



هماهنگی سطوح عایقی بین برقگیر و ترانسفورماتور

جواد علمائی - منوچهر سخایی

وزارت جهاد سازندگی

چکیده:

امواج گذرا در شبکه‌های توزیع و انتقال به دلایل متعدد تولید و منتشر می‌شوند. این امواج ناخواسته نقش تخریبی در شبکه دارند. جهت جلوگیری از این گونه تخریبها از برقگیر استفاده می‌شود. گذشته از نحوه انتخاب برقگیر بررسی هماهنگی سطوح عایقی یکی از مهمترین موارد در استفاده و گزینش برقگیر است.

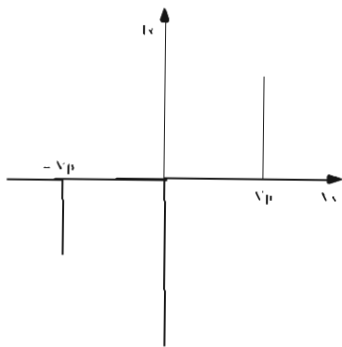
در این مقاله هماهنگی به نحوه بسیار ساده‌ای مطرح گردیده است و ضمن تعریف نقاط مهم جهت هماهنگی روش سه نقطه‌ای هماهنگی ارائه شده است. همچنین حالات خاص و مواردی نظیر اثر فاصله و اثر تعداد خطوط وارده به ترانسفورماتور و پست مورد بررسی قرار گرفته است که به شکل دستوراتی جهت ساده‌سازی عنوان شده است، و در نهایت یک روش کلی جهت ایجاد هماهنگی ارائه گردیده است.

شرح مقاله :

۱- حفاظت در برابر اضافه ولتاژ :

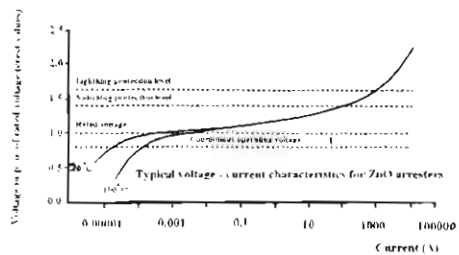
حفاظت اجزای شبکه در مقابل امواج گذرا یکی از ضروریات طراحی و بهره‌برداری از شبکه است. نقش تخریبی امواج گذرا سبب شده است که مهندسان و طراحان شبکه ضرورتاً تمهیدات خاصی جهت حفاظت اجزاء در مقابل آنها اتخاذ نمایند. حفاظت اجزاء در مقابل اضافه ولتاژهای موجی شبکه با حذف یا کاهش دامنه آنها ممکن است. حفاظت توسط برقگیر یکی از انواع حفاظت می‌باشد.

برقگیر المانی است که سبب می‌شود امواج گذرا از طریق آن به زمین منتقل شده و موجب بروز خطر نگردند. با این وجود در حالت کار عادی، برقگیر تأثیری در شبکه ندارد. بنابراین مشخصه ولت / آمپر برقگیر به صورت نظری به شکل ۱ است.



« شکل ۱: مشخصه ولت / آمپر برقگیر ایده‌آل »

Typical voltage - current characteristics for ZnO arresters



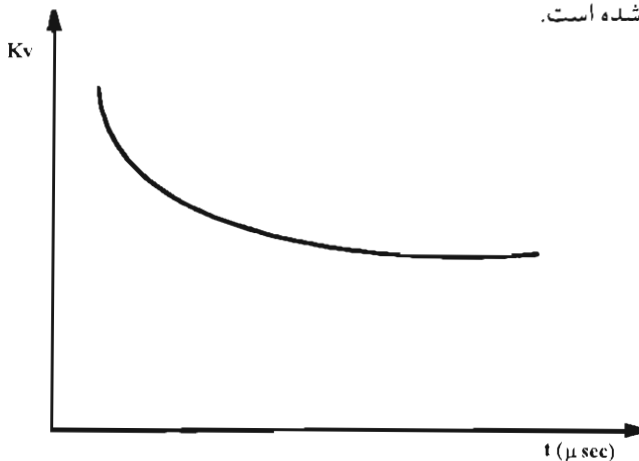
« شکل ۲: مشخصه واقعی »

عملاً ساخت چنین برقگیری ممکن نیست و کوششهای صورت گرفته منجر به ساخت برقگیر با مشخصه‌ای نظیر شکل ۲ شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود در برقگیر ایده‌آل ولتاژ دو سر برقگیر از مقدار V_p بیشتر نشده و لذا سطح حفاظتی معادل V_p ایجاد خواهد شد ولی در برقگیر واقعی با افزایش جریان تخلیه ولتاژ برقگیر افزایش می‌یابد. این بدین معناست که سطح حفاظتی ثابتی ایجاد نشده است.

