دوایری هم مرکز به ازای ولتاژهای دیگر سرخط به دست می آید. زیرا محل مرکز دوایر توان ته خط از ولتاژ سرخط مستقل است. یک دسته از این دایره ها برای ولتاژ ثابتی در ته خط در شکل ۱۱-۵ رسم شده است. خط باری که در شکل ۱۱-۵ دیده می شود مربوط به باری است که اندازه اش تغییر می کند در حالی که ضریب توانش ثابت است. کسینوس زاویه بین خط بار و محور افقی، ضریب توان بار است. خط بار در شکل ۱۱-۵ برای بارهای پس افنی رسم شده است زیرا تمام نقاط خط بار در ربع اول اند و وار مثبت دارند.

از زمان رواج کامپیوترهای رقمی، نمودارهای دایره ای دیگر کاربرد عملی چندانی ندارند. دلیل بررسی آنها در این بخش تنها به نمایش گذاشتن بعضی مفاهیم مربوط به بهره برداری خطهای انتقال است. برای مثال، بررسی شکل ۱۰-۵ نشان می دهد که به ازای ولتاژهای معین سر و ته خط، توان قابل انتقال به ته خط محدودیت دارد. افزایش توان در ته خط به این معنی است که نقطه k بروی دایره حرکت می کند تا زاویه $\beta - \delta$ صفر شود، یعنی، بیشترین توان به ازای تساوی زوایای δ و β انتقال می یابد. افزایش بیشتر زاویه δ باعث کاهش توان دریافتی خواهد شد. توان ماکزیمم عبارت است از

$$P_{R, \max} = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (۶۳-۵)$$

توان دریافتی در ته خط، هنگامی ماکزیمم می شود که بار، جریان پیش افنی زیادی بکشد. در شکل ۱۱-۵، طول پاره خط قائمی که نقطه تقاطع خط بار با دایره $|V_{S4}|$ یعنی نقطه a را به نقطه b از دایره $|V_{S3}|$ متصل می کند برابر مقدار توان واکنشی منفی است



شکل ۱۱-۵ دایره های توان ته خط به ازای مقادیر مختلف $|V_S|$ و $|V_R|$ ثابت.

که باید خازنهای موازی بسته شده به بار بکشند تا وقتی ولتاژ سرخط از $|V_{sp}|$ به $|V_{sr}|$ کاهش می یابد ولتاژ ته خط، V_R' ، ثابت باقی بماند. چنانکه از شکل ۵-۱۱ پیداست، افزایش مقدار کمی کیلووار خازنی دیگر منجر به این می شود که بار مرکبی با ضریب توان يك داشته باشیم و $|V_s|$ لازم برای همان $|V_R|$ باز هم کاهش یابد. این بررسی نشان می دهد که در صورت ثابت بودن $|V_s|$ با افزودن خازن به بار پس افتی می توان $|V_R|$ را افزایش داد. یکی از نتایج متعددی که برای نمودار دایره ای شکل ۵-۱۱ ظاهر می سازد، تغییرات ولتاژ سرخط به ازای توانهای حقیقی و واکنشی مختلف دریافتی است تا ولتاژ ته خط را بتوان ثابت نگه داشت. برای مثال، به ازای يك θ_R ثابت در طرف بار، مختصات محل برخورد خط بار با هر دایره ولتاژ سرخط ثابت عبارت است از P و Q بار به ازای مقادیری از $|V_s|$ و $|V_R|$ که نمودار برای آنها رسم شده است.

۵-۹ جبران واکنشی خط انتقال

کارکرد خط انتقال، به ویژه خط با طول متوسط و خط بلند را می توان از طریق جبران از نوع متوالی یا موازی توان واکنشی خط بهبود بخشید. در جبران از نوع متوالی، خازنهایی متوالی با هر يك از فازهای خط قرار می گیرند. در جبران از نوع موازی نیز القاگرهایی بین هر فاز خط و خنثی، به منظور کاستن سوسپتانس موازی خطوط فشار قوی قرار می گیرد. جبران موازی، به ویژه زمانی که بار خط سبک می شود، برای جلوگیری از افزایش بی رویه ولتاژ ته خط انتقال بسیار اهمیت می یابد.

جبران از نوع متوالی، امیدانس متوالی خط را که دلیل اصلی افت ولتاژ و مهمترین عامل در تعیین حداکثر توانی است که خط می تواند انتقال دهد، کاهش می دهد. برای درک تأثیر امیدانس متوالی Z بر حداکثر توان انتقالی، معادله (۵-۶۳) را بررسی می کنیم و می بینیم که این توان بستگی دارد به عکس ثابت B خط، که در مدار π نامی، مساوی Z و در مدار π معادل، مساوی $Z(\sinh \gamma l)/\gamma l$ است. ثابتهای A ، C و D نیز تابعهایی از Z اند و مقدارشان تغییر خواهد کرد، اما این تغییرات در مقایسه با تغییر حاصل در B ناچیز است.

رئکتانس خازن مورد نیاز را می توان با در نظر گرفتن اینکه چه مقدار از رئکتانس القایی خط را می خواهیم جبران کنیم محاسبه کرد. به این ترتیب اصطلاح «ضریب جبران» عنوان و به صورت X_c/X_L ، تعریف می شود که در آن X_c ، رئکتانس خازن متوالی با هر فاز و X_L ، رئکتانس القایی کل هر فاز خط است.

زمانی که مدار π نامی برای نمایش خط انتقال و گروه خازن به کار می رود، محل فیزیکی قرار گرفتن خازن را در طول خط به حساب نمی آورند. اگر تنها شرایط سروه خط مهم باشد این کار، خطای چندانی پدید نمی آورد. لیکن، هنگامی که شرایط بهره برداری در طول خط اهمیت دارد، محل نصب گروه خازن باید به حساب آید. این کار را می توان

به سادگی با تعیین ثابتهای $ABCD$ دو بخشی از خط که در هر طرف گروه خازن قرار می گیرند و نمایش دادن گروه خازن به کمک ثابتهای $ABCD$ آن انجام داد. ثابتهای مدار معادل ترکیب متوالی خط-خازن-خط را در این حال می توان به کمک معادله های ارائه شده در جدول پ-۶ پیوست، تعیین کرد.

در جاهایی که نیروگاههای بزرگ در فاصله صدها کیلومتر از مراکز بار قرار دارند و توانهای بسیار زیادی باید در فواصل طولانی منتقل شود، جبران از نوع متوالی، بسیار اهمیت می یابد. مزیت دیگر جبران از نوع متوالی، کاستن افت ولتاژ خط است. خازنهای متوالی، برای ایجاد توازن بین افت ولتاژهای دو خط انتقال موازی نیز سودمند است.

مثال ۴-۵ برای نشان دادن تغییر نسبی ثابت B در مقایسه با تغییر ثابتهای A ، C و D يك خط انتقال بر اثر جبران از نوع متوالی، ثابتهای خط انتقال مثال ۱-۵ را قبل و بعد از جبران از نوع متوالی با ضریب جبران ۷۵٪ به دست آورید.

