چهارمین کنفرانس
شبکه‌های توزیع نیرو

روشی برای مکان‌یابی عیب کابل

مهندس محمد علی نوشاد
دانشکده صنعت الکترونیک دانشگاه شیراز

چکیده مقاله :

افزایش استفاده ازکابل زیرزمینی برای توزیع نیرو ، روش دقیق ،سریع وارزانی را برای موضع یابی عیب کابل ایجاب می کند .این مقاله یک موضع عیب یاب را بر اساس انعکاس پالس درخطوط انتقال بررسی خواهد کرد .

سیستم مورد نظر متشکل ازپالس ولتاژ بالا،مولد قابل تنظیم موج خطی ومولد پالس با مدوله کننده شدت نور می باشد .دستگاه جنبی بکاررفته دراین روش اسیلوسکوپ خواهد بود .پالسر ولتاژ بالا پالسهای منفی بادامنه حدود ۱۰۰۰ ولت تولید می کند .مولد موج خطی طوری تنظیم می شود که بتواند پهنای ۲۰ ، ۵۰، ۱۰۰و ۴۰۰ میکروثانیه داشته باشد .مولدپالس بامدوله کننده دومشخصه بارز دارد :

- ایجاد اطمینان ازاینکه تصویری که روی صفحه اسیلوسکوپ ظاهر می شود تنها برای محدوده زمانی انتخاب شده قابل رویت است .
- این مداریک نقطه نورانی روی صفحه اسیلوسکوپ تولید میکندکه موقعیت آن روی محور زمان توسط یک پتانسیومتر قابل تنظیم است .خطای موضع یابی عیب حداکثر ۱٪ ± خواهد بود .

شرح مقاله :

اصل انعکاس پالس درخطوط انتقال ، برای تشخیص محل معیوب کابلهای زیر زمینی ازسال ۱۹۶۸ مورد استفاده قرارگرفته است .مزایای این روش ،ازجمله سهولت در اندازه گیری وتوانائی آن برای تشخیص طبیعت عیب،با یک دقت منطقی ، باعث عمومیت پیدا کردن این روش شده است .

این مقاله مشخصات بارز دستگاهی ازاین نوع را که طراحی ومورد آزمایش قرار گرفته است شرح خواهد داد .اصل کار دستگاه دربخش بعدی بطور خلاصه شرح داده شده وچندین طرح برای اندازه گیری فاصله زمانی دربخش ۳ ارائه شده است. بخش ۴ طرح کلی سیستم را ،شامل سیگنال جاروکننده (Sweep Signal)،پالس ولتاژ بالا وسیگنال مدوله شده با شدت نور (intensity modulation signal)مورد بررسی قرارخواهد داد .توانائیها ومحدودیتهای دستگاه وچند نتیجه با بکار بردن اسیلوسکوپی که می تواند سه ورودی X ، Y و Z را پذیرا باشد ،دربخش ۵ عرضه خواهد شد .

۲ـ اصول کار :

دریک خط انتقال ویا کابل انتقال،اگر یک ورودی تک پله ای با دامنه E اعمال شود ،موج رفت با یک تاخیر زمانی باندازه τ ثانیه ،که درزیر مشخص شده ، به انتهای کابل خواهد رسید :

$$\tau = \frac{\text{مسافت}}{\text{سرعت}} = \frac{d\sqrt{\epsilon_r}}{C}$$

که در آن :

d = طول خط بر حسب متر
c = سرعت نور بر حسب متر بر ثانیه
ϵ_r = ثابت دی الکتریک بکاررفته درکابل

اگر درانتهای خط ، امپدانس بار با امپدانس مشخصه خط مساوی نباشد ، موج بسطرف ابتدای خط منعکس می شود وضریب انعکاس (Reflection coefficient) درزیر مشخص شده است :

$$\rho_1 = (Z1 - Zo)/(Z1 + Zo)$$

که در آن :

Z1 = امپدانس بار
Zo = امپدانس مشخصه خط

این موج منعکس شده درلحظه $t=2\tau$ به ابتدای خط خواهد رسید .اگر امپدانس منبع مساوی با Zo باشد ، دراین لحظه انعکاس بیشتری درابتدای سیستم اتفاق نمیافتد بنابراین برای یک پالس ورودی مستطیل ،با پریودی بیش از 2τ میتوانیم اشکال پایداری از پالسهای برخورد کننده ومنعکس شده روی صفحه اسیلوسکوپی که به ابتدای خط متصل شده است مشاهده کنیم .

