



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب

پروژه‌ی طرح پست‌های فشار قوی

آشنایی با Power Line Carrier و تله موج

استاد:

دکتر حبیب قراگوزلو

نگارش:

هومان هوشمندان

اشکان نیوشا

پاییز ۱۳۸۷

۲	۱- پیشگفتار
۴	۲- کاربردهای PLC
۴	۲-۱- رله
۵	۲-۲- دُورسنجی
۵	۲-۳- صدا
۶	۳- عناصر جفت‌کننده
۶	۳-۱- تله موج‌ها
۶	۳-۱-۱- آشنایی
۷	۳-۱-۲- کاربرد
۷	۳-۱-۳- تله‌های تشدید
۹	۳-۱-۴- تله‌های باندهین
۱۱	۳-۱-۵- ویژگی‌های الکتریکی تله موج‌ها
۱۵	۳-۱-۶- دیگر دانستنی‌ها درباره‌ی تله موج‌ها (مرجع ۲)
۱۹	۳-۲- خازن‌های جفت‌کننده
۲۰	۳-۲-۱- ساختمان
۲۲	۳-۲-۲- کاربرد
۲۲	۳-۲-۳- ترانسفورمر ولتاژ خازن جفت‌کننده (CCVT)
۲۳	۳-۳- میزان گرهای خط و میان‌برها
۲۵	۳-۳-۱- سیم‌پیچ درین در میزان گرهای خط
۲۶	۳-۳-۲- میان‌برها
۲۶	۳-۴- کابل‌های کواکسیال و Lead-in
۲۷	۳-۴-۱- کابل‌های کواکسیال
۲۷	۳-۴-۲- کابل‌های تراکسیال
۲۸	۳-۴-۳- سیم Lead-in تک‌سانای عایق‌شده
۲۹	۳-۴-۴- نیازمندی‌های عایق
۲۹	۳-۵- دستگاه‌های جفت‌کننده‌ی کمکی
۳۰	۴- بررسی کانال PLC و گزینش فرکانس
۳۰	۴-۱- روش‌های جفت‌کنندگی
۳۳	۴-۲- تلفات کانال
۳۴	۵- استانداردها
۳۵	۶- مرجع‌ها

به نام خدا

چکیده- Power Line Carrier (PLC) فناوری ای برای ایجاد ارتباط از طریق شبکه‌های برق است. این شبکه‌ها می‌توانند AC یا DC و دارای خطوط هوایی یا کابل باشند. در این مقاله، به بررسی کاربری، نیازمندی‌ها و دستگاه‌های مورد نیاز، به ویژه تله موج‌ها (Line Trap) و همچنین نکات مهم این فناوری پرداخته شده است.

کلیدواژه‌گان: Power Line Carrier، PLC، line trap، coupling capacitor، CCVT، line tuner، تله موج، خازن جفت‌کننده، میزان گر خط

۱- پیشگفتار

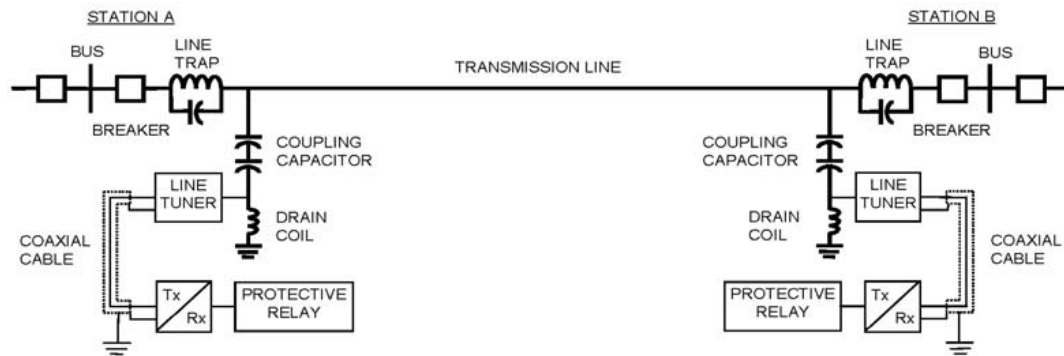
PLC فناوری ای است که با آن جریان‌های فرکانس-رادیویی^۱ پایین از طریق رساناهای فلزی، که می‌تواند DC یا AC، خط هوایی یا کابل باشد، منتشر می‌شود. تفاوت اساسی انتقال توان فشار قوی با انتقال PLC تنها در فرکانس آن‌ها است. گرچه پایه‌ی هر دو انتقال یکسان است؛ ولی، از بسیاری از پارامترهای مهم انتقال PLC، در انتقال توان فشار قوی چشم‌پوشی می‌شود.



شکل ۱- یک فرستنده/گیرنده ی PLC دیجیتال

¹ Radio-frequency (RF)

یک کانال PLC مسیری است شامل دستگاه‌های جفت‌کننده^۱، خط انتقال و دستگاه‌های میزان‌گر^۲ در سوی دیگر خط، که سیگنال فرستاده‌شده از یک پایانه با گذر از آن به گیرنده در پایانه‌ی سوی دیگر خط می‌رسد. در کاربردهای دو سویه، خط برگشتی نیز مانند بالا وجود دارد.



شکل ۲- نمای کلی یک سامانه‌ی PLC

هم‌چنان که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک سامانه‌ی ساده‌ی PLC سه بخش دارد: ادوات پایانه‌ها، عناصر جفت‌کننده و خط انتقال. ادوات پایانه‌ها شامل فرستنده، گیرنده و رله‌های حفاظتی می‌باشد. جفت‌کننده‌ها، میزان‌گرهای خط^۳، خازن‌های جفت‌کننده^۴ و تله موج^۵ها را در بر می‌گیرد. این عناصر، پایانه‌ها و خط انتقال را به هم مرتبط می‌کنند. از آنجا که در پایانه‌ی فرستنده/گیرنده تنها باید سیگنال‌هایی با فرکانس‌های PLC وجود داشته باشد، نه سیگنال‌های فرکانس قدرت و همچنین این سیگنال‌های PLC نیز در مسیر نباید تضعیف شود و باید همه‌ی آنها به پایانه برسد، دستگاه‌های بالا به عنوان فیلترهای گوناگون، برای فیلتر فرکانس(های) قدرت یا PLC کار می‌کنند. خط انتقال نیز مسیری مناسب برای گذر سیگنال‌هایی در فرکانس PLC بین دو پایانه فراهم می‌کند. در پایانه‌ها بر اساس نیاز دو یا چند فرستنده و گیرنده می‌تواند قرار گیرد. پیوند فیزیکی حامل^۶ با خط از طریق خازن‌های جفت‌کننده برقرار می‌شود. این خازن‌ها در فرکانس‌های حامل، امپدانس کم و در فرکانس‌های قدرت، امپدانس بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند. سیم‌پیچ درین^۷ که جزو خازن‌های جفت‌کننده است، مسیری به زمین، با امپدانس کم برای فرکانس‌های قدرت و با امپدانس بسیار زیاد برای فرکانس‌های حامل، ایجاد می‌کند. افزون بر اینجا، این سیم‌پیچ‌ها در میزان‌گرهای خط نیز می‌توانند وجود داشته باشند. در صورتی که این سیم‌پیچ هم در خازن‌های جفت‌کننده و هم در میزان‌گر خط قرار گیرد، کارکرد موازی آنها باید بررسی شود.

¹ Coupling - تزویج

² Tuning

³ Line tuner

⁴ Coupling Capacitor

⁵ Line Trap

⁶ Carrier

⁷ Drain Coil

میزان گر خط، تطبیق امپدانس بین دستگاه‌های پایانه و خط انتقال، و تنظیم تشدید با خازن‌های جفت‌کننده را انجام می‌دهد؛ چرا که فرستنده/گیرنده‌ی PLC به مانند یک بار ختم‌کننده برای خط انتقال است و اگر با امپدانس موجی خط برابر نباشد سبب تلفات در خط می‌شود. تله موج نیز برای کمینه کردن اتلاف انرژی حامل و جلوگیری از اتصال کوتاه سیگنال حامل در خط بدون خطا، هنگام خطای خارجی، در خط نصب می‌شود.

بنابراین، می‌توان گفت که تله موج به عنوان فیلتر سیگنال‌های PLC، با جلوگیری از ورود این سیگنال‌ها به پست، سبب می‌شود همه‌ی آنها به پایانه‌ی PLC وارد شوند و از تلف شدن آنها جلوگیری می‌کند. خازن‌های جفت‌کننده نیز با نشان دادن امپدانس بالا در برابر سیگنال‌های فرکانس قدرت و در نتیجه فیلتر کردن آنها، سبب تلف آنها و افت ولتاژ شدید در آنها می‌شود و بدین روش PLC را از ولتاژ قدرت جدا و ایزوله می‌کند. از دیگر سو، سیم‌پیچ‌های درین نیز باقی‌مانده‌ی سیگنال‌های قدرت را، که از فیلتر بالا گذشته‌اند، به زمین منتقل می‌کند؛ در حالی که در برابر سیگنال‌هایی PLC امپدانس بالایی از خود نشان می‌دهد.

فرکانس‌هایی بین ۳۰ تا ۵۰۰ کیلو هرتز برای انتقال PLC مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ که بسیار بیشتر از فرکانس‌های توان است. بنابراین، جداسازی^۱ آن از فرکانس‌های توان و نویز به آسانی انجام‌پذیر است. از سویی دیگر، این فرکانس‌ها آن اندازه زیاد نیست که سبب تضعیف زیاد شود. گرچه فرکانس‌هایی کمتر از ۳۰ کیلو هرتز نیز می‌تواند برای PLC استفاده شود، اما، جفت کردن بهینه‌ی آن‌ها با خط انتقال، (توسط خازن‌های جفت‌کننده) سخت است.

۲- کاربردهای PLC

۲-۱- رله

پارامترهایی مانند گونه‌ی آرایش حفاظت^۲، سرعت کانال و فاصله‌ی دستگاه PLC از رله، تعیین‌کننده‌ی گونه‌ی تنظیم PLC است. دو گونه کانال PLC برای آرایش رله‌های حفاظتی به کار می‌رود:

Single-Function ON-OFF [Amplitude Modulated (AM)]	-۱
Frequency Shift Keyed (FSK)	-۲

^۱ Isolation

^۲ Type of Protection Scheme

۲-۲- دورسنجی^۱

دورسنجی عبارت است از پایش از راه دور ولتاژ، جریان، وات، وار و اطلاعات دورسنجی آنالوگ و نسبتاً آهسته هستند و نیاز به سرعت زیاد ندارند؛ بنابراین برای آن می‌توان از کانال‌های PLC باریک‌باند استفاده کرد. دورسنجی‌های ساده از AM استفاده می‌کنند؛ یعنی، سیگنال آنالوگ برای مدتی معین منتقل می‌شوند و این مدت بستگی به اندازه‌ی پارامتر آنالوگ دارد. این گونه‌ی دورسنجی زمان‌بر است و برای پارامترهایی مناسب است که به آرامی تغییر می‌کنند. در دورسنجی‌های پیشرفته‌تر از FSK برای انتقال داده استفاده می‌شود؛ یعنی، یک فرکانس در یک پهنای باند باریک شیف‌ت می‌یابد. تغییرات پارامترهای آنالوگ در این روش بسیار تندتر از روش مدت پالس (AM)، می‌تواند انتقال یابد. بسیاری از پارامترهای دورسنجی از آنالوگ به دیجیتال تبدیل می‌شوند؛ تا بدین صورت فرکانس FSK صفر و یا یک شود.