حل: مدار π معادل و کمیت های محاسبه شده در مثالهای ۱-۵ و ۳-۵ را می توان همراه با معادله های (۳۷-۵) برای تعیین ثابتهای خط پیش از جبران از نوع متوالی به کار گرفت.

$$A = D = \cosh \gamma l = 0.8904 / 1.34^\circ$$

$$B = Z' = 186.78 / 79.46^\circ \Omega$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} = \frac{0.4596 / 84.94^\circ}{206.3 / -54.48^\circ} \\ = 0.001131 / 90.42^\circ \text{ S}$$

جبران از نوع متوالی تنها شاخه متوالی مدار π معادل را تغییر می دهد. امپدانس شاخه سری جدید، ثابت عام B جدید نیز هست. بنا بر این

$$B = 186.78 / 79.46^\circ - j0.7 \times 230(0.215 + j0.2127)$$

$$= 32.17 + j50.38 = 60.88 / 55.85^\circ \Omega$$

و بر طبق معادله های (۱۰-۵)

$$A = 60.88 / 55.85^\circ \times 0.000599 / 89.81^\circ + 1 = 0.970 / 1.22^\circ$$

$$C = 2 \times 0.000599 / 89.81^\circ + 60.88 / 55.85^\circ (0.000599 / 89.81^\circ)^2 \\ = 0.001180 / 90.41^\circ \text{ S}$$

این مثال نشان می دهد که جبران از نوع سری، ثابت B را به يك سوم مقدار پیشین

خود کاهش داده است در صورتی که تأثیر چندانی بر ثابتهای A و C نداشته. بنابراین، حداکثر توانی که خط می تواند انتقال دهد در حدود ۳۵۰٪ افزایش یافته است. □

زمانی که يك خط انتقال، با یا بدون جبران از نوع متوالی، ظرفیت انتقال توان مطلوب را دارد توجه به بهره برداری از خط در حالت بار سبک یا بی باری معطوف می شود. جریان باردار کننده، عامل مهمی است که باید در نظر گرفت و نباید اجازه داد که از جریان نامی خط در بار کامل بیشتر شود.

معادله (۴-۲۵) نشان می دهد که جریان باردار کننده معمولاً به صورت $|B_C|V$ تعریف می شود که در آن B_C ، سوسپتانس خازنی کل خط و $|V|$ ، ولتاژ نامی خط به خنثی است. البته چنانکه در پی معادله (۴-۲۵) گوشزد شد این محاسبه به علت تغییر $|V|$ در طول خط، مقدار دقیق جریان باردار کننده را به دست نمی دهد. اگر القاگرهایی در نقاط مختلف خط بین هر فاز و زمین قرار دهیم به طوری که سوسپتانس القایی کل آنها B_L باشد، جریان باردار کننده عبارت می شود از

$$I_{\text{chg}} = (B_C - B_L)|V|$$

$$= B_C|V| \left(1 - \frac{B_L}{B_C}\right) \quad (۵-۶۲)$$

دیده می شود که جریان باردار کننده را جمله داخل پرانتز کاهش می دهد. B_L/B_C را ضریب جبران موازی می نامند.

فایده دیگر جبران از نوع موازی، کاهش دادن ولتاژ ته خط است که در خطهای فشار قوی بلند در حالت بی باری تمایل به زیاد شدن بیش از حد دارد. در بحثی که به معادله (۵-۱۱) منجر شد، دیدیم که $|A|/|V_S|$ مساوی $|V_{R,NL}|$ است. همچنین دیده ایم که اگر از ظرفیت خازنی موازی، صرف نظر کنیم A مساوی يك می شود. لیکن، در خطهای با طول متوسط و بلند حضور ظرفیت، مقدار A را کاهش می دهد. بنابراین، با کاستن سوسپتانس موازی خط تا مقدار $(B_C - B_L)$ در اثر القاگرهای موازی می توان مقدار افزایش ولتاژ بی باری ته خط انتقال را در حالت بی باری محدود کرد.

اعمال هر دو نوع متوالی و موازی جبران توان واکنشی به خطوط انتقال بلند، انتقال توانهای بسیار زیاد را به طور مؤثر در حد ولتاژ درخواستی، ممکن می سازد. جبران کننده های متوالی و موازی، در حالت ایدئال، باید با فواصل معین در طول خط نهاده شوند. هر زمان که لازم باشد می توان خازنهای متوالی یا القاگرهای موازی را از مدار خارج کرد. ثابتهای $ABCD$ برای بررسی جبران موازی نیز، مانند حالت جبران متوالی، روش آسانی به دست می دهد.

مثال ۵-۵ افت ولتاژ خط انتقال مثال ۵-۱ را، زمانی که در حالت بی باری يك القاگر موازی به ته خط وصل شود و ۷۵٪ از ادmittانس موازی خط را جبران کند، به دست آورید.

حل : بنا بر مثال ۵-۱، ادمیتانس موازی خط عبارت است از

$$y = j5.105 \times 10^{-6} \text{ U/mi}$$

و برای کل خط

$$B_C = j5.105 \times 10^{-6} \times 230 = 0.001174 \text{ U}$$

به ازای ۷۰٪ جبران

$$B_L = -j0.7 \times 0.001174 = 0.000822 \text{ U}$$

ثابت‌های $ABCD$ خط را در مثال ۵-۴ به دست آوردیم. بر طبق جدول پ-۶ پیوسته الفاکر را به تنهایی می‌توان با کمک ثابت‌های زیر نمایش داد:

$$A = D = 1 \quad B = 0 \quad C = -j0.000822 \text{ U}$$

بنا بر معادله جدول پ-۶ برای ترکیب کردن دومدار متوالی با هم برای خط و الفاکر

$$A_{eq} = 0.8904 / 1.33^\circ + 1.8678 / 79.46^\circ (0.000822 / -90^\circ) \\ = 1.0411 / -0.40^\circ$$

افت ولتاژ با وجود الفاکر موازی در حالت بی‌باری می‌شود

$$\frac{137.85 / 1.0411 - 124.13}{124.13} = \%6.67$$

که کاهش نمایانی را نسبت به مقدار ۲۴۷٪ برای خط انتقال جبران نشده نشان می‌دهد.

□

۱۰-۵ پدیده‌های گذرا در خط انتقال

اضافه ولتاژهای گذرای که در سیستم قدرت پدید می‌آیند یا منشأ خارجی (برای مثال تخلیه آذرخشی) دارند و یا در داخل سیستم بر اثر کلیدزنی تولید می‌شوند. به طور کلی پدیده‌های گذرا در سیستمهای انتقال بر اثر هر تغییر ناگهانی در شرایط کار یا در آرایش سیستمها به وجود می‌آیند. آذرخش همیشه خطری بالقوه برای تجهیزات سیستم قدرت است، اما کلیدزدن نیز می‌تواند منجر به صدمه دیدن تجهیزات شود. در ولتاژهای تا تقریباً ۲۳۰ kV، میزان عایق‌بندی خطهای انتقال و تجهیزات را نیاز به محافظت آنها در برابر آذرخش تعیین می‌کند. در سیستمهایی که ولتاژ از ۲۳۰ kV بیشتر اما از ۷۰۰ kV کمتر است، علاوه بر آذرخش، کلیدزدن نیز بالقوه برای عایق‌بندی سیستم خطرناک است. در ولتاژهای بالاتر از ۷۰۰ kV، ضربه‌های ناشی از کلیدزدن عامل اصلی تعیین‌کننده میزان عایق‌بندی است.

البته، کابل‌های زیرزمینی در مقابل برخورد مستقیم آذرخش ایمن‌اند و می‌توان آنها را در برابر پدیده‌های گذرای ناشی از خط‌های انتقال هوایی محافظت کرد. لیکن، به‌دلیل اقتصادی و فنی، جز در موارد غیرعادی، آن‌هم در فواصل کوتاه از قبیل عبور از زیرودخانه، برای انتقال انرژی الکتریکی، خط هوایی به‌کار می‌رود.