برای کابلی با امپدانس درحال تغییر (بعلت اتصالات ویا عیوب)،درطول مسیرش انعکاساتی به تناسب وجود خواهد داشت .فاصله زمانی بین اینها متناسب بافواصل آنها است ، درصورتیکه دامنه ها وفازهای آنها سطوح امپدانس را نسبت به امپدانس مشخصه نشان خواهد داد . چون ضریب انعکاس مقداری بین ۱ـ تا ۱ + خواهد داشت ، پالس منعکس شده ، ممکن است هم فاز ویا غیر هم فاز با پالس اولیه باشد درحالیکه دامنه آن متناسب با اندازه ضریب انعکاس خواهد بود .بنابراین عیب کابل بر اساس اینکه امپدانسی بیشتر ویا کمتر از امپدانس مشخصه کابل داردمی تواند مشخص شود که این نیز بستگی به این موضوع داردکه پالس منعکس شده هم فاز با پالس ورودی است یا خیر . فاصله قسمت معیوب را میتوان با استفاده از سرعت پالس وفاصله زمانی بین دو پالس محاسبه کرد .

۳ـ طرح اندازه گیری زمان :

روشهای متنوعی برای تولید پالس واندازه گیری فاصله زمانی وجود دارد .زمانی که پالس تولید شد ، موضوع بااهمیت بعدی ،اندازه گیری فاصله زمانی پالس است .قبل از اینکه شمای دستگاهی که امروزه مورد استفاده قرارمی گیرد ارائه شود ، دو روش معمول برای اندازه گیری درزیر شرح داده خواهد شد :

۳-۱- اندازه گیری فاصله زمانی بکمک سویپ داخلی اسیلوسکوپ : ساده ترین راه برای اندازه گیری فاصله زمانی بین پالس اعمال شده و پالس منعکس شده مشاهده همزمان آنها روی صفحه اسیلوسکوپ با استفاده از سویپ داخلی آن می باشد .در این روش ،هردو عامل دقت ومیزان تفکیک اندازه گیری بستگی به دقت چشم در اندازه گیری زمان تاخیر روی صفحه اسیلوسکوپ خواهد داشت.

۳-۲- اندازه گیری با استفاده از علائم نشان دهنده (Marker pips) : در این روش بهمراه با تصویر پالسهای اعمال شده ، علائم نشان دهنده زمانی درفواصل زمانی مشخص زمانی نیز روی صفحه اسیلوسکوپ ظاهرمی شود . بنابراین با شمردن تعداد علائم بین دو پالس ، فاصله زمانی را می توان محاسبه کرد .

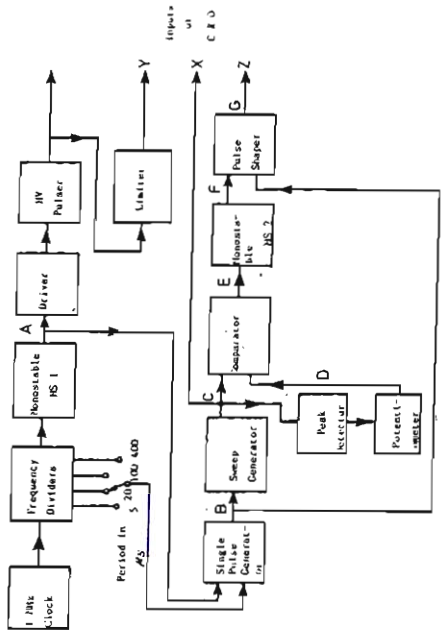
از نقطه نظر تئوری این یک روش دقیقی است ولی به هرحال دقت اندازه گیری بستگی به دقت پریود علائم دارد . عامل آخری دقت اندازه گیری نهائی را محدود می کند .برای مثال اگر فاصله زمانی ۰/۵ میکرو ثانیه انتخاب شود (در کابلهای قدرت ،این زمان مربوط به یک طول ۴۰ متری است)،پریود علائم حداکثر ۰/۵ میکرو ثانیه می تواند باشد .بنابراین این موضوع باعث می شود که احتیاج به تولید علائم فرکانس بالا داشته باشیم .همچنین بایستی اسیلوسکوپ دو کاناله با پهنای باند کافی باشد که از همزمانی (Synchronization) بین علائم وپالسهای ولتاژ بالا اجتناب گردد .