۲-۳- صدا

ارتباطات صدایی بر روی PLC با بهره‌گیری از AM سوار می‌شود. برای این منظور یک فرستنده-گیرنده^۲ روشن-خاموش در حالت نیم-دوسویه^۳ و یا یک فرستنده-گیرنده‌ی FSK در حالت تمام-دوسویه می‌تواند به کار رود. یک پهنای باند باریک (۳ کیلو هرتز یا بیشتر) در نزدیکی فرکانس مرکزی آن اجازه‌ی انتقال صدای انسان را می‌دهد. کاستی انتقال صدا، نسبت به دو کاربرد دیگر، نیاز به نسبت سیگنال-به-نویز (SNR) و پهنای باند بزرگتر است.

¹ Telemetry
² Transceiver
³ Half-duplex

۳- عناصر جفت کننده

۳-۱- تله موجها



شکل ۳- تله موج

۳-۱-۱- آشنایی

این دستگاه از انتقال سیگنال‌های فرکانس‌های بالای PLC در جهت‌های ناخواسته‌ی و بنابراین اتلاف انرژی آن جلوگیری می‌کند. (مرجع ۲) کاربرد تله موج نشان دادن امپدانس‌ی بالا از خود، در فرکانس‌(های) حامل و امپدانس‌ی ناچیز در فرکانس قدرت است؛ تا بدین روش برای حامل سیگنال میزان‌های زیر کمینه شود:

أ) تلفات در دستگاه‌های پست

ب) زمین شدن هنگام خطایی خارج از مسیر سیگنال PLC

ج) تضعیف با یک خط tap یا شاخه‌ای از مسیر انتقال اصلی

د) ناهم‌فازی دریافت (اگر انتقال سیگنال حامل از چند مسیر اجازه داده شود، ممکن است رخ دهد).

تله موج با کاهش تداخل از دیگر کانال‌های حامل، گستره‌ی گزینش فرکانس‌ها را می‌افزاید. در واقع، هدف از بهره‌گیری از تله موج‌ها، جداسازی هرچه بیشتر مسیر انتقال حامل، در فرکانس حامل، از دیگر بخش‌های سامانه است. تله موج‌ها به صورت سری قرار می‌گیرند؛ بنابراین برای ایستادگی در جریان نامی فرکانس قدرت و اتصال کوتاه خط ساخته می‌شوند. ویژگی‌ها و نیازمندی‌های یک تله موج در ANSI C93.3 و IEC 60353 استاندارد شده است.

۳-۱-۲- کاربرد

هنگام گزینش تله موج، هدف کانال حامل، درجه قابلیت اطمینان نیاز، ویژگی‌های تضعیف مسیر انتقال و هر گونه تغییر و اصلاح آینده‌ی کانال حامل هوشیارانه برآورد می‌شود. تله موج‌ها می‌توانند میزان‌پذیر^۱ یا میزان‌ناپذیر باشند. اساس گونه‌های میزان‌پذیر آن، یک مدار L/C، همراه مدار میزان یا بسته‌ی میزان^۲ است؛ که امکان گزینش تک‌فرکانس، دوفرکانس و یا باندپهن را فراهم می‌کند. تله موج‌های میزان‌ناپذیر از یک القاکننده‌ی ساده تشکیل شده‌اند؛ که سیم‌پیچ آن‌ها با نشان‌دادن اندوکتانس زیاد، مسیر انتقال حامل را جدا می‌کند.

۳-۱-۳- تله‌های تشدیدی

این تله موج‌ها در دو گونه‌ی تک‌فرکانس و دوفرکانس و برای سد^۳ تنها یک و یا دو باند سیگنال فرکانس حامل ساخته می‌شوند و اندوکتانسی کمتر از ۰/۵ میلی‌هانری دارند.

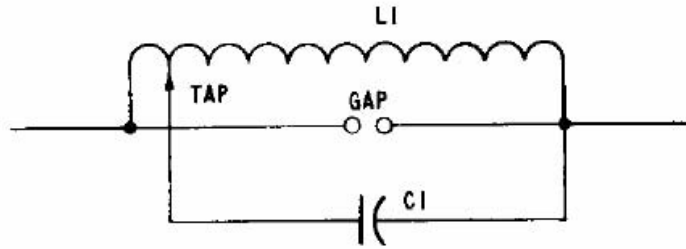
۳-۱-۳-۱- تله‌های تک‌فرکانس

تله موج‌های تک‌فرکانس ساده‌ترین گونه‌ی تله موج‌ها هستند و برای تشدید در هر فرکانسی درون بازه‌ی نامی‌شان قابل تنظیمند. باند سد آن‌ها به ازای فرکانس‌هایی تعریف می‌شود که بزرگی امپدانس در آن‌ها بیشتر از ۴۰۰ اهم باشد. نمای مداری و ویژگی امپدانسی این گونه تله موج در شکل آمده است. فرکانس‌های f_A و f_B محدوده‌ی پهنای باند را مشخص کرده‌اند.

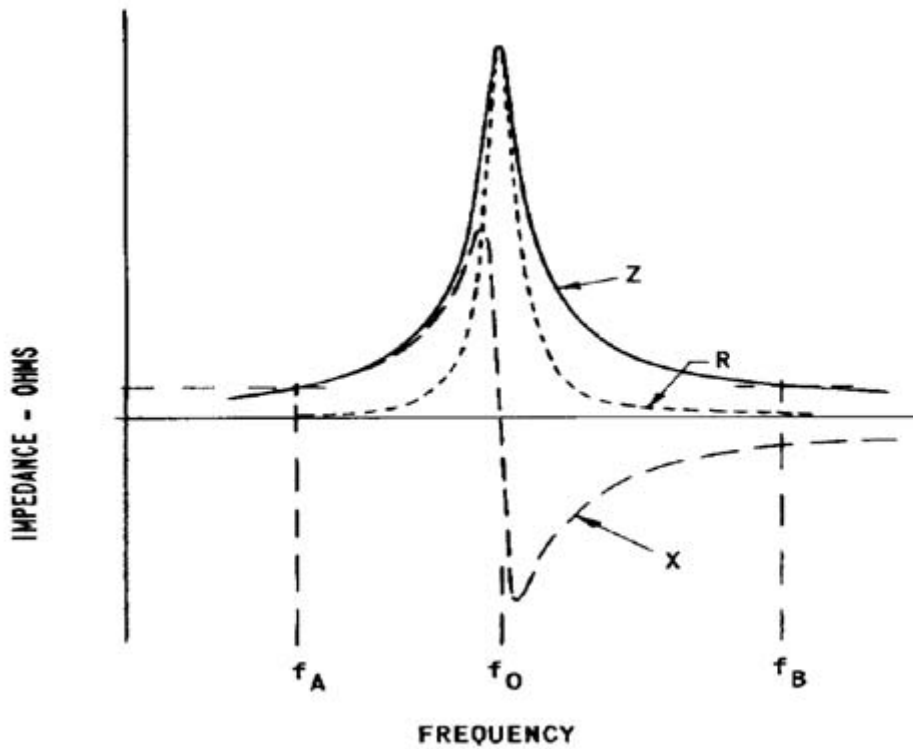
¹ Tuned

² Tuning Pack

³ Block



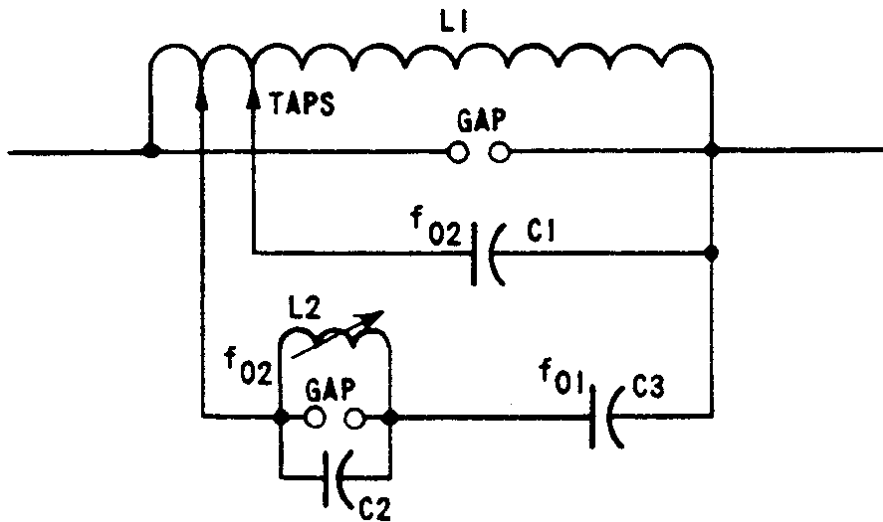
شکل ۴- نمای مداری تله موج تک‌فرکانس



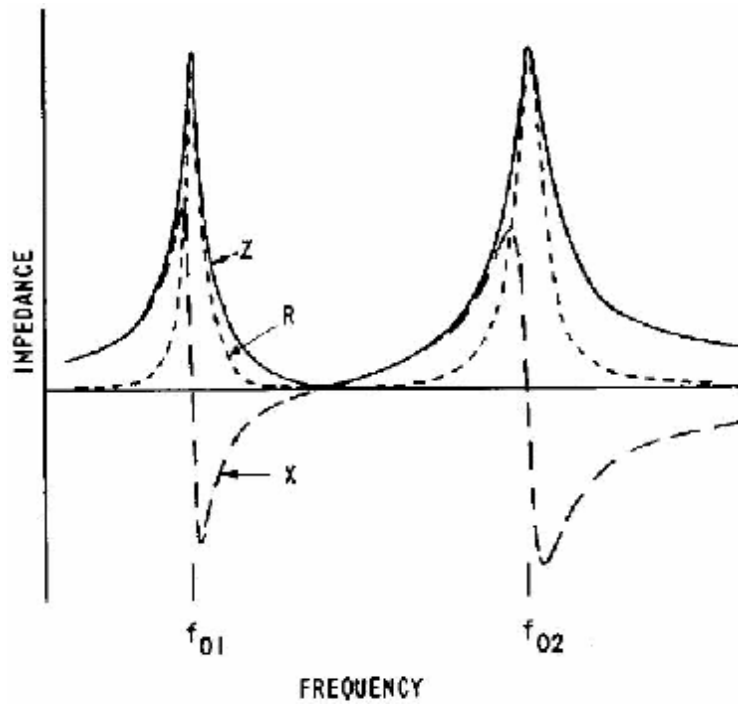
شکل ۵- امپدانس یک تله موج تک‌فرکانس

۳-۱-۳- تله‌های دوفرکانس

این تله موج‌ها هم‌چنان‌که در شکل نشان داده شده‌اند، دارای دو باندها کاملاً جدا در همسایگی قله‌های تشدید هستند.