چنانکه در توضیح شکل ۵-۱ اشاره شد، خط‌های هوایی را در بیشتر موارد می‌توان به‌وسیلهٔ یک یا چند سیم هم‌پتانسیل با زمین که در بالای خط انتقال کشیده می‌شود در برابر برخورد مستقیم آذرخش محافظت کرد. این سیم‌های محافظ که سیم زمین نامیده می‌شوند از طریق دکل‌های نگهدارنده خط به زمین متصل‌اند. محدودهٔ حفاظتی سیم زمین معمولاً 30° در هر سوی قائم زیرسیم در نظر گرفته می‌شود، یعنی خط انتقال باید در محدودهٔ این قطاع 60° قرار گیرد. در بیشتر موارد، ضربهٔ آذرخش به‌جای خط انتقال به سیم‌های زمین اصابت می‌کند.

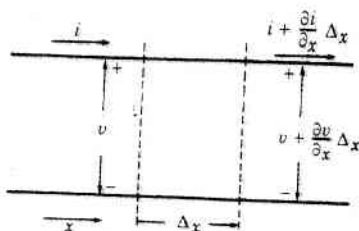
برخورد آذرخش به سیم‌های زمین یا هادی‌های خط باعث تزیق جریانی می‌شود که نیمی از آن به یک سوی نقطهٔ برخورد و نیمی به‌سوی دیگر می‌گذرد. مقدار قلهٔ جریان در طول خط آذرخش‌زده می‌تواند مقادیر بسیار متفاوتی داشته باشد، زیرا شدت ضربه‌های آذرخش، بسیار متغیر است. مقدار نوعی آن 10000 A و بالاتر است. هنگامی که خط انتقال، ضربهٔ مستقیم آذرخش را دریافت می‌کند، صدمه‌ای که به تجهیزات دوسرخط وارد می‌شود ناشی از ولتاژهای پدیدآمده بین خط و زمین است که به‌علت بارهای تزیق شده به‌شکل جریان در طول خط جاری می‌شود، این ولتاژها معمولاً از یک میلیون ولت بیشترند. برخورد آذرخش به سیم‌های زمین نیز می‌تواند از طریق القای الکترومغناطیسی، ضربه‌های فشارقوی بر خط انتقال اعمال کند.

۱۱-۵ بررسی پدیده‌های گذرا: موجهای رونده

بررسی موجهای ضربه‌ای در خط‌های انتقال، بدون توجه به منشأ آنها، بسیار پیچیده است و ما در اینجا تنها می‌توانیم حالت خط بی‌اتلاف را در نظر بگیریم. خط بی‌اتلاف، معرف خوبی برای خطوط انتقال فرکانس بالاست که در آن‌ها ωL و ωC در مقایسه با R و G بسیار بزرگ‌اند. بی‌اتلاف گرفتن خط، امکان می‌دهد که بدون درگیر شدن با تئوری‌های پیچیده، شناخت پدیدهٔ گذرا تا حدی آسان شود.

برخورد ما به این مسئله شبیه روشی است که برای به‌دست آوردن روابط حالت مانای ولتاژ و جریان در خط بلند با پارامترهای گسترده به‌کار گرفتیم. در اینجا فاصلهٔ x تا جزء کوچک به‌طول Δx شکل ۵-۱۲ را از سرخط (ونه‌از ته خط) اندازه می‌گیریم. ولتاژ v و جریان i توابعی از x و نیز از t ‌اند پس باید از مشتقات جزئی استفاده کنیم. افت ولتاژ متوالی در جزء طول خط عبارت است از

$$i(R\Delta x) + (L\Delta x) \frac{\partial i}{\partial t}$$



شکل ۵-۱۳ نمودار طرح واردهای یک جزء از یک خط انتقال که یک فاز و برگشت خنثی را نشان می‌دهد. ولتاژ v و جریان i توابعی هم از x و هم از t اند. فاصله x از سرخط سنجیده می‌شود.

و می‌توانیم بنویسیم

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \Delta x \quad (۵-۶۵)$$

علامت منفی به این دلیل ضروری است که $v + (\partial v / \partial x) \Delta x$ باید به ازای مقادیر مثبت i و $\partial i / \partial t$ ، از v کوچکتر باشد. به همین ترتیب

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = - \left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \Delta x \quad (۵-۶۶)$$

می‌توانیم هر دو رابطه (۵-۶۵) و (۵-۶۶) را بر Δx تقسیم کنیم، و چون تنها خطی بی‌اتلاف را در نظر گرفته‌ایم R و G صفرند و داریم

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (۵-۶۷)$$

و

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (۵-۶۸)$$

اکنون از دو طرف معادله (۵-۶۷) نسبت به x و از دو طرف معادله (۵-۶۸) نسبت به t مشتق جزئی می‌گیریم. بدین‌سان در هر دو معادله، عبارت $\partial^2 i / \partial x \partial t$ حاصل می‌شود و حذف این مشتق جزئی دوم i بین دو معادله نتیجه می‌دهد

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (۵-۶۹)$$

معادله (۵-۶۹)، معادله موج رونده خط انتقال بی اتلاف نامیده می شود. يك پاسخ این معادله، تابعی از $(x - vt)$ است، و ولتاژ به صورت زیر بیان می شود

$$v = f(x - vt) \quad (5-70)$$

این تابع تعریف نشده است اما باید تابعی تکمقدار باشد. اگر x بر حسب متر و t بر حسب ثانیه باشد، ثابت v دارای دیمانسیون متر بر ثانیه خواهد بود. می توان درست بودن این پاسخ را با گذاردنش به جای v در رابطه (۵-۶۹) و تعیین v به اثبات رساند. نخست با تغییر متغیر

$$u = x - vt \quad (5-71)$$

می نویسیم

$$v(x, t) = f(u) \quad (5-72)$$

بنابراین

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial f(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \\ &= -v \frac{\partial f(u)}{\partial u} \end{aligned} \quad (5-73)$$

و

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (5-74)$$

به همین ترتیب نتیجه می گیریم

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (5-75)$$

گذاردن این مشتقات جزئی مرتبه دوم v در معادله (۵-۶۹) نتیجه می دهد

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (5-76)$$

و می بینیم که معادله (۵-۷۰)، در صورتی پاسخ معادله (۵-۶۹) است که داشته باشیم

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5-77)$$

ولتاژ، به شکل بیان شده در معادله (۷۵-۷۰)، موج رونده‌ای در جهت مثبت x است. شکل ۵-۱۳، تابعی از $(x-vt)$ را نشان می‌دهد که مشابه شکل موج ولتاژی است که در طول خطی آذرخش زده، روان است. تابع در دو لحظه t_1 و t_2 نشان داده شده است که در آن $t_2 > t_1$. ناظری رونده با موج که بر روی نقطه‌ای از موج ثابت بماند، هیچ تغییر ولتاژی در آن نقطه مشاهده نخواهد کرد. برای چنین ناظری

$$x - vt = \text{ثابت}$$

که از آن نتیجه می‌شود

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/s} \quad (78-5)$$

در این رابطه، L و C به ترتیب بر حسب هانری بر متر و فاراد بر مترند. بنابراین موج ولتاژ با سرعتی معادل v در جهت مثبت x روان است.