۳-۳- اندازه گیری زمان بروش مدولاسیون شدت (Intensity Modulation) : روش بهبود یافته ای نسبت به روش فوق با استفاده از مدولاسیون شدت تصویر ظاهر شده روی صفحه اسیلوسکوپ وجود دارد . در روش مدولاسیون شدت تنها قسمت دلخواه سیگنال روی صفحه اسیلوسکوپ ظاهر می شود که نقطه ای نورانی نیز روی آن وجود دارد .اگر نقطه نورانی بتواند بصورت پیوسته از ابتدای پالس اعمال شده تا انتهای تصویر ظاهر شده روی صفحه حرکت کند ، می توان این حرکت را بر حسب واحد زمان مدرج کرد . توضیح دستگاهی که با این روش اندازه گیری زمان کار می کند دربخش بعدی ارائه شده است .

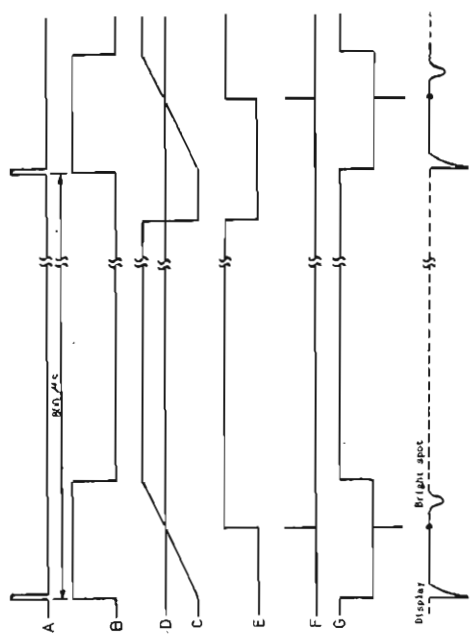
۴- طرح کلی سیستم :

چون درحالتی که از روش مدولاسیون شدت برای اندازه گیری زمان استفاده می شود ،تصویر بایستی برای قسمت مشخصی از زمان قابل رویت باشد ،سویپ با پهنای مساوی با محدوده زمانی ، مورد نیاز است . شروع سویپ بایستی با شروع پالس رفت همزمان گردد . برای اجتناب از تشکیل تصویر در خارج از محدوده زمانی انتخاب شده ، یک سیگنال محو کننده (blanking signal) با پلاریته مناسب بایستی در دسترس باشد .این سیگنال محو کننده همچنین بایستی در تامین روشنائی یک نقطه نسبتا روشن ، که درطول محور زمان قابل حرکت است ، شرکت نماید (درمحدوده انتخاب شده).

بر اساس احتیاجات فوق ، دیاگرام بلوکی دستگاه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است . شکل موجهای مربوط به این دیاگرام در شکل ۲ نشان داده شده است .