شکل ۶- نمای مداری تله موج دوفراکانس



شکل ۷- امپدانس یک تله موج دوفراکانس

۳-۱-۴- تله‌های باندهین

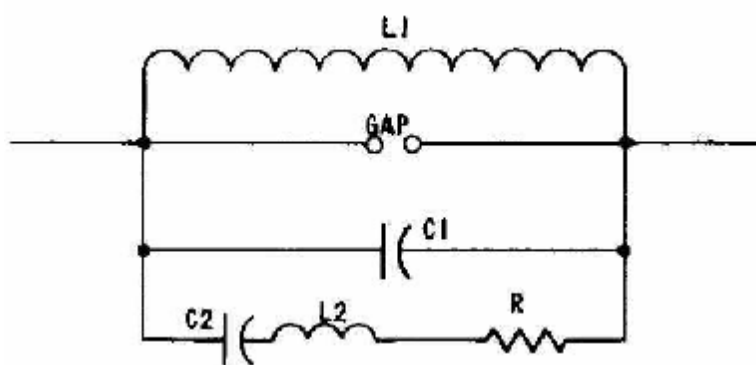
تله‌های باندهین برای کاربردهای چندکاناله مناسبند؛ چراکه طراحی تله‌های تشدیدی برای بیش از دو فرکانس بسیار سخت است. این تله‌ها برای باندهی ویژه، برای نمونه ۹۰ تا ۲۰۰ کیلو هرتز طراحی می‌شوند و کانال‌ها در هر جای این باندهی می‌توانند قرار گیرند. در این گونه تله یک

دستگاه میزان گر را با سیم پیچ القاکننده‌ی اصلی می‌آمیزند، تا کمترین امپدانس سدکنندگی را در طول کل باند داشته باشد.

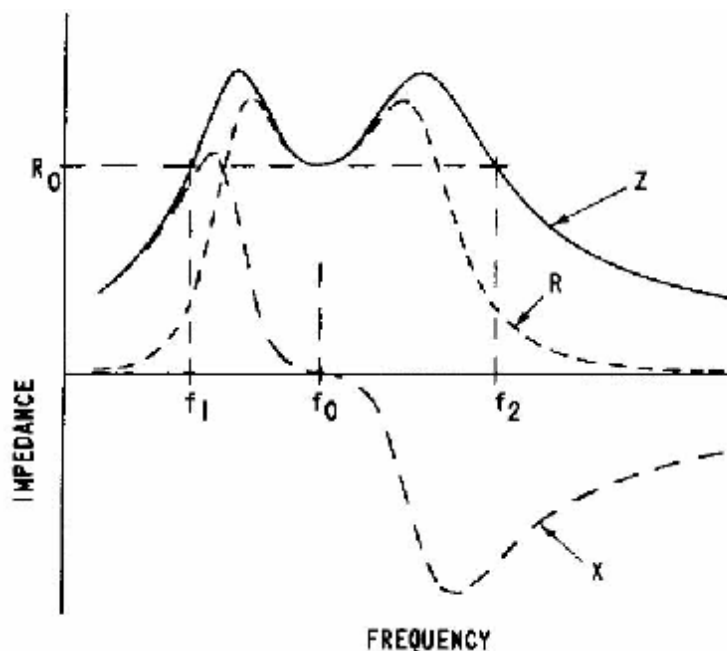
تله موج‌های باندپهن بر دو گونه‌ی ثابت^۱ و تنظیم‌پذیر^۲ اند. القاگرهای میزان‌ناپذیر (غیر باندپهن) نیز گرچه اساس کارشان با تله موج‌های باندپهن متفاوت است، در این رده، دسته‌بندی می‌شوند.

۳-۱-۴-۱- تله‌های باندپهن ثابت

این تله‌ها در کارخانه و برای پهنای باندی معین ساخته می‌شوند و در محل قابل تنظیم نیستند. نمای درونی و ویژگی امپدانس این گونه تله در شکل نشان داده شده است.



شکل ۸- نمای مداری تله موج باندپهن ثابت

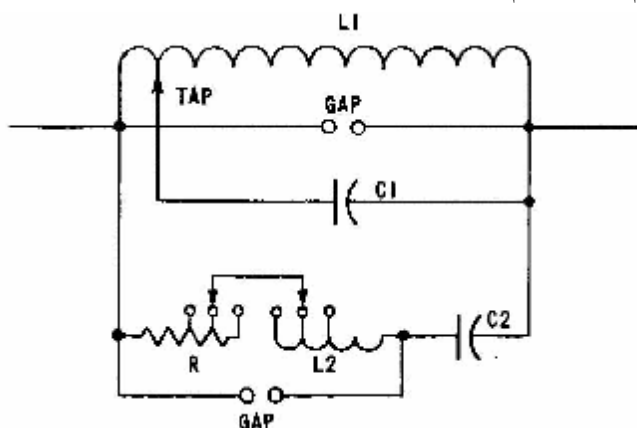


شکل ۹- امپدانس یک تله موج باندپهن ثابت

¹ Fixed
² Adjustable

۳-۱-۴-۲- تله‌های باندهین تنظیم‌پذیر

این گونه هم‌چنان که در شکل نشان داده شده است، دارای دستگاهی میزان‌گر است که می‌تواند باند سد را در بخش‌های گوناگون فرکانسی قرار دهد. گونه‌ی میزان‌گر همچنین امکان‌پذیر است. مقدارهای گوناگون را برای کمینه‌ی امپدانس را فراهم می‌کند. ویژگی امپدانس این گونه، مانند تله‌های دسته‌ی پیش است. تله موج‌های ثابت در یک امپدانس معین، پهنای باند بیشتری را نسبت به گونه‌ی تنظیم‌پذیر فراهم می‌کنند.



شکل ۱۰- نمای مداری تله موج باندهین تنظیم‌پذیر

۳-۱-۴-۳- القاگر خط میزان‌ناپذیر

القاگرهای خط میزان‌ناپذیر دارای القاکنندگی بالایی (۰/۵ میلی‌هانری یا بیشتر) هستند و بسته‌ی میزان‌گر ندارند و این، همراه با نیاز نداشتن به نگهداری، از برتری‌های آن‌ها نسبت دیگر گونه‌هاست. کاربرد این گونه، بیشتر در شبکه‌های جفت‌کننده‌ی بالاگذر است. یکی از کاستی‌های این گونه تله، امکان تشدید سری آنها با اثر خازنی دستگاه‌های کلیدزنی است؛ که بیشتر ممکن است در شرایط مدارشکن باز، یعنی، خط بی‌انرژی‌شده رخ دهد. بعضی از این القاگرهای خط، در فرکانس‌های درون باند حامل، خودتشدید هستند؛ که معمولاً دارای Q پایین (۸ تا ۱۰) و عناصر سری با مقاومت بالا هستند.

۳-۱-۵- ویژگی‌های الکتریکی تله موج‌ها

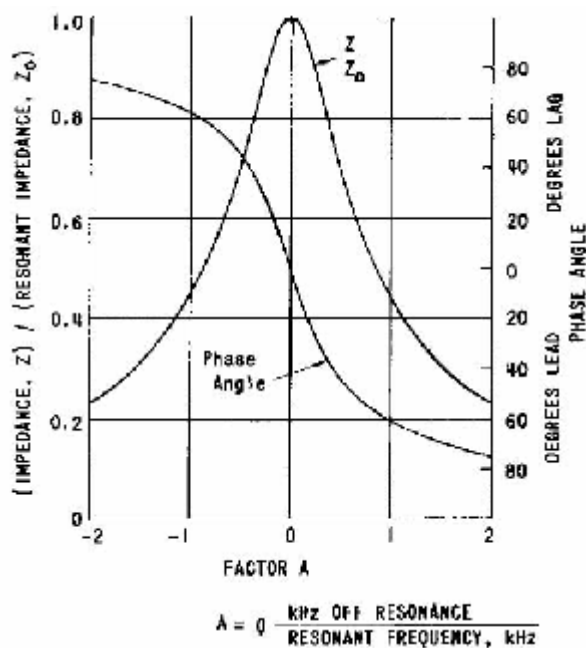
۳-۱-۵-۱- تله‌های تک‌فرکانس

این تله موج‌ها امپدانس سد را برای تنها یک فرکانس و یا باند بسیار باریکی از فرکانس فراهم می‌کنند. نما و نمودار Z این نوع، در بالا نشان داده شد. در نمودار امپدانس، مقدارهای R و X نیز نمایش داده شده‌اند.

کمترین فرکانس تشدید، f ، که تله با خازن داده شده C ، می تواند تنظیم شود از رابطه‌ی

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

به دست می آید. فرکانس های بالاتر، با تنظیم دورتر تپ^۱ L_1 از پایان سیم پیچ امکان پذیر است؛ که در این صورت سیم پیچ تله، به عنوان اتوترانسفورمری برای کاهش مقدار مؤثر C_1 عمل می کند. گرچه در این صورت، از اندوکتانس L_1 نیز مقداری کاسته می شود؛ ولی غیر از هنگامی که بین تپ و پایانه‌ی سیم پیچ، شمار دور زیاد باشد، این کاهش ناچیز است. باید توجه کنیم که کل سیم پیچ همواره بین دو پایانه‌ی اصلی القایده می شود. امیدانس هنگام تشدید، Z ، از رابطه‌ی $Z = 2\pi f L_1 Q$ به دست می آید؛ که Q («فاکتور کیفیت»^۲)، برابر است با نسبت رکتانس القایی به مقاومت سری در مدار. اگر Q با تغییر فرکانس، ثابت بماند، آشکار است که امیدانس فرکانس تشدید، با فرکانس تشدید و القایده‌گی تله، نسبت مستقیم دارد. Q یک تله موج گاهی با افزودن یک مقاومت سری با خازن در مدار میزان گر، کاهش می یابد. گرچه این کار امیدانس تله در تشدید را می کاهد، ولی مؤلفه‌ی مقاومتی آن را می افزاید. هدف این تغییر، کاهش تضعیف حامل سیگنال است؛ که ممکن است در هنگام کلیدزنی، اثر خازنی شین با تله، پایین تر از فرکانس تشدید، تشدید کند.



شکل ۱۱

برای محاسبات در فرکانس هایی نزدیک تشدید، می توان از منحنی شکل ۱۱ بهره برد. در فرکانس هایی دورتر از فرکانس تشدید، دامنه و فاز امیدانس از رابطه های زیر به دست می آید:

¹ Tap
² Quality Factor

$$Z = \frac{2\pi f L_1}{\alpha^2 - 1}$$

که $\alpha = f / f_0$ و این معادله برای Q بی‌نهایت (سیم‌پیچ ایده‌آل) دقیق است.

$$\theta = \text{Arc tan} \left(1 - \frac{1}{\alpha^2} \right)$$

دو یا چند کانال حامل نیز اگر فرکانس آنها درون پهنای باند تله موج بیفتد، می‌توانند در یک تله موج تک‌فرکانس مورد استفاده قرار گیرند.

۳-۱-۵-۲- تله‌های دوفرکانس

این تله‌ها دو قله‌ی تشدید برای امپدانس ایجاد می‌کنند؛ که هر کدام مانند قله‌های تله‌های تک‌فرکانس هستند و به طور کلی هر امپدانس فرکانس تشدید این نوع، کمتر از امپدانس تله موج‌های تک‌فرکانس است. هم‌چنان که در شکل‌های بالا می‌توان دید، در هر دو مدار تشدید، $L_1 C_1$ و $L_2 C_2$ برای فرکانس بالاتر هر کدام تنظیم شده است. فرکانس پایین‌تر با میزانش خازن C_3 و دومین تپ سیم‌پیچ اصلی، L_1 ، تنظیم می‌شود. بهتر است فرکانس دو تشدید با فاصله‌ی بیشینه‌ی ۲۵ kHz و ۲۵٪ فرکانس بالاتر (هر کدام که بزرگتر است)، باشد. فاصله‌ی کمتر باعث اعوجاج بین دو قله در نمودار امپدانس و افزایش نامتقارنی در هر باند سد می‌شود. بیشینه‌ی فاصله‌ی فرکانسی تنها توسط بسته‌ی میزان‌گر محدود می‌شود. بسته‌های میزان‌گر در تله‌های دوفرکانس از هم جدا هستند.