می‌توان نشان داد که $f(x+vt)$ نیز پاسخ معادله (۵-۶۹) است، و با کمک استدلالی مشابه، می‌توان آن را موج رونده‌ای در جهت منفی x تعبیر کرد. بنابراین، پاسخ عمومی معادله (۵-۶۹) عبارت است از

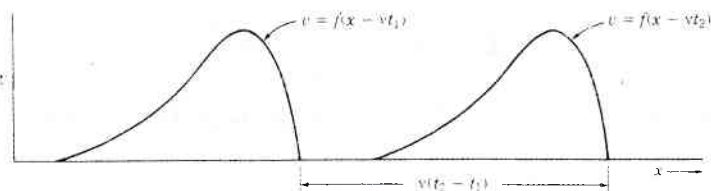
$$v = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (79-5)$$

که پاسخی برای وقوع همزمان مؤلفه‌های پیش‌رو و پس‌رو موج رونده خط است. شرایط ابتدایی و شرایط حدی، مقادیر خاص هر مؤلفه را تعیین می‌کنند. اگر موج رونده پیش‌رو را که موج تابنده نیز خوانده می‌شود به شکل زیر بیان کنیم

$$v^+ = f_1(x-vt) \quad (80-5)$$

موج جریان حاصل از حرکت بارهای الکتریکی به صورت زیر بیان می‌شود

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{L/C}} f_1(x-vt) \quad (81-5)$$



شکل ۵-۱۳ نمایش موج ولتاژی که تابعی از $(x-vt)$ است در لحظه‌های t_1 و t_2 .

درستی رابطه بالا را می توان با گذاردن این مقادیر ولتاژ و جریان در معادله (۵-۶۷) و در نظر گرفتن اینکه v مساوی $1/\sqrt{LC}$ است اثبات کرد. به همین ترتیب برای موج رونده ولتاژ پس رو

$$v^- = f_v(x+vt) \quad (۵-۸۲)$$

موج جریان مربوط عبارت است از

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{L/C}} f_v(x+vt) \quad (۵-۸۳)$$

از معادله های (۵-۸۰) و (۵-۸۱) نتیجه می گیریم

$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۵-۸۴)$$

و از معادله های (۵-۸۲) و (۵-۸۳) نتیجه می گیریم

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۵-۸۵)$$

اگر جهت مثبت جریان برای i^- را در جهت حرکت موج رونده پس رو فرض می کردیم، علامت منفی در معادله های (۵-۸۳) و (۵-۸۵) به علامت مثبت تغییر می یافت. لیکن، ترجیح می دهیم که جهت جریان مثبت را چه برای موج رونده پیش رو و چه برای موج رونده پس رو همان جهت مثبت x اختیار کنیم.

نسبت v^+ به i^+ ، امپدانس مشخصه Z_c خط نامیده می شود. قبل از در حال حالت مانای خط بلند به امپدانس مشخصه برخوردیم و در آنجا Z_c را به صورت $\sqrt{z/y}$ تعریف کردیم که در صورت صفر بودن R و G برابر $\sqrt{L/C}$ است.

۵-۱۲ بررسی پدیده های گذرا: بازتابها

اکنون ببینیم چه اتفاقی می افتد اگر نخست ولتاژی به سربك خط انتقال که به امپدانس Z_R پایان گرفته اعمال شود. در بررسی ساده خود، فرض می کنیم که Z_R يك مقاومت خالص است. اگر امپدانس ته خط غیر از مقاومت خالص باشد باید از تبدیل لاپلاس کمک گرفت. در این صورت ولتاژ، جریان و امپدانس تبدیل شده توابعی از متغیر تبدیل لاپلاس یعنی s خواهند شد.

زمانی که بایسته شدن کلید، ولتاژی به خط انتقال اعمال می شود موج ولتاژ v^+ به همراه موج جریان i^+ در طول خط شروع به حرکت می کند. نسبت ولتاژ v_R در ته خط

به جریان i_R در ته خط در هر زمان باید مساوی مقاومت پایان Z_R باشد. بنابراین رسیدن v^+ و i^+ به ته خط که در آنجا مقادیرشان v_R^+ و i_R^+ است، باید به موجهای رونده پسرو یا بازتابندهای منجر شود که مقادیرشان در ته خط v_R^- و i_R^- است، به طوری که

$$\frac{v_R}{i_R} = \frac{v_R^+ + v_R^-}{i_R^+ + i_R^-} = Z_R \quad (۸۶-۵)$$

که در آن v_R^- و i_R^- مقادیر موجهای بازتابنده v^- و i^- در ته خط اند. اگر Z_c را مساوی $\sqrt{L/C}$ قرار دهیم، از معادله‌های (۸۴-۵) و (۸۵-۵) خواهیم داشت

$$i_R^+ = \frac{v_R^+}{Z_c} \quad (۸۷-۵)$$

و

$$i_R^- = -\frac{v_R^-}{Z_c} \quad (۸۸-۵)$$

پس گذاردن این مقادیر به جای i_R^+ و i_R^- در معادله (۸۶-۵) نتیجه می‌دهد

$$v_R = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} v_R^+ \quad (۸۹-۵)$$

می‌بینیم که تغییرات v_R^- در ته خط نسبت به زمان با تغییرات v_R^+ نسبت به زمان یکسان است (اما با دامنه‌ای کوچک‌تر، مگر اینکه Z_R صفر یا بینهایت باشد). ضریب بازتابش ρ_R برای ولتاژ در ته خط به صورت v_R^-/v_R^+ تعریف می‌شود، بنابراین برای ولتاژ

$$\rho_R = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} \quad (۹۰-۵)$$

از معادله‌های (۸۷-۵) و (۸۸-۵) نتیجه می‌گیریم که

$$\frac{i_R^+}{i_R^-} = -\frac{v_R^+}{v_R^-} \quad (۹۱-۵)$$

و اینکه در نتیجه، ضریب بازتابش برای جریان، همیشه منفی ضریب بازتابش برای ولتاژ است.

اگر خط به امپدانس مشخصه‌اش Z_c ختم شود، می‌بینیم که ضرایب بازتابش ولتاژ و جریان هر دو مساوی صفر می‌شوند. در این حالت، موج بازتابنده نداریم و خط طوری عمل می‌کند که گویی طولش بینهایت است. تنها زمانی که موج بازتابنده، به سر خط بازمی‌گردد

منبع انرژی الکتریکی درمی یابد که خط نه طولش بینهایت است و نه به امپدانس مشخصه اش منتهی شده است.

اتصال کوتاه شدن ته خط منجر به این می شود که ρ_R برای ولتاژ مساوی ۱ - شود. اگر ته خط باز باشد، Z_R مساوی بینهایت است و ρ_R برای ولتاژ، پس از تقسیم کردن صورت و مخرج معادله (۵-۹۰) بر Z_R و میل دادن Z_R به سمت بینهایت مساوی ۱ می شود. باید دانست که موجهای بازگردنده به سر خط باعث پدید آمدن بازتابهای جدیدی می شوند که ضریب بازتابش سر خط ρ_s ، تعیین می کند. اگر امپدانس در سر خط، Z_s باشد معادله (۵-۹۰) به صورت زیر درمی آید

$$\rho_s = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \quad (۵-۹۲)$$

ولتاژ اعمال شده بر خط، زمانی که امپدانس سر خط Z_s باشد، برابر خواهد بود با ولتاژ منبع ضرب در $Z_c / (Z_s + Z_c)$. معادله (۵-۸۴) نشان می دهد که موج تابنده ولتاژ با امپدانس Z_c خط مواجه می شود، و در لحظه ای که منبع به خط متصل می شود Z_c و Z_s متوالی باهم به صورت یک تقسیم کننده ولتاژ عمل می کنند.