شکل ۱ : دیاگرام بلوکی دستگاه کامل

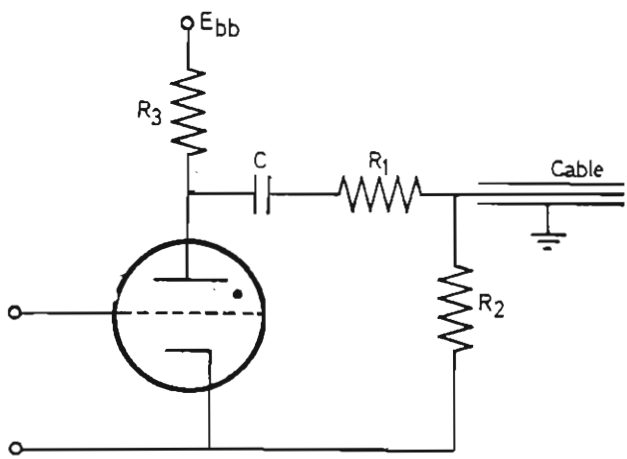


شکل ۲ : شکل موجهای مربوط به دیاگرام بلوکی شکل ۱

۱-۴- مولد موج جارو کننده (Sweep generator) :این مولد ولتاژ های جارو کننده با پهنای ۵ ، ۲۰ ، ۱۰۰ و ۴۰۰ میکرو ثانیه بتناسب دامنه انتخاب شده تولید می کند .ماکزیمم محدوده (۴۰۰ میکروثانیه)بترتیبی انتخاب می شود که ماکزیمم فاصله عیبی که می تواند اندازه گیری شود، برای کابلی که کاغذی با " 3.6 = ε " بعنوان دی الکتریک داشته باشد، تقریبا " ۳۰ کیلومتر باشد .

سیگنال تحریک کننده سویپ از یک ساعت کریستالی،پس از تقسیم فرکانس مناسب برای محدوده های مختلف ، تامین می شود .ازپالسهای مربعی پیوسته با پریودمساوی زمان دامنه انتخاب شده ،تک پالسی همزمان با خروجی مونو استابل ۱ و پریود تثبیت شده در مقدار ۸۰۰ میکرو ثانیه از مولدتک پالس تولید می شود . پهنای این پالس توسط پوتنیج انتخاب کننده محدوده زمان تغییر می کند .این پالس برای کنترل عمل شارژینگ خازن مدار مولد سویپ بکار برده می شود .این سیگنال جارو کننده به ورودی افقی اسیلوسکوپ داده میشود .

۲-۴- مولد پالس ولتاژ بالا (High Voltage Pulser) : پالس ولتاژ بالا (تقریبا) توسط یک تیراترون (Thyratron) تولید میشود . سیگنال آتش این مدار، خروجی تقویت شده مدار مونو استابل ۱ است (M S 1). بنابراین پریود پالس ولتاژ بالا درمقدار ۸۰۰ میکرو ثانیه تثبیت میشود .این پالس مستقیما " به کابل معیوب اعمال شده وتوسط یک مدار محدود کننده بد ورودی قائم اسیلوسکوپ داده میشود .مدار پالس درشکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ : مدار پالس ولتاژ بالا

در غیاب سیگنال تحریک کننده ، لامپ خاموش بوده وخازن تقریبا " باندازه ولتاژ منبع شارژ میشود .وقتی سیگنال تحریک کننده اعمال میشود ، لامپ هدایت خود را شروع کرده وخازن شروع به دشارژ شدن میکند .به مجردیکه ولتاژ آند لامپ به پایین تر از ولتاژ نگهداری (Holding) افت پیدا کند،هدایت لامپ متوقف میشود . لذا درخروجی مدار یک پالس منفی با دامنه ای تقریبا " مساوی با ولتاژ منبع بوجود می آید .چون این پالس فقط درمدتی که لامپ هدایت میکند وجود دارد ،امپدانس منبعی که در آن زمان بوسیله کابل دیده میشود کم وقابل اغماض است .ولی وقتی که پالس منعکس شده پس از زمان 2τ به ترمینال ورودی کابل می رسد ، لامپ خاموش بوده ومقاومتی که لامپ می بیند برابر با R2 است .لذا اگر R2 با امپدانس مشخصه کابل تطبیق داشته باشد ، پالس منعکس شده در ترمینال ورودی جذب شده واز انعکاسهای چند گانه اجتناب می شود .

۴-۳- سیگنال مدوله کننده شدت (Intensity Modoulating Signal):این سیگنال از بلاکهای آشکارسازماکزیمم (Peak Detector) پتانسیومتر ، مقایسه کننده ،مولتی ویبراتور مونواستابل وشکل دهنده پالس (Pulse shaper)،تامین میشود .پالس تحریک کننده برای مولد سیگنال جارو کننده (Sweep generator) میتواند برای ازبین بردن (blanking)جزئی ازتصویرکه خارج ازمحدوده سویپ است بکارورود .برای بدست آوردن نقطه روشن روی تصویرمحوشده (unblanked)یک پالس باریک به پالس ازبین برنده اضافه میشود .این پالس پس از طی مراحل زیر تولید میشود :