۳-۱-۵-۳- تله‌های باندپهن ثابت

در این تله‌ها، عناصر مداری برای به دست آوردن ویژگی امپدانس دلخواه به سیم‌پیچ اصلی، افزوده شده است؛ به گونه‌ای که یک فیلتر *terminated half section* را شکل می‌دهد. مدارهای تشدید $L_1 C_1$ و $L_2 C_2$ فیلترها و R ، *termination* را شکل می‌دهد و مقدار آن، معمولاً برابر امپدانس نامی فیلتر، R ، است. همچنین این مقاومت، بیانگر کمینه‌ی امپدانس در پهنای باند تله است. با استفاده از مدارهای پیچیده‌تر می‌توان به ویژگی امپدانس صاف‌تری رسید. کمینه‌ی امپدانس سد برای این گونه بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم است.

$$GMF = \sqrt{f_{\text{بالا}} \times f_{\text{پایین}}}$$

برای این تله موج‌ها "میانگین هندسی فرکانس"^۱ به صورت $f_{\text{پایین}}$ و $f_{\text{بالا}}$ که بالا و پایین فرکانس قطع بالا و پایین پهنای باند فیلتر میان‌گذر است و در مورد

^۱ Geometric Mean Frequency

تله موج نیز، این نقاط فرکانس پایین و فرکانس بالای کمینه‌ی امپدانس سد است. اکنون، رابطه‌ی پهنای باند چنین است:

$$BW = \frac{2\pi\sqrt{TL}f_c^2}{R}$$

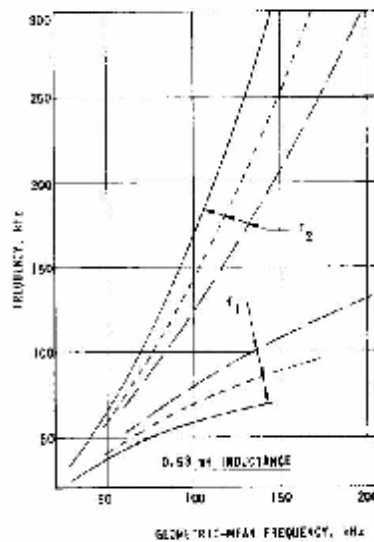
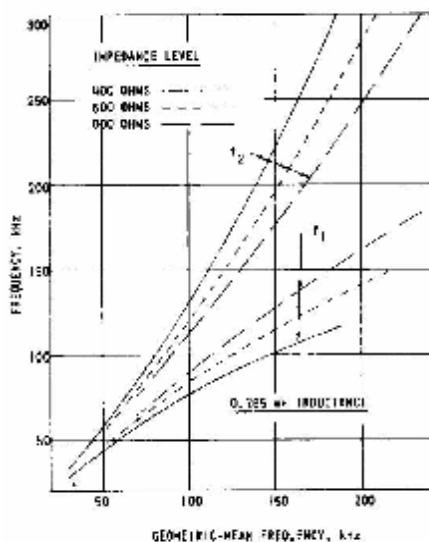
که BW پهنای باند بر حسب f_c , kHz بر حسب GMF بر حسب T , kHz ضریب نامیزانی^۱ (تقریباً ۰/۹)، L_1 القایدگی سیم‌پیچ اصلی بر حسب mH و R مقاومت terminating بر حسب اهم است. محدوده‌ی واقعی باند، f_1 و f_2 با در دست داشتن پهنای باند و GMF به دست می‌آید:

$$f_1 = \sqrt{\left[\left(\frac{BW}{2}\right)^2 + f_c^2\right]} - \frac{BW}{2}$$

$$f_2 = \sqrt{\left[\left(\frac{BW}{2}\right)^2 + f_c^2\right]} + \frac{BW}{2}$$

۳-۱-۵-۴- تله‌های باندپهن تنظیم‌پذیر

تله‌های باندپهن تنظیم‌پذیر شامل یک سیم‌پیچ القاکننده و یک بسته‌ی میزان‌گر است؛ که می‌تواند در کارخانه و یا محل تنظیم شود. معمولاً القایدگی سیم‌پیچ از ۰/۲۶۵ تا ۱/۵۹ میلی هانری است. پهنای باند و محدوده‌ی باند این گونه نیز با رابطه‌های گونه‌ی ثابت آن به دست می‌آید؛ با این تفاوت که T ممکن است اندکی کمتر باشد. کمینه‌ی امپدانس سد برای این گونه بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم است. رابطه‌ی پهنای باند و مقدار امپدانس برای دو تله موج‌های با القایدگی گوناگون در پایین آمده است.



شکل ۱۲- پهنای باند قابل دسترس با تله‌هایی با القایدگی ۰/۲۶۵ و ۰/۵۳ میلی هانری و سطح امپدانس گوناگون

^۱ Detuning

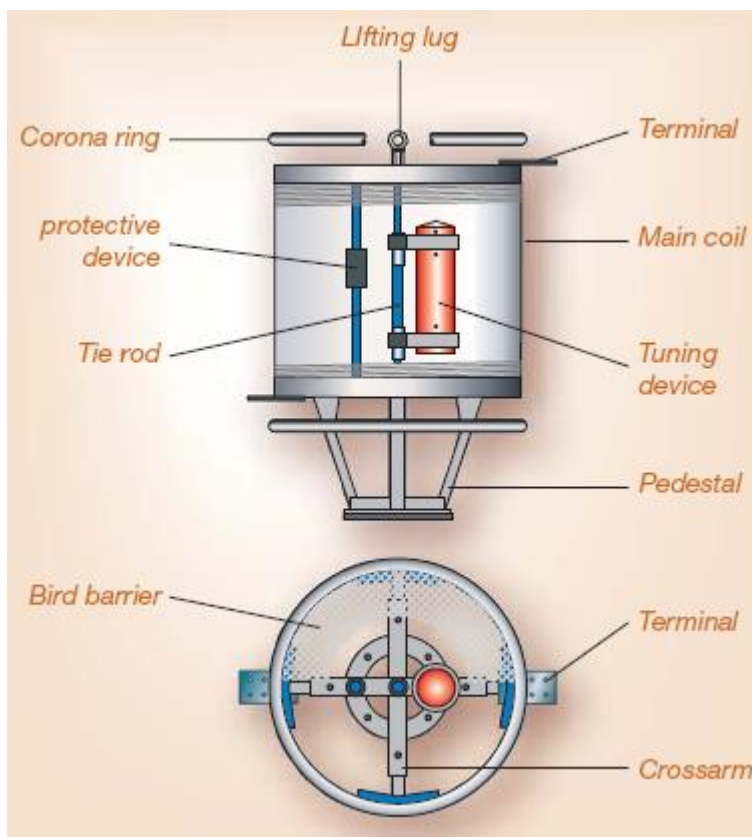
۳-۱-۵-۵- الفاکرهای خط میزان ناپذیر

امپدانس راکتیو این گونه، با تغییرات فرکانس تغییر می کند و مقادیرهای نامی آنها بین ۰/۵۳ تا ۲/۶۵ میلی هانری است.

۳-۱-۶- دیگر دانستنی‌ها درباره‌ی تله موج‌ها (مرجع ۲)



شکل ۱۳- نصب سری تله موج با خط



شکل ۱۴- عناصر اصلی یک تله موج

۳-۱-۶-۱- سیم‌پیچ اصلی

این سیم‌پیچ باید در برابر جریان‌های بالا بایستد و بیشتر از پروفیل‌های آلومینیومی با سطح مستطیلی که ایستادگی مکانیکی بالایی دارند، ساخته می‌شود و بر اساس جریان نامی نیاز، از دو یا چند پروفیل موازی استفاده می‌شود. هر دور با فاصله‌اندازه‌های فایبرگلاس تقویت‌شده^۱، از دیگری جدا می‌شود. حلقه‌ها با بازوهای صلیبی^۲، در بالا و پایین سیم‌پیچ اصلی، نگه‌داشته می‌شوند و این بازوها با میله‌های عایق فایبرگلاس به هم وصل می‌شوند.

نکات

- این سیم‌پیچ بهتر است سبک و از لحاظ مکانیکی تقویت‌شده باشد.
- این سیم‌پیچ باید توان خنک‌کنندگی بالایی داشته باشد.
- طراحی آن به گونه‌ای باشد، که شکاف (شکست عایقی) سطحی در آن رخ ندهد.

۳-۱-۶-۲- میزان گر

- میزان گر بیشتر بر میله‌ی نگهدارنده‌ی بازوها سوار می‌شود.
- تله موج‌هایی بهترند، که میزان گر آن‌ها را، بدون نیاز به بازکردن و پایین آوردن خود تله موج، بتوان به آسانی پیاده و سوار کرد.
- پوشش میزان گر باید ایستادگی دمایی بالای داشته باشد و در برابر عوامل آب و هوایی مقاوم باشد.

۳-۱-۶-۳- دستگاه محافظ

این عنصر بین سیم‌پیچ اصلی و میزان گر تله موج قرار می‌گیرد و تنها در گذراهای ولتاژ بالا عمل می‌کند و پس از آن دوباره نافع‌ال می‌شود. (در جریان‌های اتصال کوتاه عمل نمی‌کند). بر اساس ویژگی‌های نیاز، می‌توان از گونه‌ی بی‌شکاف مانند اکسید فلز (مانند ZnO) یا گونه‌ی شکاف‌دار مانند کربید سیلیکون (SiC) استفاده کرد.

۳-۱-۶-۴- نصب کردن

به دو روش آویزی و پایه‌ای (عمودی و یا افقی) می‌توان یک تله موج را نصب کرد.

¹ Fiberglass-reinforced spacers

² Tie Rod

همه‌ی تله موج‌ها دارای یک قلاب آویزش هستند؛ که مستقیماً به میله‌های نگه‌دارنده وصل شده‌اند. در پایین تله موج نیز، قلاب مشابهی وجود دارد؛ تا با لنگرکردن آن، از تکان خوردن تله موج جلوگیری شود.



شکل ۱۵- نصب آویزی تله موج

در نصب پایه‌ای عمودی، تله موج از یک پایه‌ی آلومینیومی با بلندای کافی استفاده می‌شود؛ تا از گرم شدن مقره‌ها (یا CCVTها، که تله‌های سبک مستقیماً روی آن‌ها نصب می‌شوند)، به وسیله‌ی میدان مغناطیسی سیم‌پیچ اصلی جلوگیری شود. بر حسب سنگینی تله، از یک یا چند ستون مقره برای نگهداری پایه استفاده می‌شود.

در صورتی که طراحی خنک‌کنندگی عایق اجازه دهد، تله موج‌ها (معمولاً بزرگ و سنگین) را می‌توان به صورت افقی نصب کرد. برای این کار از دو یا چهار پایه (متفاوت با پایه‌های نصب عمودی)، می‌توان استفاده کرد.

۳-۱-۶-۵- پایانه‌ها

پایانه‌های تله موج از ورق‌های نازک آلومینیومی یا مسی (معمولاً) با چهار سوراخ ساخته می‌شوند. شمار و سطح این پایانه‌ها به جریان نامی تله بستگی دارد.

۳-۱-۶-۶- راه‌بندهای پرندگان

راه‌بندهای پرندگان، در بالا و پایین تله، از ورود پرندگان به درون تله موج جلوگیری می‌کنند. این راه‌بندها از ورقه‌های مشبک (فایبرگلاسی که معمولاً در برابر دما و فرابنفش مقاوم شده‌اند)، ساخته می‌شوند.



شکل ۱۶- راه‌بندهای پرندگان یک تله موج

۳-۱-۶-۷- حلقه‌های کرونا (گزینشی)

برای جلوگیری از تخلیه کرونا در ولتاژهای بسیار بالا، حلقه‌هایی تیوبی (با سطح مقطع دایره) در بالا و پایین تله موج قرار می‌گیرند. در ولتاژهای کمتر از 245 kV به این حلقه‌ها نیاز نیست. (این حلقه‌ها عرض تله را در حدود 40 mm و طول آن را در حدود 100 mm می‌افزایند.)