مثال ۵-۶ یک منبع ۱۲۰ ولت dc با مقاومت داخلی ناچیز از طریق کلید S به خط انتقال بی اتلافی دارای $Z_c = ۳۰ \Omega$ وصل می شود. اگر مقاومت ته خط ۹۰Ω باشد تغییرات v_R را نسبت به زمان، تا زمان $t = ۵T$ رسم کنید. T زمانی است که موج ولتاژ، طول خط را طی می کند. مدار را شکل ۵-۱۴ (الف) نشان می دهد. حل: زمانی که S بسته است موج تابنده ولتاژ شروع به حرکت در طول خط می کند با معادله زیر بیان می شود

$$v = ۱۲۰ U(vt - x)$$

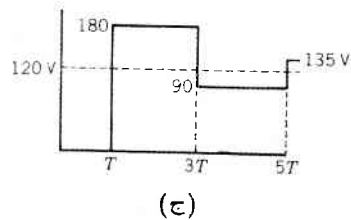
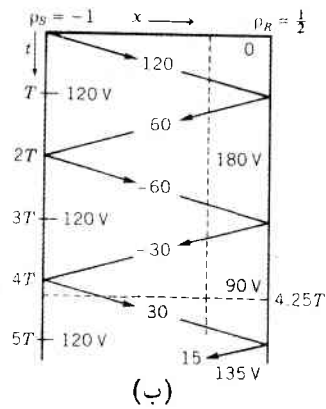
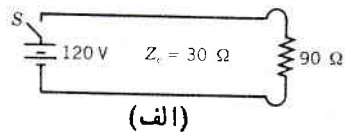
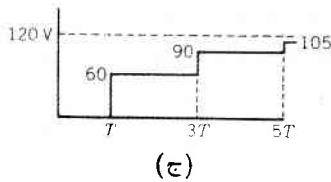
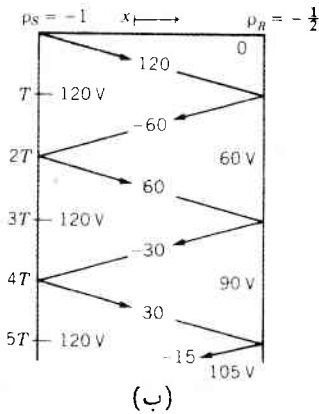
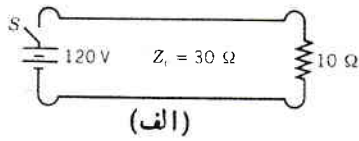
که در آن $U(vt - x)$ تابع پله واحدی است که زمانی که $(vt - x)$ منفی است مساوی صفر است و زمانی که $(vt - x)$ مثبت است مساوی یک است. تا وقتی که موج تابنده به ته خط نرسیده است موج بازتابنده وجود ندارد. امپدانس در برابر موج تابنده $Z_c = ۳۰ \Omega$ است. زیرا مقاومت منبع صفر است، $v^+ = ۱۲۰ V$

$$\rho_R = \frac{۹۰ - ۳۰}{۹۰ + ۳۰} = \frac{۱}{۲}$$

زمانی که v^+ به ته خط می رسد موج بازتابنده ای پدید می آید که مقدارش

$$v^- = \left(\frac{۱}{۲}\right) ۱۲۰ = ۶۰ V$$

و بنابراین



شکل ۵-۱۴ نمودار مداری، نمودار نردبانی، و منحنی تغییرات ولتاژ بر حسب زمان برای مثال ۵-۶ که در آن مقاومت ته خط ۹۰ Ω است. شکل ۵-۱۵ نمودار مداری، نمودار نردبانی، و منحنی تغییرات ولتاژ بر حسب زمان برای مقاومت ته خط در مثال ۵-۶ به ۱۰ Ω تغییر کند.

$$v_R = 120 + 60 = 180 \text{ V}$$

در زمان $t = 2T$ ، موج بازتابنده به سرخط می‌رسد. ضریب بازتابش سرخط ρ_s با کمک معادله (۵-۹۲) محاسبه می‌شود. امپدانس ته خط برای موج بازتابنده یعنی امپدانس متوالی با منبع، در این حالت، $Z_s = 0$ است. بنابراین

$$\rho_s = \frac{0 - 30}{0 + 30} = -1$$

ویک موج بازتابنده 60 V - شروع به حرکت به سوی ته خط می‌کند تا ولتاژ سرخط را مساوی 120 V نگه دارد. این موج تازه در $t = 3T$ به ته خط می‌رسد و موجی به سوی سرخط بازمی‌تاباند به مقدار

$$\frac{1}{4}(-60) = -30 \text{ V}$$

و ولتاژ در ته خط می شود

$$180 - 60 - 30 = 90 \text{ V}$$

بهترین روش برای دنبال کردن بازتابشهای مختلف موج و ولتاژ، استفاده از نمودار نردبانی شکل ۵-۱۴ (ب) است که در آن زمان در طول محور قائم با فاصله‌های T سنجیده می شود. بر روی خطوط مایل، مقادیر موجهای تابنده و بازتابنده مثبت شده است. در فضای بین خطوط مایل، مجموع تمام موجهای بالاتر و جریان یا ولتاژ هر نقطه آن ناحیه از نمودار نشان داده شده است. برای مثال، در x مساوی سه چهارم طول خط و $T = 4.25$ ، محل تقاطع خطهای خط چین گذرنده از این نقاط در ناحیه ای قرار دارد که ولتاژ ۹۰ ولت را نشان می دهد.

شکل ۵-۱۴ (ج)، تغییرات ولتاژ سرخط را نسبت به زمان نشان می دهد. ولتاژ به مقدار مانای خود یعنی ۱۲۰ V نزدیک می شود. □

نمودار نردبانی را می توان برای جریان نیز رسم کرد. لیکن باید به خاطر داشت که ضریب بازتابش برای جریان، همیشه منفی ضریب بازتابش برای ولتاژ است. اگر مقاومت ته خط انتقال مثال ۵-۶۰ به 10Ω کاهش داده شود، چنانکه شکل ۵-۱۵ (الف) نشان می دهد، نمودار نردبانی و منحنی تغییرات ولتاژ مطابق شکلهای ۵-۱۵ ب و ج خواهد بود. مقاومت 10Ω باعث می شود که مقدار ضریب بازتابش برای ولتاژ منفی شود. به طور کلی هرگاه خط انتقال به چنان مقاومتی ختم شود که Z_R از Z_0 کوچکتر باشد، ضریب بازتابش برای ولتاژ، منفی می شود. چنانکه مقایسه شکلهای ۵-۱۴ و ۵-۱۵ نشان می دهد، ρ_R منفی باعث می شود که ولتاژ ته خط به تدریج خود را به ۱۲۰ V برساند در صورتی که اگر ρ_R مثبت باشد ولتاژ ته خط، نخست به مقداری جهش می کند که بالاتر از ولتاژ ابتدایی اعمال شده به سر خط است.

بازتابشها لزوماً تنها در سرهای خط صورت نمی گیرد. اگر يك خط انتقال به خط دومی با امپدانس مشخصه متفاوت مانند حالت اتصال يك خط هوایی به يك کابل زیرزمینی متصل شود، موج تابنده به محل اتصال آن طور عمل می کند که گویی خط اول به امپدانس معادل Z_0 خط دوم پایان یافته است. لیکن آن بخش از موج تابنده که بازتابیده نمی شود (موج شکسته شده) در ابتدا خط دوم به حرکت درمی آید و در ته این خط باعث پدید آمدن موج بازتابنده ای می شود. انشعاب خط نیز باعث پدید آمدن موجهای بازتابنده و شکسته می شود.

اکنون باید روشن شده باشد که بررسی دقیق پدیده های گذرا در خط انتقال در حالت کلی مسئله پیچیده ای است. لیکن، در یافتیم که يك موج ضربهای ولتاژ مانند آنچه در شکل

۵-۱۳ دیده می شود بر اثر مواجه شدن با امپدانس در ته خط بی اتلاف (مثلاً در هنگام رسیدن به يك شینه ترانسفورماتور) باعث روانه شدن موج ولتاژی به همان شکل به سوی منبع موج ضربه ای می شود. البته اگر خط به امپدانس بی غیر از اتصال کوتاه یا مدار باز ختم شده باشد دامنه موج بازتابنده کاهش می یابد، اما چنانکه دیدیم اگر Z_R از Z_0 بزرگتر باشد مقدار ماکزیمم ولتاژ در ته خط بزرگتر از، و غالباً نزدیک دو برابر، مقدار ماکزیمم ولتاژ موج ضربه ای خواهد بود.