- مقدار ماکزیمم ولتاژ جاروکننده توسط یک مدار آشکارسازماکزیمم (peek -hold circuit)،حس شده ونگهداشته میشود .
- ولتاژ جارو کننده بایک ولتاژمرجع که توسط جزئی از این مقدارماکزیمم تا "امین میشود ، مقایسه میشود .
- خروجی مدارمقایسه کننده (Comparator) ، که وقتی که سیگنال جارو کننده ازسطح ولتاژمرجع عبورکندتغییرحالت میدهد ،مدارمونواستابل۲ (M S 2)(درشکل ۱) را تحریک (Trigger) میکند .
- خروجی مدار مونواستابل ۲ (M S 2)با پالس ازمحوکننده درقسمت مدارشکل دهنده پالس (pulse shaper) ترکیب شده وپالس مدوله کننده شدت نمایش را بوجود میاورد .

لذا توسط تغییرات پیوسته ولتاژ مرجع مدارمقایسه کننده ،توسط یک پتانسیومترتنظیم شده ،نقطه ای که پالس خروجی مونواستابل ۲ (M S 2)اتفاق میافتد میتواندرعرض سویپ حرکت کند .این پالس مدوله کننده شدت به ورودی z اسیلوسکوپ داده شده که تصویردلخواه بانقطه روشن قابل حرکت بوجودخواهد آورد .

۵ - آزمایش مدار :

۱-۵ - روش آزمایش : با استفاده ازمقدارثابت دی الکتریک ماده عایق بکاررفته در کابل معیوب ، سرعت پالس تعیین میشود . اگراین عمل امکان پذیرنیست ، سرعت میتواندبااستفاده فاصله معین ترمینال دیگرمشخص شود .برای دریافت انعکاسات ،ترمینالهای X و Z مدارب ترمینالهای مربوطه روی اسیلوسکوپ وصل میشودکه تصویر Y-X مربوطه روی صفحه ظاهرشود .برای چک کردن حرکت نقطه نورانی ،سیگنال جاروکننده (X)باظهورپهنای زمانی روی صفحه ظاهرمیکنیم . کنترل شدت نوراسیلوسکوپ باندازه ای تنظیم میشودکه نقطه نورانی ازبقیه قسمت سیگنال قابل تشخیص باشد .

ترمینالهای کابل (یک فاز و زمین و یا دو فاز) به ترمینالهای خروجی و زمین مدار اتصال پیدا کرده و ورودی قائم اسیلوسکوپ به ترمینال "۳" مدار وصل میشود. رنج زمان اسیلوسکوپ به ماکزیمم مقدار خود منتقل میشود. اگر در تصویر ظاهر شده روی صفحه اسیلوسکوپ، پالسهای انعکاس یافته چندی وجود دارد، که به تدریج دامنه آنها کم میشود، بدلیل انعکاس چندگانه است که میتوان آنها را توسط کنترل پتانسیومتر تطبیق از بین برد. (این پتانسیومتر میتواند در مدار شکل ۳ بصورت سری با R2 بکار رود).

محور تنظیم چرخانده میشود که نقطه روشن روی صفحه اسیلوسکوپ به لبه پیشرو (Leading edge) پالس منعکسه مورد نظر منتقل شود. وقتی که سلکتور اسیلوسکوپ بدرستی تنظیم شود، فاصله زمانی بین پالس اعمال شده و پالس منعکسه انتخاب شده را بصورت قسمتی از محدوده زمان انتخاب شده نشان می دهد. از آنجا که آخرین پالس منعکس شده روی تصویر مربوط به دورترین ترمینال کابل است، با استفاده از مقدار طول کابل و فاصله زمانی بین پالس اعمال شده و آخرین پالس منعکس شده، سرعت انتشار پالس مشخص میشود. با استفاده از این مطلب می توان فاصله بین ترمینال ورودی تا نقاطی که باعث انعکاس شده است را مشخص کرد.

۲ـ ۵ ـ نتایج آزمایش: با استفاده از این دستگاه ساخته شده، نتایج جدول (۱) از چند کابل معیوب بدست آمده است. در تمام این کابلها، کاغذ بعنوان دی الکتریک استفاده شده و ثابت دی الکتریک برابر با ۳/۵ در نظر گرفته شده است.