شکل ۱۷- نصب عمودی یک تله موج به همراه حلقه‌های کرونا

۳-۱-۶-۸- متصل‌کننده‌های خط (Line Connectors) (گزینشی)

برای وصل مستقیم رساناهای فشار قوی به تله، از این ادوات (آلومینیومی یا bi-metal) استفاده می‌شود.



شکل ۱۸- یک تله موج به همراه پایه‌ی نصب عمودی، حلقه‌های کرونا و متصل‌کننده‌های خط

۲-۳- خازن‌های جفت‌کننده

انتشار مؤثر سیگنال‌های PLC در ارتباطات نقطه‌به‌نقطه نیاز به انتقال مؤثر سیگنال‌های حامل بین پایانه‌های فرستنده و گیرنده دارد. مدارهای جفت‌کننده در درازای سال‌ها شکل‌های گوناگونی گرفته‌اند؛ اما، نمونه‌های کنونی از خازن‌های جفت‌کننده به عنوان پایه‌ای‌ترین عنصر بهره می‌برند. خازن‌های جفت‌کننده پرکاربردترین و مؤثرترین وسیله در جفت کردن سیگنال‌ها به/از خطوط فشار



قوی است. ویژگی‌ها و نیازمندی‌های یک خازن جفت‌کننده در ANSI C93.1 استاندارد شده است. شکاف‌های حفاظتی در تله موج‌ها و خازن‌های جفت‌کننده ممکن اثری ناسودمند بر سامانه‌های رله‌ای حفاظتی داشته باشند. شکاف‌های حفاظتی باید برای مدت کوتاهی پس از خطا عمل کنند؛ تا از آسیب انرژی فرکانس بالا در پیشانی موج خطا به دستگاه جلوگیری نمایند. با این حال، شکاف‌های حفاظتی باید پیش از نیاز رله‌های حفاظتی به کانال PLC از کار بیفتند؛ در غیر این صورت سبب عملکرد نادرست می‌شوند.

شکل ۱۹- خازن جفت‌کننده و تله موج در پست

فشار قوی

۳-۲-۱- ساختمان

خازن‌های جفت‌کننده‌ی رایج از یک دی‌الکتریک کاغذی/روغنی ساخته شده‌اند. لایه‌ای از برگه‌های کاغذ مقوایی در لابه‌لای برگه‌های آلومینیومی گذاشته شده و کل مجموعه به صورت لوله‌ای پیچیده می‌شود. سپس پیچه‌ها به صورت موازی به هم وصل می‌شوند تا توانایی تحمل ولتاژ بالا را بیابند. پیچه‌ها را سپس صاف کرده و روی هم، در درون یک عایق پُرسلانی^۱ توخالی مقره‌دار، برای افزایش طول خزش، جای می‌دهند. عایق‌ها دارای اتصالات فلزی برای نصب و اتصال الکتریسته هستند.

فرآیند ساخت دیگری نیز وجود دارد که در آن، به جای برگه‌های کاغذی، از فیلم استفاده می‌شود و بدین روش تلفات خازن کاهش و سطح عایقی و پایداری خازنی^۲ افزایش می‌یابد. افزون بر این، از آن جا که ظرفیت خازنی نسبت وارون با فاصله رساناها دارد و ضخامت فیلم تقریباً $\frac{2}{3}$ کاغذ است، ظرفیت خازنی در خازن عایق فیلمی، بیشتر است.

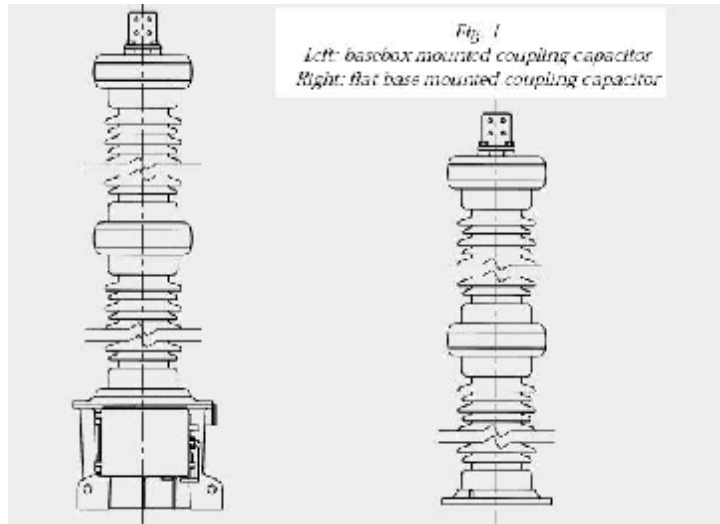
برای ساخت خازن‌هایی با ظرفیت گوناگون در سطح ولتاژ یکسان، از برگه‌های آلومینیومی با سطح مقطع‌های گوناگون استفاده می‌شود. (و این خود نیاز به پرس‌لین با قطرهای نابرابر دارد.) هنگامی که پیچه‌ها در جایشان قرار گرفت، مقره‌ی توخالی از عایق روغنی مایع مناسب پر شده و مهر و موم می‌شود. مجموع کاغذ و روغن تشکیل یک دی‌الکتریک مناسب را می‌دهد.

واحدهای خازنی بر روی محفظه‌هایی با پایه‌ی فلزی سوار می‌شوند. این پایه معمولاً دارای یک سیم‌پیچ درین است. سیم‌پیچ درین همراه با خازن، یک مقسّم ولتاژ وابسته به فرکانس را شکل می‌دهند. این مجموعه در فرکانس بالا، امپدانس زیاد و در فرکانس قدرت (۵۰ یا ۶۰ هرتز) امپدانس پایینی از خود بروز می‌دهند. تقریباً همه‌ی فرکانس‌های بالای ۲۰ کیلو هرتز از این مجموعه گذر می‌کنند. سیم‌پیچ درین از افزایش ولتاژ تا ولتاژ جرقه‌ی شکاف حفاظتی جلوگیری می‌کند. در واحدهای میزان‌گر خط^۳ (LTU) نیز می‌توان به صورت اختیاری از یک سیم‌پیچ درین اضافه استفاده کرد. شکاف‌های حفاظتی، ولتاژ گذرا را در اتصالات حامل محدود می‌کند. هنگام تعمیر، یک کلید زمین کردن حامل نیز، خطر ولتاژ بالا و گذراهای بسیار بزرگ را دفع می‌کند.

¹ Porcelain

² Capacitance Stability

³ Line Tuning Unit



شکل ۲۰- دو گونه خازن جفت کننده

واحدهای تک خازن برای ولتاژهای نامی ۳۴ تا ۱۶۱ کیلو ولت ساخته می شوند. برای ولتاژهای بیشتر باید از ترکیبی از این خازن ها استفاده کرد. برای یک گونه خازن، ظرفیت با ولتاژ نسبت وارون دارد. در جدول پایین، مقدارهای تقریبی موجود برای دسته های ولتاژ گوناگون آورده شده است.

گستره ی ظرفیت خازنی (μF)	دسته ی ولتاژ (kV)
۰/۰۱۰ - ۰/۰۰۴	۳۴
۰/۰۱۵ - ۰/۰۰۴	۴۶
۰/۰۱۵ - ۰/۰۰۳	۶۹
۰/۰۲۰ - ۰/۰۰۲	۹۲
۰/۰۲۰ - ۰/۰۰۱۹	۱۱۵
۰/۰۱۶ - ۰/۰۰۱۴	۱۳۸
۰/۰۱۴ - ۰/۰۰۱۲	۱۶۱
۰/۰۱۰ - ۰/۰۰۰۹	۲۳۰
۰/۰۰۷ - ۰/۰۰۰۶	۲۸۷
۰/۰۰۶ - ۰/۰۰۰۵	۳۴۵
۰/۰۰۵ - ۰/۰۰۱۴	۵۰۰
۰/۰۰۵ - ۰/۰۰۲۳	۷۶۵

۳-۲-۲- کاربرد

یک خازن جفت‌کننده در فرکانس‌های حامل به همراه میزان‌گرهای خط تشکیل یک مدار تشدید، میان‌گذر و یا بالاگذر می‌دهد.

پهنای باند در دسترس برای یک میان‌گذر متشکل از میزان‌گر/خازن جفت‌کننده در GMF معین، با ظرفیت خازن جفت‌کننده نسبت مستقیم دارد.

یک خازن جفت‌کننده، برای فازبه‌زمین به کار می‌رود؛ یعنی، با یک خازن، سیگنال حامل را تنها به یک خط می‌توان جفت کرد و برای جفت کردن فازبه‌فاز باید از دو یا چند خازن جفت‌کننده استفاده کرد.

۳-۲-۳- ترانسفورمر ولتاژ خازن جفت‌کننده^۱ (CCVT)

در بعضی از کاربردها، کارکرد دیگری نیز با افزودن مدارهای جانبی به خازن جفت‌کننده



افزوده می‌شود. خازن جفت‌کننده به عنوان یک تقسیم‌کننده ولتاژ در فرکانس توان عمل می‌کند و یکی از تپ‌های تقسیم‌کننده از محفظه‌ی آن خارج می‌شود. این تپ از آمیزه‌ای از ترانسفورمر/راکتور (همراه با شکاف‌های حفاظتی) خارج شده است و هنگامی که CCVT به ولتاژ نامی وصل شود، ولتاژ ۱۱۵ ولت در خروجی تپ ظاهر می‌شود. این ولتاژ می‌تواند برای بررسی همزمانی^۲ خط، عملکرد رله‌ها و یا اندازه‌گیری به کار رود. کاربرد عادی خازن‌های جفت‌کننده در فرکانس توان، از مدارهای اضافه‌ی CCVT تأثیر نمی‌پذیرد.

شکل ۲۱- نصب مستقیم یک تله موج روی CCVT

^۱ Coupling Capacitor Voltage Transformer

^۲ Synchronism

۳-۳- میزان گرهای خط و میان برها

افزون بر تله موجها، خازنهای جفت کننده و یا CCVTها، سیگنالها برای جفت شدن به خط، نیاز به دستگاههای دیگری به نام «میزان گرهای خط» دارند. میزان گرهای خط به صورت سری بین خازنهای جفت کننده (و یا CCVTها) و کابل های کواکسیال، که سیگنالهای PLC را به تنظیم کننده خط وارد می کنند، جای می گیرند. نقش میزان گرهای خط چنین است:

أ) جفت سازی بهینه ی فرستنده ها و گیرنده های PLC به خط انتقال و کابل
ب) محافظت کارکنان و دستگاه های الکتریکی و الکترونیکی از ولتاژهای فرکانس قدرت و خروشها (surges) و گذراهای خط انتقال

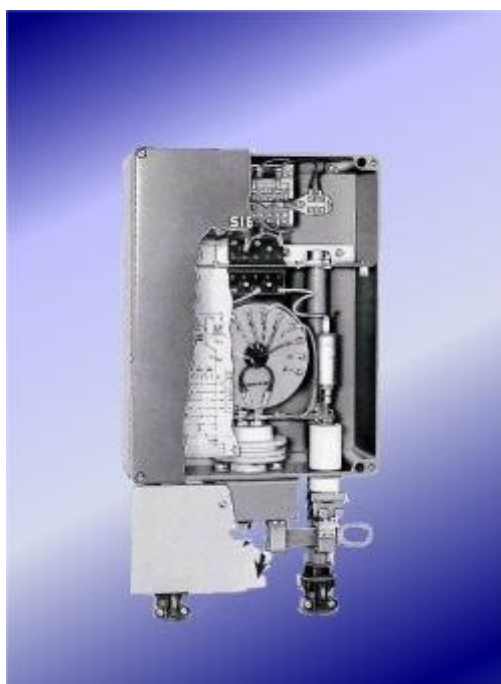
ج) تطبیق امپدانس فرستنده و گیرنده های PLC با خط و کابل انتقال

د) تضعیف سیگنالهای ناخواسته

ه) میانبری از دو سوی ترانسفورمرهای قدرت، کلیدها و دیگر گسستگی^۱ها در خط انتقال، در فرکانس PLC

ویژگی ها و نیازمندی های یک میزان گر خط در ANSI C93.4 و IEC 60481 استاندارد

شده است.