تجهیزات ته خط را ضربه گیرهای ولتاژ که برق گیر نیز نامیده می شوند محافظت می کنند. يك ضربه گیر ایده آل که بین خط و خنثای زمین شده ای متصل می شود باید (الف) در ولتاژی بالاتر از ولتاژ اسمی خود، هادی شود، (ب) ولتاژ بین دوسر خود را در حد طراحی شده محدود کند و (ج) خاصیت رسانایی خود را زمانی که ولتاژ خط به خنثی از حد طراحی شده کمتر می شود دوباره از دست بدهد.

ضربه گیرها در ابتدا تنها يك شكاف هوایی بودند. در این نوع ضربه گیر، زمانی که ولتاژ ضربه ای به مقداری که شكاف هوایی برای آن طراحی شده است می رسد قوس الکتریکی پدید می آید و از طریق مسیری یونیزه شده، که در اصل اتصال کوتاه است، به زمین منتهی می شود. لیکن، پس از پایان یافتن موج ضربه ای نیز جریان 60 Hz تولید شده ژنراتورها هنوز از طریق قوس الکتریکی به سوی زمین جاری می شود. این قوس الکتریکی را باز کردن مدار شکنها خاموش می کند.

امروزه ضربه گیرهایی ساخته می شود که پس از عبور دادن جریان ضربه ای، جریان 60 Hz به زمین را خاموش می کنند. این ضربه گیرها با استفاده از مقاومتی غیر خطی که با شكاف هوایی مجهز به وسایل خاموش کننده قوس الکتریکی متوالی شده اند، ساخته می شوند. مقاومت غیر خطی با افزایش ولتاژ بین سرهایش به سرعت کاهش می یابد. مقاومتی نمونه وار ساخته شده از کربورسیلیسیم برای این کار، جریان الکتریکی را متناسب با تقریباً توان چهارم ولتاژ بین سرهایشان از خود عبور می دهند. زمانی که بین سرهای شكاف هوایی بر اثر ضربه ولتاژ، قوس الکتریکی برقرار می شود، مسیری با مقاومت کم از طریق مقاومت غیر خطی برای عبور جریان به زمین پدید می آید. پس از آنکه موج ضربه ای به پایان رسید و ولتاژ دو سر ضربه گیر به مقدار طبیعی خط به خنثای خود باز گشت، مقاومت برای محدود کردن جریان قوس به مقداری که بتواند، شكافهای هوایی متوالی خاموش شود کفایت می کند. خاموش کردن قوس معمولاً از طریق افزودن طول قوس بین صفحات عایق با كمك يك میدان مغناطیسی و در نتیجه خنك کردن و غیر یونیزه كردن مسیر آن صورت می گیرد.

امروزه در ساخت ضربه گیرها از اكسید روی به جای کربورسیلیسیم استفاده می شود. ولتاژ دوسر مقاومت ساخته شده از اكسید روی به ازای محدوده وسیعی از جریان، كاملاً ثابت است. بدین معنی که مقاومت ضربه گیر در ولتاژ عادی خط آن قدر زیاد است که برای محدود کردن عبور جریان 60 Hz در ولتاژ عادی نیازی به شكاف هوایی سری ندارد.*

←

* مراجعه کنید به:

۱۳-۵ انتقال جریان مستقیم

انتقال انرژی الکتریکی به وسیله جریان مستقیم زمانی از نظر اقتصادی در مقایسه با انتقال ac مقرون به صرفه خواهد بود که هزینه اضافی تجهیزات دوسر خط برای خطهای dc با کمتر ساختن هزینه خط جبران شود. مبدل‌های دوسر خط انتقال dc، هم به عنوان یکسوساز برای تبدیل جریان متناوب تولید شده به جریان دائم و هم به عنوان موجی گر برای تبدیل دوباره جریان مستقیم به جریان متناوب عمل می کنند تا انرژی الکتریکی بتواند در هر دو جهت از خط بگذرد.

سال ۱۹۵۴ عموماً به عنوان نقطه آغاز انتقال dc فشار قوی امروزی شناخته می شود، زمانی که یک خط dc با ولتاژ ۱۰۰ kV از واسترویک^۱ در کشور سوئد به ویزی^۲ در جزیره گوتلند^۳ با فاصله ای معادل ۱۰۰ km (۶۲٫۵ mi) در عرض دریای بالتیک به کار افتاد. البته بسیار قبل از این، تجهیزات مبدل استاتیک برای اتصال سیستمهای ۶۰ و ۲۵ هرتز به یکدیگر که در اصل خط انتقال جریان مستقیمی به طول صفر بود به کار رفته بود. در ایالات متحده، یک خط dc که در ولتاژ ۸۰۰ kV کار می کند توان تولید شده در پاسیفیک نورث وست^۴ را به بخش جنوبی کالیفرنیا انتقال می دهد. با کمتر شدن روز به روز بهای تجهیزات مبدل‌های استاتیک در مقایسه با هزینه ساختن خطوط انتقال، حداقل طول اقتصادی برای خط انتقال dc نیز کاهش می یابد و امروزه این مقدار به حدود ۶۰۰ کیلومتر (۳۷۵ mi) رسیده است.

بهره برداری از یک خط dc برای انتقال نیرو از یک نیروگاه دهانه معدن در داکوتای شمالی^۵ به نزدیکی دولوث^۶، مینه سوتا^۷، به طول ۷۴۰ km در سال ۱۹۷۷ آغاز شده. بررسیهای مقدماتی نشان داد که خط dc و لوازم سرانه اش حدود ۳۰٪ کمتر از خط ac مشابه و تجهیزات کمکی آن هزینه بر می دارد. این خط در $\pm 250 \text{ kV}$ (۵۰۰ kV خط به خط) کار می کند و ۵۰۰ MW را انتقال می دهد.

خط انتقال جریان مستقیم معمولاً یک هادی با پتانسیل مثبت نسبت به زمین دارد و هادی دیگرش دارای پتانسیلی منفی با همان مقدار است. چنین خطی را دو قطبی می نامند. خط انتقال dc می تواند با کمک تنها یک هادی برقدار نیز بهره برداری شود. مسیر برگشت از طریق زمین است که در برابر جریان مستقیم، مقاومتی بسیار کمتر از جریان متناوب دارد. در این حالت یا درحالی که هادی برگشت، زمین شده باشد خط را تک قطبی می نامند.

E. C. Sakshaug, J. S. Kresge, and S. A. Miske, Jr., «A New Concept in Station Arrester Design,» *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-96, no. 2, March/April 1977, pp. 647-656.

1. Vastervik

2. Visby

3. Gotland

4. Pacific Northwest

5. North Dakota

6. Duluth

7. Minnesota

خط dc علاوه بر اقتصادی بودن در فواصل طولانی، مزیت‌های دیگری نیز دارد. افت ولتاژ، مشکل چندانی نیست، زیرا ωL که عامل عمده افت ولتاژ در خط ac است در فرکانس صفر دیگر مطرح نیست. مزیت دیگر جریان مستقیم این است که در هنگام زمین شدن ناخواسته یکی از هادیهای خط می‌توان از خط به صورت یک قطبی بهره‌برداری کرد. از آنجا که انتقال ac از طریق کابل به علت بیش از حد شدن جریانهای باردار کننده، در مسافتهای بیش از حدود ۵۰ کیلومتر ممکن نیست برای انتقال انرژی بین انگلستان و فرانسه از زیر کانال مانش، جریان مستقیم انتخاب شد. کاربرد جریان مستقیم برای این منظور مشکل سنکرون کردن شبکه‌های برق دو کشور باهم را نیز از میان برداشت.