ردیف	ولتاژ اسمی	مقدار امپدانس عیب در مقایسه با R_0	فاصله مشخص شده بوسیله دستگاه	فاصله عملی پس از حفاری	نوع عیب
۱	۴۱۵ ولت	کم	۳۵ متر	۴۰ متر	اتصال کوتاه تمام فازها
۲	۱۱ کیلوولت	کم در فاز آبی و زمین	۸۳۰ متر	۸۲۰ متر	اتصال کوتاه فاز آبی با زمین
۳	۴۱۵ ولت	زیاد	۲۹۰ متر	۳۰۰ متر	پاره شدن هسته کابل

جدول (۱) - نتایج آزمایشات

اختلاف کم فاصله عملی وفاصله ای که دستگاه مشخص کرده است ، احتمالا" بعلت این حقیقت است که سرعت پالس محاسبه شده با استفاده از ثابت دی الکتریک بوده است ، که مقدار آن دقیق نبوده است . منبع دیگر خطا احتمالا" این بوده است که طول کامل کابلها بطور دقیق مشخص نشده بود ولذا محاسبه سرعت پالس بدقت انجام نگرفته است .

دقت اندازه گیری با این دستگاه را می توان با عکسبرداری فوری از صفحه اسیلوسکوپ زمانی که کابلی سالم مورد آزمایش قرار میگیرد وانعکاس از جعبه های تقسیم مورد مطالعه ، بهبود بخشید .به این ترتیب وقتی ازدستگاه برای مشخص کردن عیب کابل معیوب استفاده میشود ، تشخیص انعکاسی که در اثر عیب بوده است ، ساده است .

۳- ۵ - محدودیتها ومسائل : محدودیت اصلی این دستگاه اسیلوسکوپ است . تقویت کننده افقی اسیلوسکوپ بایستی پاسخ فرکانسی مناسب برای گرفتن سیگنال جارو کننده در پایین ترین محدوده زمانی دستگاه (درحالت ماکروشانیه) داشته باشد . تقویت کننده های Y و Z بایستی توانائی تولید مجدد سیگنالهائی با زمان صعود کمتر از ۴۰ نانو ثانیه داشته باشند لذا یک اسیلوسکوپ با پهنای باند حداقل ۲۰ مگاهرتز با ورودیهای X و Z مورد نیاز است .

مسائل دیگری که ممکن است بروز کند ، تریگر کردن غلط مدارهای فلیپ فلاپ بعلت مجاور بودن با پالسهای ولتاژ بالا وتنظیم نقطه روشن برای قرار گرفتن در کل محدوده زمانی سویپ است.

۶ - نتیجه

دقت در اندازه گیری فواصل با استفاده از این دستگاه ، بوسیله تنظیم صحیح نقطه روشن ، می تواند تا بهتر از ۱% بهبود یابد .قدرت تفکیک تقریبا" یک متر است .

ازدستگاه مشابهی می توان برای خطوط هوائی استفاده کرد ، بشرط اینکه پریود پالس ولتاژ بالا و محدوده زمانی سویپ ، بعلت وجود فواصل بیشتر بین ایستگاههای فرعی (Substations) افزایش یابد .

اندازه گیری فاصله زمانی بین پالس رفت و هر کدام از پالسهای منعکس شده میتوانند بصورت دیجیتالی ، با شمردن تعداد کلاک پالسهای بین لبه های پیشروپالس رفت وپالسهای منعکس شده صورت گیرد .انتخاب مناسب فرکانس کلاک ، امکان کالیبراسیون تصویر بصورت دیجیتالی وفواصل برحسب مترراامیسرمیسازد . این روش هم اکنون مورد استفاده است .

۷ - منابع

1- Medenhall, G.G., "Pulse Radar used to Locate Faults " . Electrical Word , Vol . 130 . PP 88- 01
2- Glasol , G.N. and Iebacqz . J.V , " Pulse Generators ",McGraw - Hill Book Co . , N.Y.
3- Gopalan ,K., " a pulse - Echo type cable Fault Locator ", Department of Electrical Engineering , Indian Institute of Technology ,Kanpur .