شکل ۲۲- یک میزان گر خط Siemens

¹ Bypass

² Discontinuity

دستگاه‌های میزان‌گر خط بر حسب نیازهای جفت‌شدگی سامانه و پهنای باند، می‌توانند بسیار ساده و یا بسیار پیچیده باشند. پهنای باند آن‌ها به نوع و پیچیدگی میزان‌گرها، مقدار خازن‌های جفت‌کننده، فرکانس تشدید و امپدانس خط یا کابل قدرت، بستگی دارد. رایج‌ترین گونه‌ی اتصال برای آن‌ها از سیم یک فاز به زمین است؛ گرچه، از اتصال دو یا چند سیم فاز می‌توان در مدارهای بحرانی برای فُزونی^۱ سطح سیگنال و برای انتقال سیگنال PLC در خط‌ها استفاده کرد. میزان‌گرهای خط در گونه‌های استاندارد در دسترسند، که در همه‌ی گستره‌ی فرکانس PLC قابل تنظیمند. گونه‌های رایج شامل تشدید تک‌فرکانس، تشدید دو فرکانس، میان‌گذر باندهی و بالاگذر باندهی هستند.

میزان‌گرهای تشدید تک‌فرکانس، در واقع یک میزان‌گر میان‌گذر با یک مدار تشدید سری هستند و پهنای باند آن‌ها که وابسته به فرکانس، مقدار خازن جفت‌کننده و امپدانس خط است، می‌تواند به اندازه‌ای بزرگ باشد که اجازه‌ی گذر فرکانس‌ها در باندهی پهن را بدهد. میزان‌گرهای تشدید دو فرکانس در واقع یک میزان‌گر تشدید با دو ورودی و یک خروجی، همراه با دو شاخه‌ی تشدید سری است؛ که هر کدام جداگانه و برای یک فرکانس همراه با خازن جفت‌کننده میزان شده‌اند. میزان‌گرهای میان‌گذر باندهی، از دو تا پنج مدار تشدید سری و موازی تشکیل شده‌اند. برای فرکانس‌هایی با پهنای باند بسیار بزرگ و یا فرکانس‌های جداگانه با فاصله‌ی فرکانسی زیاد می‌توان از شمار بیشتری از میزان‌گرهای باندهی، بدون کمک خازن‌های جفت‌کننده یا CCVT‌های اضافه، استفاده کرد.

میزان‌گرهای خط به عنوان یک بار ختم‌کننده^۲ برای خط انتقال فشار قوی، باید دارای امپدانسی برابر امپدانس مشخصه (موجی) (surge) خط یا کابل قدرت باشند؛ چراکه اگر خطوط انتقال به درستی ختم نشوند، سبب بازتاب^۳ و اتلاف در خط می‌شود. اندازه این بازتاب وابسته به شدت عدم تطابق امپدانس و وابسته به فرکانس است؛ زیرا که امپدانس میزان‌گر به فرکانس بستگی دارد. بازتاب به ویژه در خط‌های کوتاه، تپ‌شده، هوایی-کابلی و خط‌هایی با stub بدون تله مشکل‌ساز است. پهنای باند تله‌ها و میزان‌گرهای خط باید هم‌سان باشد؛ تا بازتاب را کاهش و انتقال توان خط را بهبود دهد. بنابراین، باید تله‌های تک‌فرکانس همراه میزان‌گرهای تک‌فرکانس، تله‌های دو فرکانس همراه میزان‌گرهای دو فرکانس و تله‌های باندهی همراه میزان‌گرهای باندهی استفاده شود. آمیختن گونه‌های تله و میزان‌گر می‌تواند سبب ایجاد جریان RF و بازتاب ولتاژ و در

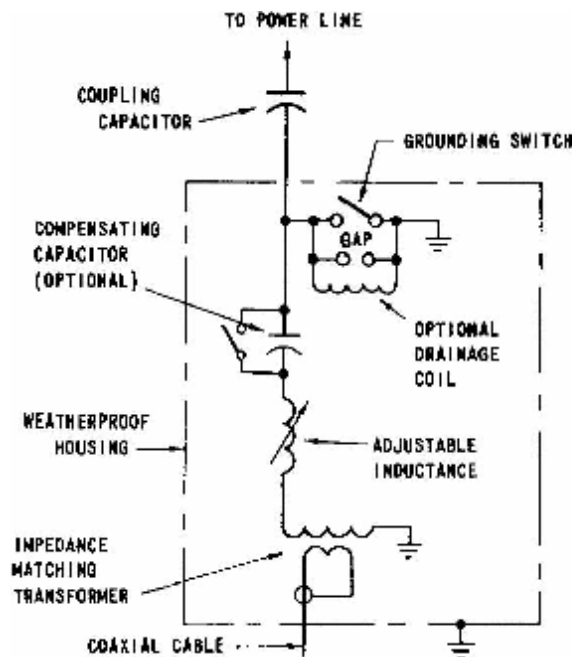
¹ Redundancy

² Terminating

³ Reflection

نتیجه توان بازتابیده‌ی زیاد در پایانه‌های PLC شود. این بازتاب‌ها معمولاً سبب ایجاد موجک^۱‌های دامنه می‌شود؛ که با فاصله‌ی کمتر از ۱ کیلو هرتز تکرار می‌شوند.

برای آزمایش و بررسی میزان‌گر، می‌توان از بخشی از خط که خازن‌های جفت‌کننده در آن قرار دارند، بهره برد. به این کار «پروفایل کردن خط»^۲ می‌گویند و با یک فرکانس‌ساز متغییر با توان مناسب، که بر تلفات جفت‌کنندگی چیره شده و نسبت‌نویزبه‌سیگنال بالایی داشته باشد، انجام می‌شود. این در کابل‌ها و یا آمیزه‌ای از کابل‌ها و خط‌های انتقال قدرت بسیار سودمند است. نمای مداری یک گونه میزان‌گر خط تک‌فرکانس در پایین آمده است.



شکل ۲۳- نمای مداری میزان‌گر خط تک‌فرکانس

۳-۳-۱- سیم‌پیچ درین در میزان‌گرهای خط

از ANSI C93.2، خازن‌های جفت‌کننده همواره باید سیم‌پیچ درین داشته باشند. وظیفه این سیم‌پیچ ایجاد یک مسیر کم‌امپدانس برای جریان‌های فرکانس‌های قدرت به زمین از طریق خازن جفت‌کننده و هم‌زمان نشان‌دادن امپدانس زیاد در برابر جریان‌های فرکانس PLC است. در بسیاری از موارد، یک سیم‌پیچ درین جانبی نیز در میزان‌گرهای خط نصب می‌شود. در این صورت دو درین موازی می‌شوند و امپدانس معادل آن‌ها کم می‌شود و این گرچه برای جریان‌های فرکانس قدرت خوب است، سبب تلفات بیشتر در فرکانس‌های PLC می‌شود. اگرچه افزایش تلفات ناچیز

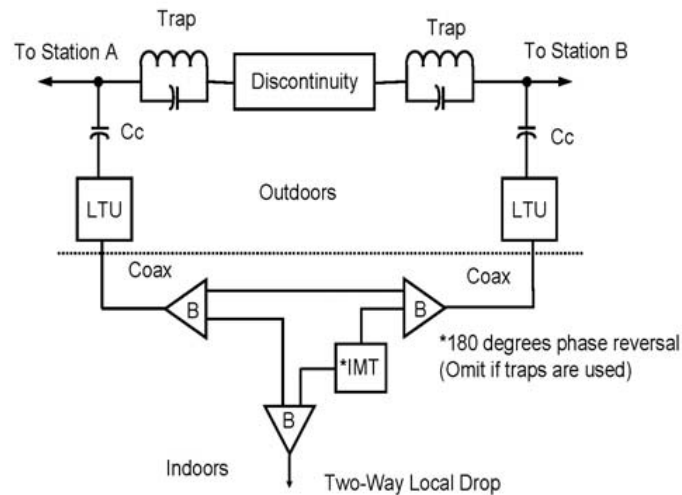
¹ Ripple

² Profiling the line

است، اما در خط‌های بلند، که تلفات زیادی دارند، این نکته باید موشکافانه بررسی شود و در صورتی که میزان تلفات از مقدار مجاز بیشتر شد، تنها راه، برداشتن سیم‌پیچ درین میزان‌گر است.

۳-۳-۲- میان‌برها

میانبرها آمیزه‌ای از میزان‌گر(های) خط، خازن(های) جفت‌کننده، تله موج(ها) و احتمالاً دستگاه‌های کمکی است؛ که سیگنال PLC را در گسستگی‌های خط انتقال (مانند ترانسفورمرها و کلیدها) از درون خود گذر می‌دهند. میانبرها را می‌توان گونه‌ای تکرارکننده‌ی نافع^۱ در نظر گرفت؛ که در جهت‌های گوناگون، ممکن است ویژگی‌های انتقالی گوناگون از خود نشان می‌دهند. میانبرها بر دو گونه‌ی کوتاه و بلند هستند. در زیر نمای نمونه‌ای از یک میانبر کدام آمده است.



شکل ۲۴- نمای مداری میان‌بر بلند با سر محلی دوسویه

۳-۴- کابل‌های کواکسیال و Lead-in

کابل‌های کواکسیال و lead-in^۲ یکی از ضروری‌ترین بخش‌های جفت‌کننده و میزان‌گر کانال PLC است. سه گونه رسانا برای این منظور به کار می‌رود: کابل‌های کواکسیال^۳ و تراکسیال^۴ و سیم lead-in تک‌رسانای عایق‌شده^۵.

^۱ Passive Repeater

^۲ این کابل‌ها مانند کابل‌های اتصال‌دهنده‌ی بین آنتن و گیرنده هستند.

^۳ Coaxial

^۴ Triaxial

^۵ Insulated Single-Conductor Lead-In

۳-۴-۱- کابل‌های کوآکسیال

بیشتر این گونه کابل‌ها برای ارتباط کم‌امپدانس بین میزان‌گر و فرستنده/گیرنده و یا بین میزان‌گرها در میان‌بر بلند به کار می‌روند. ارتباط بین دستگاه‌های میزان‌گر جانبی نیز با این کابل‌ها برقرار می‌شود. در این کابل‌ها مس بافته که یک سپر^۱ RF و رسانای بیرونی است، تنها باید در سر فرستنده/گیرنده و یا تنها یک سوی میان‌بر زمین شود. زمین کردن آن در هر دو سو، به جریان خروش (surge) هنگام خطا، که شرایط افزایش پتانسیل زمین برقرار است، اجازه گذر می‌دهد و می‌تواند سبب اشباع ترانسفورمرهای تطبیق امپدانس^۲ (IMT) و ناکارایی کانال PLC (هنگام خطا) شود.