هنوز امکان برقراری شبکه‌های برق جریان مستقیم وجود ندارد، زیرا هنوز مدارشکتهایی dc که بتواند جای مدارشکتهای ac بسیار پیشرفته امروزی را بگیرد ساخته نشده است. مدارشکن ac می‌تواند به علت دوبار صفر شدن جریان در هر سیکل به آسانی مدار را در حال عبور جریان قطع کند. مقدار و جهت گذر توان در خط dc را می‌توان با کمک یکسوسازهای نیمه هادی (SCR) کنترل کرد. یک واحد یکسوساز می‌تواند به حدود تا ۲۰۰ SCR مجهز باشد.

باز هم مزیت دیگر جریان مستقیم این است که به مسیر اختصاصی محدودتری نیاز دارد. فاصله بین دو هادی خط داکوتای شمالی-دولوت ۲۵ فوت است. خط $500\text{ kV } ac$ شکل ۱-۵، فاصله‌ای معادل ۶۰۵ فوت بین هادیهای کناریش دارد. یکی از ملاحظات دیگر اوج ولتاژ خط ac است که $707\text{ kV} = \sqrt{2} \times 500$ است. بنابراین خط به عایق بندی بیشتری بین دکل و هادیها و همچنین به فاصله بیشتری بین هادیها و زمین نیاز دارد. پس نتیجه می‌گیریم که انتقال dc مزیت‌های زیادی نسبت به جریان متناوب دارد، اما به علت نبودن جانشین مناسبی برای مدارشکتهای ac امروزی و نبودن وسیله ساده‌ای چون ترانسفورماتور برای تغییر ولتاژ dc ، فعلاً استفاده از خطوط انتقال جریان مستقیم به خطوط بسیار بلند محدود می‌شود.

۱۴-۵ خلاصه

معادله‌های خط انتقال بلند، یعنی معادله‌های (۵-۳۵) و (۵-۳۶) البته برای خط کوتاه و میانه طول نیز صادق است. اما تقریبی‌هایی که برای خطهای انتقال کوتاه و با طول متوسط ارائه شد انجام محاسبات را در غیاب کامپیوتر ساده‌تر می‌کند. نمودار دایره‌ای هم به علت ارزش آموزشی آن در نشان دادن حداکثر توانی که خط می‌تواند انتقال دهد و همچنین نشان دادن تأثیر ضریب توان بار و افزودن خازن به خط، تحلیل شد.

تابندهای $ABCD$ وسیله مناسبی برای نوشتن معادله‌ها به شکلی خلاصه‌تر و حل مسائلی است که با ساده کردن شبکه‌ها سروکار دارد. مفید بودن این ثابت‌ها به ویژه در بحث جبران

متوالی و موازی توان واکنشی نمایان می‌شود.
بحث بسیار ساده پدیده‌های گذرا اگرچه به خط انتقال بی‌اتلاف و منبع ولتاژ dc محدود شد، می‌تواند تصویری از پیچیدگی بررسی پدیده‌های گذرای ناشی از آذرخش و قطع و وصل سیستمهای قدرت را به‌دست دهد.

مسائل

۱-۵ خط انتقال تک مدار سه فاز ۶۰ هر تزی به طول ۱۸ کیلومتر از هادیهای نوع پادریج با فاصله گذاری منتظم ۱۰ متر بین مسراکز هادیها تشکیل شده است. این خط، تسوان ۲۵۰۰ kW را با ولتاژ ۱۱ kV به بار متعادل تحویل می‌دهد. ولتاژ سرخط را به ازای ضریب توان (الف) ۸۰٪ پس افقی، (ب) واحد، (ج) ۹۰٪ پیش افقی به دست آورید. دمای سیمها را 50°C فرض کنید.

۲-۵ خط انتقال سه فاز به طول ۱۰۰ مایل، قدرت ۵۵ MVA را با ضریب توان ۰٫۸۰ پس افقی با ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت به بار تحویل می‌دهد. این خط از هادیهای نوع ددیک با فاصله گذاری افقی ۱۱۹ فوت بین هادیهای مجاور تشکیل می‌شود. ولتاژ، جریان و توان سرخط را تعیین کنید. دمای سیمها را 50°C بگیرید.

۳-۵ ثابتهای ABCD يك مدار π را كه مقامتی ۶۰۰ اهمی در شاخه موازی سرخط، مقاومتی يك كيلو اهمی در شاخه موازی ته خط و مقاومتی ۸۰ اهمی در شاخه متوالی دارد تعیین کنید.

۴-۵ ثابتهای ABCD خط انتقال سه فاز عبارت انداز

$$A=D=0.936+j0.016=0.936/\underline{0.998^{\circ}}$$

$$B=33.5+j13.8=37.0/\underline{76.4^{\circ}}\Omega$$

$$C=(-0.18+j0.12)\times 10^{-6}\text{S}$$

بار ته خط، با ولتاژ ۲۲۰ کیلوولت و ضریب توان ۰٫۹ پس افقی، ۵۰ MW است. اندازه ولتاژ سرخط و میزان افت ولتاژ را به دست آورید. فرض کنید که مقدار ولتاژ سرخط ثابت باقی می‌ماند.

۵-۵ با استفاده از مقادیر در-یکی بامبنای ۲۳۰ کیلو ولت و ۱۰۰ MVA، مقدار ولتاژ و جریان و توان و ضریب توان سرخط انتقالی را که توانی معادل ۶۰ MW را با ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و ضریب توان ۰٫۸ پس افقی به بار تحویل می‌دهد به دست آورید. این خط سه فاز، فاصله گذاری افقی ۱۵ فوت بین هادیهای از نوع استریچ خود دارد. طول خط

۷۰ مایل است. دمای سیمها را 50°C فرض کنید. یادتان بماند که ادمیتانس مبنا باید عکس ایدانانس مبنا باشد.

۶-۵ مقدار $\cosh \theta$ و $\sinh \theta$ را برای $\theta = 85^{\circ}$ حساب کنید.

۷-۵ با گذاردن عبارت نمایی معادل به جای توابع هذلولوی، درستی معادله (۵-۵۲) را اثبات کنید.

۸-۵ خط انتقال سه فاز ۶۰ هرتزی، ۱۷۵ مایل طول دارد. ایدانانس متوالی کل خط $140 + j35 \Omega$ و ادمیتانس موازی (شنت) آن $90^{\circ}/10^{-6} \times 930$ است. این خط، توانی معادل ۴۰ MW با ولتاژ ۲۲۰ کیلوولت در ضریب توان ۹۰٪ پس افنی به بار تحویل می‌دهد. ولتاژ سرخط را (الف) با تقریب خط انتقال کوتاه، (ب) با تقریب مدار π نامی، (ج) با استفاده از معادله خط بلند به دست آورید.

۹-۵ مدار π معادل خط انتقال مسئله ۸-۵ را تعیین کنید.

۱۰-۵ مقدار افت ولتاژ خط انتقال مسئله ۸-۵ را با فرض ثابت بودن ولتاژ سر خط، بیابید.