حال هدف این است که با چنین برقگیری بتوان سطح حفاظتی مناسبی را ایجاد نمود. در این رابطه لازم است سطح عایقی با قدرت عایقی دستگاه مورد حفاظت را شناخت. وقوع شکست با تخلیه الکتریکی در یک عایق پدیده پیچیده‌ای است که بیان کمی برای آن

وجود ندارد. اما تجربیات مختلف نشان داده است که این پدیده علاوه بر میزان فشار الکتریکی به زمان نیز بستگی دارد. در واقع می‌توان چنین پنداشت که فشار الکتریکی اعمال شده جهت فروپاشی استقامت عایق نیازمند زمان است.

تعیین سطح عایقی دستگاهها و عایقهای الکتریکی با تعیین سطح عایقی آنها در برابر امواج و اشکال خاص که معرف رفتار عایق در برابر فشار الکتریکی است انجام می‌گیرد. نتیجه این کار رسم منحنی ولت / ثانیه عایق است. منحنی ولت / ثانیه ولتاژ وقوع شکست را به ازاء زمان پیشانی یا زمان وقوع شکست نشان می‌دهد. رسم این منحنی مستلزم جمع‌آوری اطلاعات مربوط به وقوع شکست در دستگاه مورد آزمایش است. البته هر بار وقوع شکست با انهدام دستگاه همراه خواهد بود. لذا سازندگان با استفاده از شبیه‌سازی‌ها و محاسبات مکرر خود چنین منحنی‌هایی را ترسیم نموده و ارائه می‌دهند. نمونه‌ای از منحنی ولت ثانیه در شکل ۳ رسم شده است.



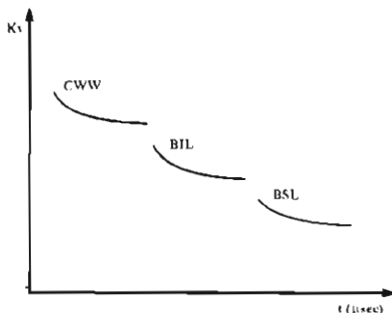
« شکل ۳: ولت / ثانیه »

۲- هماهنگی سطوح عایقی :

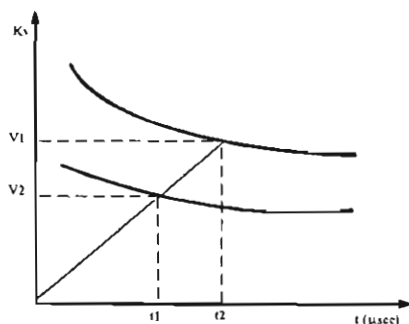
با در اختیار داشتن منحنی ولت / ثانیه المان مورد حفاظت، به سادگی می‌توان سطح حفاظتی مورد نیاز را بدست آورد. در شکل ۴ با ورود موج با پیشانی α در لحظه ۱، دستگاه دچار شکست می‌شود و برای حفاظت، لازم است وسیله حفاظتی در زمانی کوتاه‌تر مثلاً ۲ عمل نموده و دامنه موج را کاهش دهد.

اگر چه از نظر تئوری لازم است که ۲ تنها از ۱ کوچک‌تر باشد ولی در نظر گرفتن یک حاشیه امنیتی ضروری است. و از آنجا که تعیین زمانهای ۱ و ۲ مشکل است این حاشیه

برحسب ولتاژهای متناظر V_1 و V_2 ارائه می‌شود. یعنی حداقل، مقدار V_1 / V_2 بزرگتر از یک در نظر گرفته می‌شود. با ازاء هر مقدار α ، نسبت V_1 / V_2 از یک بزرگتر است. برای اینکه چنین شرطی برقرار باشد لازم نیست که تمام نقاط منحنی بررسی شود و به تجربه ثابت شده است که تنها چند نقطه از این منحنی مهم و درخور توجه هستند. این نقاط را می‌توان در شکل ۵ که تا حدود $100 \mu\text{sec}$ رسم شده است مشاهده کرد.