یک گونه‌ی رایج این کابل‌ها RG-8/U است؛ که قطر ۱/۰۲۹ cm دارد. رسانای مرکزی دارای ۷ رشته سیم مس شماره‌ی ۲۱ است؛ که یک رسانای AWG #12 را تشکیل می‌دهند. رسانای بیرونی نیز از رشته‌های مس بافته AWG #36 تشکیل شده است. امپدانس ویژه‌ی این کابل ۵۲ اهم است. داده‌های تضعیف بر حسب فرکانس این کابل در ۱۰۰ متر در جدول زیر آمده است.

فرکانس (kHz)	۳۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰
تلفات (dB/۱۰۰m)	۰/۱۲۵	۰/۱۴۴	۰/۱۸۰	۰/۲۱۶	۰/۲۵۳	۰/۲۹۵

PVC^۳ رایج‌ترین پوشش برای این کابل‌ها است. گرچه این ماده مقاومت شیمیایی و سایشی خوبی دارد، ولی، رطوبت‌پذیری آن بالا است. آمیزه‌هایی مانند^۴PE سیاه،^۵XLPE و^۶CPE رطوبت‌پذیری کمتری دارند.

۳-۴-۲- کابل‌های تراکسیال

برای خط‌های با ولتاژ بالاتر از ۲۳۰ کیلو ولت، برای حفاظت بیشتر، می‌توان از یک کابل تراکسیال برای وصل میزان‌گر به فرستنده/گیرنده‌ی PLC استفاده کرد؛ چراکه در سطوح ولتاژ بالاتر، به سبب جریان‌های خطای بیشتر، پتانسیل زمین هنگام خطا بسیار افزایش می‌یابد. این کابل‌ها دارای دو سیم سپر (shield) هستند؛ که از یکدیگر عایق شده‌اند. سپر درونی تنها در سر

^۱ Shield

^۲ Impedance Matching Transformer

^۳ Polyvinyl Chloride

^۴ Polyethylene

^۵ Cross-linked Polyethylene

^۶ Chlorinated Polyethylene

دستگاه PLC و سپر بیرونی در هر دو سر زمین می‌شوند. سپر بیرونی باید توانایی انتقال جریان‌های خروجی بسیار بزرگ را داشته باشد. این آرایش، سپر بسیار کارایی در برابر هر دو القای الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی فراهم می‌کند؛ به گونه‌ای که خروجی‌های القاشده در رسانای اصلی (مرکزی) بسیار ناچیز است. برای بهترین محافظت، می‌توان یک رسانای سنگین زمین را، که متناوباً به شبکه‌ی زمین پست وصل شده است، موازی کابل تراکسیال قرار داد؛ تا با کاهش امپدانس موازی کابل به زمین، بسیاری از خروجی‌های جریان در سپر بیرونی را به آسانی به زمین منتقل کند. در ساخت یک کابل تراکسیال بر کابل کوآکسیال (رسانای مرکزی، عایق، سپر بافته)، یک لایه عایق اعمال شده و بر روی آن دومین بافت (سپر بیرونی) جای گرفت و بر آن نیز پوشش بیرونی قرار می‌گیرد. PVC پوشش رایج این کابل‌ها است؛ که می‌تواند گرفتاری جذب نم و نایکنواختی عایق را داشته باشد. نازکی عایق سبب مشکل «skips» یا «تعطیلات (holidays)» می‌شود؛ یعنی، سپر بیرونی، درونی را زمین می‌کند و برای حامل مشکل ایجاد می‌کند. یک کابل تراکسیال نیرومند ویژه برای کلیدخانه‌هایی با فشار ۵۰۰ کیلو ولت ساخته شده است؛ که هسته‌ی آن یک کوآکسیال RG-213 به همراه ۲/۵۴ mm (۱۰۰ mil) پوشش PE است و بر روی آن‌ها یک نوار آلومینیومی ۸ mil بسپاراندود^۲ را آچار کرده و به درازی آن سوار می‌کنند و بر روی کل مجموعه نیز پوشش CPE جای می‌دهند. گرمای پردازش پوشش نهایی، سبب گدازش PE روی نوار آلومینیومی و ساخت غلافی بی‌رخنه در برابر آب و گاز می‌شود.

۳-۴-۳- سیم Lead-in تک‌رسانای عایق شده

این گونه سیم خازن جفت‌کننده را به میزان‌گر خط وصل می‌کند. رساناهای لخت و یا کابل‌های کوآکسیال نباید برای این کار استفاده شود. چراکه می‌تواند سبب ایجاد جریان ناشی زیادی به زمین (با خازن) و ایجاد ظرفیت خازنی زیادی با میزان‌گر شود. پیوند بین میزان‌گر و خازن جفت‌گر یک نقطه‌ی امپدانس بالا، در مدار سری‌میزان‌شده، است. (این امپدانس به وسیله‌ی القاگر میزان^۳ و خازن جفت‌کننده ایجاد شده است.) این نقطه‌ی امپدانس بالا به همراه خازن‌های پراکندگی^۴ و ناشی زمین، تلفات میزان‌گر را افزوده و پهنای باند را متأثر می‌کند. بنابراین کابل با نامی HV بالا و اندازه‌ی کافی، که تا حدی خمش‌ناپذیر باشد، پیشنهاد می‌شود. دو کابل با ویژگی‌های بالا چنین هستند: کابل نخست، یک کابل قدرت تک‌رسانا، با قطر ۱۵/۵ mm، AWG #8، رسانای مس ۷ رشته، بی‌سپر و ولتاژ نامی ۵ kV، برای کار در ۹۰ °C

¹ Switchyard

² Polymer-coated

³ Tuning Inductor

⁴ Stray Capacitance

خشک یا تر، با عایق EPR¹ یا XLPE و پوشش PVC است. کابل دوم، یک کابل روشنائی فرودگاه با قطر 9/91 mm، AWG #8، رسانای مس ۷ رشته، بی سپر و ولتاژ نامی ۵ kV، برای کار در ۹۰ °C خشک یا تر، با عایق و پوشش آمیخته‌ی XLPE است.

برای کاهش خازن‌های پراکندگی و جریان‌های نشتی می‌توان از یکی از دو روش زیر بهره

برد:

أ) کابل تکرسانا باید تا حد ممکن، به صورت مستقیم بین دو پایانه‌اش قرار گیرد. عایق رسانا، برای حفظ نشتی کم، نباید بشکند و باید با مقره نگه‌داشته‌شده و با مقره‌های استوانه‌ای (bushing) به خازن‌های جفت‌کننده و میزان‌گرهای خط وصل شود. همچنین با حلقه‌های آب‌چکان^۲ از ورود آب به محفظه‌ی خازن و میزان‌گر جلوگیری شود.

ب) کابل می‌تواند در درون مجرایی از PVC یا پلاستیک‌های دیگر جای گیرد. خود این مجرا نیز باید با (عایق) سیم‌نگه‌دار (stand-off) یا مقره محکم شود. اگر بخش درازی از رسانا بیرون از مجرا باشد، باید، مانند بخش آ، با مقره محکم شده و با bushing وارد دستگاه‌ها شود.

۳-۴-۴- نیازمندی‌های عایق

رسانای بخش پیش، برای دمای نامی ۹۰ °C کار پیوسته و ۱۳۰ °C اضطراری طراحی شده است. کواکسیال و تراکسیال‌هایی با عایق PE برای کار در بیشینه‌ی دمای ۸۰ °C ساخته شده‌اند. برای دماهای بالاتر باید از کابل‌های ویژه با عایقی با دمای بالاتر، مانند silicone rubber و یا polytetrafluoroethylene به همراه پوششی مانند فایبرگلاس، استفاده کرد؛ اما، بهای این گونه کابل‌ها بسیار زیاد است.

۳-۵- دستگاه‌های جفت‌کننده‌ی کمکی

در بسیاری از کاربردهای PLC نیازمند موازی‌سازی دستگاه‌های حامل هستیم. با گسترش روزافزون بهره‌گیری از روش‌های جفت‌کنندگی پهن‌باند، همه‌ی دستگاه‌های حاملی که به یک خط انتقال وصل می‌شوند، می‌توانند از یک کابل کواکسیال بهره بگیرند.

¹ Ethylene-propylene

² Drip Loop

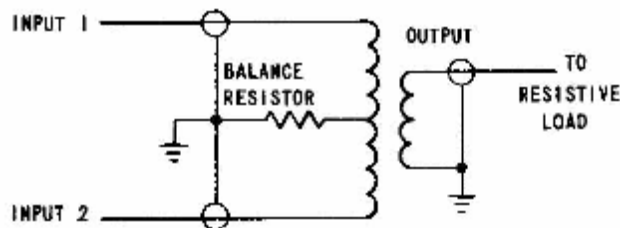


شکل ۲۵- یک فیلتر جفت کننده‌ی PLC

هنگامی که دو یا چند پایانه‌ی حامل به یک مسیر باندپهن وصل می‌شوند، گونه‌ای از دستگاه‌های جفت کننده کمکی، مانند هایبرید^۱، واحد L/C، فیلتر میان/بالا/پایین گذر برای جلوگیری از برهم کنش‌های ناخواسته زیر نیاز است:

- ا) اعوجاج‌های مدوله‌سازی سطح بالا (High-level intermodulation distortions)
- ب) اعوجاج‌های مدوله‌سازی سطح پایین (Low-level intermodulation distortions)
- ت) تلفات پل زنی (Bridging losses)
- ث) اثر گذرا (Transient influence)

در زیر یک نمای نمونه‌ای این دستگاه‌ها آمده است.



شکل ۲۶- یک هایبرید مقاومتی متعادل

۴- بررسی کانال PLC و گزینش فرکانس

۴-۱- روش‌های جفت کنندگی

به چند روش می‌توان سیگنال‌های PLC را به یک خط انتقال سه‌فاز تغذیه کرد؛ تا سیگنال‌ها در آن منتشر شوند. جریان‌های سیگنال حامل در هر سه‌فاز و همچنین سیم‌های استاتیک موجود جاری می‌شوند. بهره‌ی سیگنال‌های جفت‌شده از/به خطوط بستگی به آرایش جفت کردن سیگنال‌ها دارد. روش‌های جفت‌کنندگی مورد استفاده چنینند:

¹ Hybrid

أ) سبک (Mode) ۱ (جفت کردن سه فاز)

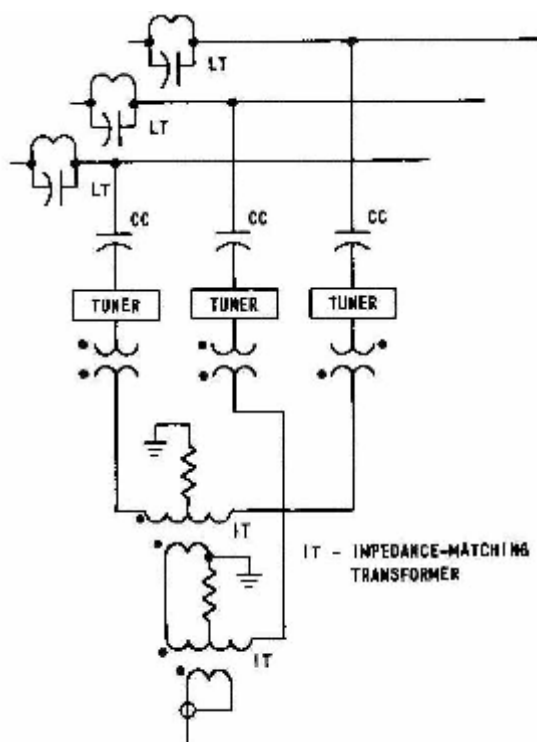
ب) فاز میانی به زمین

ج) فاز میانی به فاز بیرونی (میان فاز)

د) میان مداری

چهار روش نخست برای یک خط قدرت سه فاز و روش آخر برای جفت سیگنال به دو خط قدرت جداگانه است.