۱۱-۵ خط انتقال سه فاز ۶۰ هرتزی ۲۵۰ مایل طول دارد. ولتاژ سرخط، ۲۲۰ کیلوولت است. پارامترهای خط عبارت‌اند از $R = 0.2 \Omega/\text{mi}$ ، $X = 0.8 \Omega/\text{mi}$ و $Y = 5.3 \mu\text{S}/\text{mi}$. جریان سرخط را زمانی که بار بر روی خط نیست به دست آورید.

۱۲-۵ اگر بار خط انتقال مسئله ۱۱-۵، معادل ۸۰ MW با ولتاژ ۲۲۰ کیلوولت در ضریب توان واحد باشد جریان، ولتاژ و توان سرخط را به دست آورید. فرض کنید که ولتاژ سرخط ثابت می‌ماند و فروافت ولتاژ را برای باز نامبرده حساب کنید.

۱۳-۵ یک خط ۱۳۸ کیلوولت، ۵۰ مایل طول دارد و از هادیهای نوع پادقویج با فاصله گذاری افقی ۵ متر بین هادیهای مجاور تشکیل می‌شود. از مقاومت خط صرف نظر کنید و درصد افزایش توانی را که می‌توان با این خط منتقل کرد، برای $|V_s|$ و $|V_R|$ ثابت در حالی که δ به 45° محدود است، در حالت‌های زیر بیابید: (الف) اگر به جای هادیهای پادقویج، هادیهای اسپری، که سطح مقطع آلومینیومی بر حسب میلیمتر مربع دو برابر بیشتر دارند بگذاریم، (ب) اگر با افزودن یک هادی پادقویج دیگر، خطی گروهی که فاصله هادیهای هر گروهش از هم ۴۰ سانتیمتر و فاصله مرکز تا مرکز گروهها ۵ متر است بسازیم، (ج) اگر ولتاژ خط پیشین را به کیلوولت و فاصله هادیها را از هم به ۸ متر افزایش دهیم.

۱۴-۵ نموداری دایره‌ای مشابه شکل ۱۰-۵، برای ته خط انتقال مسئله ۸-۵ رسم کنید. نقطه مربوط به بار در مسئله ۸-۵، و مرکز دایره مربوط به مقادیر مختلف $|V_s|$ را به ازای $|V_R| = 220 \text{ kV}$ بر روی این نمودار نشان دهید. دایره‌ای را که از نقطه بار می‌گذرد رسم

کنید. $|V_s|$ را از اندازه گیری شعاع این دایره تعیین و مقدار به دست آمده را با مقدار محاسبه شده در مسئله ۵-۸ مقایسه کنید.

۵-۱۵ با استفاده از نمودار دایره ای مسئله ۵-۱۴، ولتاژ سرخط را به ازای مقادیر مختلف کیلوواری که خازنهای سنکرون موازی با بار نامی ذکر شده در ته خط تأمین می کنند به دست آورید. مقادیر کیلووار اضافی لازم برای رسیدن به ضریب توان واحد و ضریب توان ۰.۹ پیش رفتی در ته خط را به دست آورید. فرض کنید که ولتاژ سرخط طوری تنظیم شود که ولتاژ بار در 220 kV ثابت بماند.

۵-۱۶ نمودار دایره ای توان ته خط انتقالی برای ولتاژ ته خط ثابت رسم شده است. برای بار معینی با این ولتاژ ته خط، ولتاژ سرخط، 115 kV کیلوولت است دایره ته خط به ازای $|V_s| = 115 \text{ kV}$ شعاعی مساوی ۵ اینچ دارد. مختصات افقی و قائم دایره های ته خط به ترتیب ۰.۲۵-۰.۴۵- اینچ است. افت ولتاژ را برای بار به دست آورید.

۵-۱۷ خط انتقال سه فاز به طول ۳۰۰ مایل، باری معادل 400 MVA را با ضریب توان ۰.۸ پس رفتی و ولتاژ 345 kV کیلوولت تغذیه می کند. ثابتهای $ABCD$ خط عبارت اند از

$$A = D = 0.8180 \angle 13^\circ$$

$$B = 172.22 \angle 84.2^\circ \Omega$$

$$C = 0.001933 \angle 90.4^\circ \text{ pu}$$

(الف) ولتاژ فاز به خنثای سرخط، جریان سرخط و درصد افت ولتاژ در بار کامل را تعیین کنید.

(ب) ولتاژ فاز به خنثای ته خط در حالت بی باری، جریان خط در حالت بی باری، و افت ولتاژ را به دست آورید.

۵-۱۸ یک گروه خازن متوالی قرار است در نقطه وسط خط 300 MVA مایلی مسئله ۵-۱۷ نصب شود ثابتهای $ABCD$ برای 150 MVA مایل از خط عبارت اند از

$$A = D = 0.9534 \angle 0.3^\circ$$

$$B = 90.33 \angle 84.1^\circ \Omega$$

$$C = 0.001014 \angle 90.1^\circ \text{ pu}$$

ثابتهای $ABCD$ گروه خازن متوالی عبارت اند از

$$A = D = 1 \angle 0^\circ$$

$$B = 146.6 \angle -90^\circ \Omega$$

$$C = 0$$

(الف) ثابتهای $ABCD$ را برای مجموعه خط-خازن-خط بیابید. (به جدول پ-۶ پیوست رجوع کنید.)

(ب) مسئله ۵-۱۷ را یکبار دیگر با استفاده از این ثابتهای $ABCD$ حل کنید.

۵-۱۹ ادمیتانس موازی يك خط انتقال ۳۰۰ مایلی عبارت است از

$$y_c = 0 + j6.87 \times 10^{-6} \text{ S/mi}$$

ثابتهای $ABCD$ رثکتوری موازی را که بتواند ۶۰٪ مجموع این ادمیتانس موازی را جبران کند بیابید.

۵-۲۰ يك رثکتور موازی ۲۵۰ Mvar، ۳۴۵ kV که ادمیتانس معادل $90^\circ - / 210000$ دارد، در حالت بی باری به خط ۳۰۰ مایلی مسئله ۵-۱۷ متصل شده است.

(الف) ثابتهای $ABCD$ خط متوالی با رثکتور موازی را تعیین کنید (رجوع کنید به جدول پ-۶ پیوست).

(ب) قسمت (ب) مسئله ۵-۱۷ را با استفاده از این ثابتهای $ABCD$ و مقدار به دست آمده ولتاژ ته خط در همان مسئله از نو حل کنید.

۵-۲۱ در مثال ۵-۶، نمودار تردبانی جریان و تغییرات جریان بر حسب زمان در سرخط را هنگامی که به يك اتصال کوتاه ختم می شود رسم کنید.

۵-۲۲ تغییرات ولتاژ نسبت به زمان را در نقطه ای به فاصله ۱/۴ طول خط از سرخط انتقال مثال ۵-۶، هنگامی که خط به يك مقاومت ۱۰ Ω ختم می شود، رسم کنید.

۵-۲۳ مثال ۵-۶ را هنگامی که يك مقاومت ۵۴ Ω، متوالی بامنبع باشد حل کنید.

۵-۲۴ ولتاژيك منبع dc، با بستن يك کلید به يك خط انتقال هوایی اعمال می شود. ته خط هوایی به کابلی زیرزمینی وصل شده است. فرض کنید که خط هوایی و کابل هر دو بی اتلاف اند و ولتاژ ابتدایی در طول خط، v^+ است. اگر امپدانسهای مشخصه خط هوایی و کابل به ترتیب ۵۰، ۴۰۰ اهم بوده و ته کامل مدار باز باشد،

(الف) ولتاژ سرکابل را، درست پس از رسیدن موج تابنده بر حسب v^+ بیابید.

(ب) ولتاژ ته بازکابل را، درست پس از رسیدن اولین موج ولتاژ بر حسب v^+ بیابید.