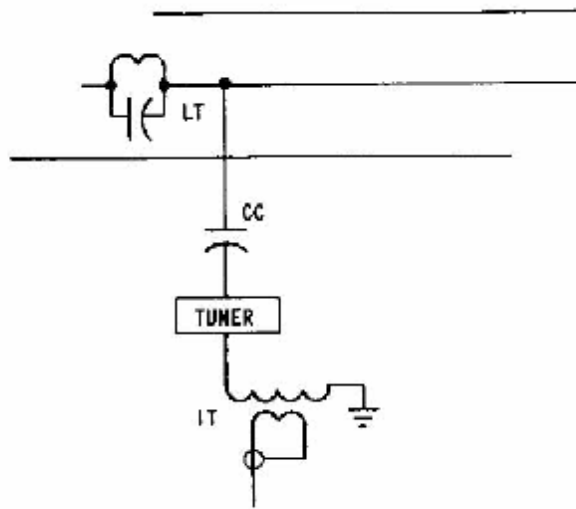
سبک ۱، به صورت نظری، کمترین تلفات را برای سیگنال حامل دارد. برتری این روش ایجاد قابلیت اطمینان بسیار بالا برای کانال است؛ چراکه در خطای یک فاز/دو فاز به زمین در نزدیک پایانه، بدون از بین رفتن سیگنال حامل می‌تواند به کار ادامه دهد. کاستی این روش هزینه‌ی بالا، به سبب نیاز به سه دستگاه میزان‌گر است. نمای یک نمونه از این آرایش در پایین نشان داده شده است. دو هایپرید RF به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که برای فاز میانی جریان با اختلاف فاز 180° نسبت به دو فاز دیگر و دامنه‌ی برابر با مجموع جریان دو فاز دیگر برقرار کند. بهره‌ی این آرایش (به روش Modal) ۱۰۰٪ (۰ dB تلف) است.



شکل ۲۷- جفت کردن سیگنال به هر سه رسانا

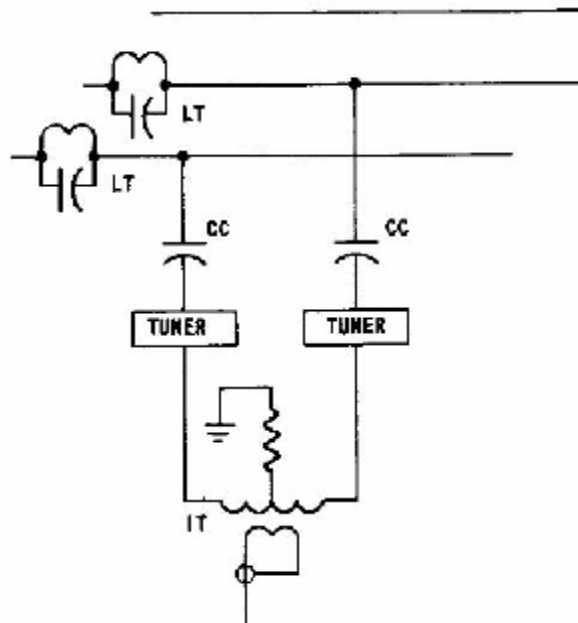
ساده‌ترین و پرکاربردترین روش، جفت فاز (میانی) به زمین است؛ که در شکل نشان داده شده است. این روش کمترین دستگاه را به کار برده و نسبتاً به صرفه است. بهره‌ی این روش (به)

روش Modal dB $-1/6$ در هر سوی خط است. گرچه اگر سیم‌های استاتیک در خط استفاده نشده باشد و یا رسانایی خاک در نزدیکی پایانه کم باشد، تلفات افزایش می‌یابد.



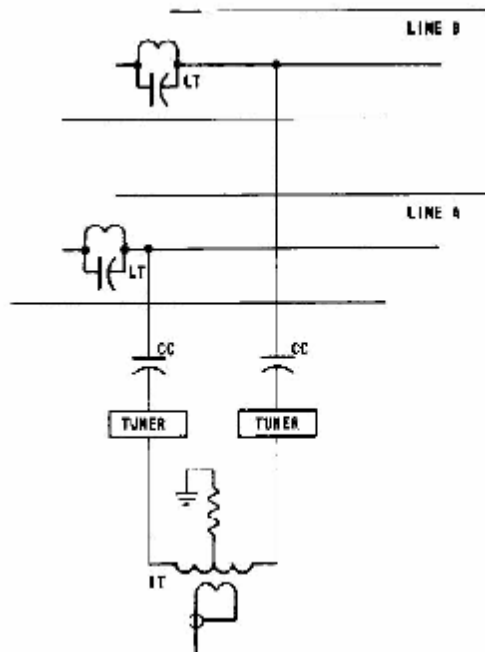
شکل ۲۸- جفت کردن فاز به زمین

جفت فاز میانی به فاز درونی (میان‌فاز)، پس از فاز میانی به زمین، پرکاربردترین روش است و رفته‌رفته رایج‌تر می‌شود. این آرایش در شکل نشان داده شده است. این روش نسبت به فاز میانی به زمین بهره‌ی بهتری دارد و با روش Modal بهره‌ی $-1/8$ dB برای هر خط آن محاسبه شده است. این روش نسبت به فاز میانی به زمین قابلیت اطمینان بالاتری دارد؛ چراکه در اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین سیگنال حامل از بین نمی‌رود. افزون بر این، تلفات آن به سبب استفاده نکردن از سیم‌های استاتیک یا رسانایی کم خاک افزایش نمی‌یابد.



شکل ۲۹- جفت فاز میانی به فاز درونی (میان‌فاز)

جفت‌کنندگی میان‌مداری در شکل نشان داده شده است. این روش بیشتر به صورت فاز میانی به فاز میانی، برای دو خط انتقال که نزدیک به هم باشند، انجام می‌شود.



شکل ۳۰- جفت میان‌مداری

۴-۲- تلفات کانال

تلفات توان یک سیگنال در یکای dB محاسبه می‌شود؛ چراکه برای تلفات کل به آسانی می‌توانیم این مقادیر را بدون توجه به تغییر امپدانس در سامانه با هم جمع کنیم:

$$LOSS = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \qquad LOSS = 20 \log \frac{V_1}{V_2} \qquad LOSS = 20 \log \frac{I_1}{I_2}$$

که P توان، V ولتاژ و I جریان و زیروندها نشان‌گر محل اندازه‌گیری هستند. روشن است که رابطه‌های دوم و سوم تنها هنگامی معتبرند که امپدانس‌ها در نقاط اندازه‌گیری برابر باشد. این فرض که یک اتصال، مانند اتصال کواکسیال 50Ω به یک دستگاه جفت‌کننده، نماینده یک مقاومت خاص است، به نتیجه نادرستی منتهی خواهد شد. بنابراین، تنها سنجش معتبر در یک سامانه از دو سوی یک بار مقاومتی با اندازه‌ی آشکار، خواهد بود؛ که تنها در خروجی بخشی از سامانه یا ورودی یک دستگاه، هنگامی که دستگاه برداشته شده و جای آن مقاومتی برابر مقاومت نامی‌اش قرار داده شده، امکان‌پذیر است.

تلفات کل PLC از تلفات سری و موازی تشکیل یافته است. تلف سری شامل عناصر جفت‌کننده، (مانند ترانس‌های تطبیق امپدانس، هابیریدهای متقارن و skewed)، مدارهای L/C

سری، (که برای جداسازی فرستنده‌ها به کار می‌رود)، صافی‌های گوناگون، میزان‌گرهای خط و خازن‌های جفت‌کننده است. مقاومت خط انتقال از دیگر تلفات سری است. تلفات خط، یعنی تلفات سری و موازی آن، معمولاً یک جا نام برده می‌شود. از دیگر تلفات سری، تلفات عدم تطبیق امپدانس نقطه‌ی پیوند خط انتقال هوایی و کابل قدرت و همچنین عدم تطبیق امپدانس بین عناصر گوناگون است.

تلفات موازی شامل، تله موج، خط تپ، میان‌بر، (که خود می‌تواند شامل میزان‌گر و دیگر عناصر جفت‌کننده باشد)، اثرات ناشی از تعداد خطوط (ی که در سویی از تله موج که شین قرار دارد، وجود دارند)، و ظرفیت خازنی شین است. کابل‌های قدرت، نسبت به دیگر عناصر دارای تلفات سری کمتری هستند؛ چراکه امپدانس مشخصه‌ی پایین‌تری دارند.

تضعیف در خطوط انتقال هوایی به مشخصه‌ی خط بستگی دارد و به هیچ عنصری خارجی وابسته نیست و تابع موارد زیر است:

فرکانس فرستنده، گونه‌ی ساختار خط، هندسه‌ی خطوط، رسانای فاز، (اندازه، جنس ماده، سطح و ... آن)، روش جفت‌کنندگی، گونه و جای ترانسپوز، شرایط آب و هوا، رسانایی زمین و نشی عایق.

تضعیف در کابل‌های قدرت از خطوط هوایی بیشتر است و ویژگی‌هایی مانند اندازه‌ی رسانا، جنس ماده و تعداد آن‌ها، عایق، قطر و ولتاژ بر آن اثر دارد. داده‌های در دسترس برای کابل‌ها بیشتر برای فرکانس قدرت هستند و در بیشتر موارد برای کاربردهای PLC باید مشخصه‌های آن را اندازه‌گیری کرد.

همچنین در گسستگی‌ها، مانند اتصال خط هوایی و کابل، ترانسفورمر و ...، اگر امپدانس تطبیق داده نشود، سبب تضعیف می‌شود.

۵- استانداردها

ANSI C63.2, American National Standard for Electromagnetic Noise and Field Strength Instrumentation, 10 Hz to 40 GHz—Specifications

ANSI C93.1, American National Standard Requirements for Power-Line Carrier Coupling Capacitors and Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVT)

ANSI C93.3, American National Standard Requirements for Power-Line Carrier Line Traps

ANSI C93.4, American National Standard Requirements for Power-Line Carrier Line—Tuning Equipment

ANSI C93.5, American National Standard Requirements for Single Function Power-Line Carrier Transmitter/Receiver Equipment

IEC 60353, Line Traps for A.C. Power Systems

IEC 60481, Coupling Devices for Power Line Carrier Systems

IEC 60495, Recommended Values for Characteristic Input and Output Quantities of Single Sideband Power-Line-Carrier Terminals

IEC 60663, Planning of (Single Sideband) Power Line Carrier Systems.

IEEE Std C37.90.1™, IEEE Standard for Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Protective Relays and Relay Systems.

IEEE Std C37.90.2™, IEEE Standard for Withstand Capability of Relay Systems to Radiated Electromagnetic Interference From Transmitters.

IEEE Std C37.90.3™, IEEE Standard Electrostatic Discharge Tests for Protective Relays

۶- مرجع‌ها

1. Anon., IEEE Guide for Power-Line Carrier Applications, IEEE Std 643-2004 (Revision of IEEE Std 643-1980), vol., no., pp.0_1-134, 2005, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1490126&isnumber=32028>
2. Anon., Line Traps, AREVA, http://www.areva-td.com/solutions/liblocal/docs/Products/1061556877786-LineTraps_English.pdf

پایان

اشکان نیوشا

<http://AshkanN.tripod.com>

هومان هوشمندان