« شکل ۵: منحنی ولت / ثانیه کامل »



« شکل ۴: مشخصه حفاظتی برقگیر »

با دقت در این منحنی سه مقدار را می‌توان تمیز داد. این مقادیر CWW, BIL و BSL نامیده و چنین تعریف می‌شوند.

CWW: حداکثر ولتاژ قابل تحمل بفرم $(1/2)/50$ که توسط شاخک برقگیر در دستگاه قطع می‌گردد.

BIL: حداکثر ولتاژ قابل تحمل به فرم $(1/2)/50$.

BSL: حداکثر ولتاژ موج کلیدزنی (موجهای استاندارد کلیدزنی متفاوتی وجود دارد).

سازنده هر المان الکتریکی مقادیر فوق را مشخص می‌کند و حداقل لازم است که BIL دستگاه را مشخص کند. چنانچه سایر موارد ذکر نشده باشند می‌توان BSL و CWW را طبق جدول صفحه بعد تخمین زد.

تخمین مشخصه تحمل ولتاژ ضربه‌ای برای دستگاه‌های پر شده با روغن :

ولتاژ قابل تحمل	موج ضربه‌ای و زمان وقوع شکست	نوع دستگاه
$(1/5 \text{ تا } 1/3) \times BIL$	پیشانی موج $0.15 \mu\text{sec}$ (FOW)	ترانسفورماتور و راکتور
$(1/29) \times BIL$	موج قطع شده $2 \mu\text{sec}$ (CWW)	کلیدهای ۱۵/۵ کیلوولتی و بالاتر
$(1/15 \text{ تا } 1/10) \times BIL$	موج قطع شده $3 \mu\text{sec}$ (CWW)	ترانسفورماتور و راکتور
$1/15 \times BIL$	موج قطع شده $3 \mu\text{sec}$ (CWW)	کلیدهای ۱۵/۵ کیلوولتی و بالاتر
$1/10 \times BIL$	موج کامل $1/2/50$	ترانسفورماتور و سیم‌پیچ راکتور
$0.183 \times BIL$	موج کلیدزنی $250/2500$	ترانسفورماتور و سیم‌پیچ راکتور
$(0.169 - 0.163) \times BIL$	موج کلیدزنی $250/2500$	بوشینگ (مقره عبوری)
$(0.169 - 0.163) \times BIL$	موج کلیدزنی $250/2500$	کلیدهای ۳۶۲ تا ۸۰۰ کیلوولتی*

* شامل کلیدهای SF6 و Airblast

« جدول ۱: تخمین پارامترها »

به ازاء هر یک از این مقادیر، متناظری برای برآورد تعریف شده است. این مقادیر به صورت زیر تعریف می‌شوند:

FOW: ولتاژ شروع هدایت (بروز قوس) حین پیشانی موج (زمان حدود $0.5 \mu\text{sec}$)

LPL: ولتاژ هدایت حین ضربه صاعقه $50/1/2$ (زمان شروع هدایت حدود $8 \mu\text{sec}$)

SPL: ولتاژ هدایت حین ضربه کلیدزنی

ولتاژ فوق جهت ضربه‌های گوناگون تعیین می‌گردد. از جمله ضربه‌های $30/100$ ، $30/80$ و $250/2500$ و ولتاژ هدایت در فاصله زمانی 30 تا $50 \mu\text{sec}$ و یا $100 \mu\text{sec}$ جهت این مورد پذیرفته می‌شود.

در این جا لازم است تفاوت برآوردی‌های دارای فاصله هوایی و بدون فاصله هوایی تذکر داده شود. برآوردی‌های بدون فاصله هوایی که به آن MOA هم می‌گویند، دارای ولتاژ شروع هدایت هستند که این ولتاژ با توجه به جریان عبوری از برآوردی و منحنی ولت / آمپر آنها مشخص می‌شود. در حالی که برآوردی‌های دارای فاصله هوایی یا سوپایی دارای ولتاژ بروز قوس هستند. وجود فاصله هوایی در این برآوردی‌ها سبب شیب زیاد در منحنی ولت / ثانیه آنها می‌شود، حال آنکه شیب منحنی ولت / ثانیه برآوردی‌ها MOA خیلی کمتر است.

مقادیر معرفی شده برای تضمین هماهنگی سطوح حفاظتی و ایجاد حاشیه اطمینان

مناسب بکار می‌رود حاشیه اطمینان حدود ۲۰٪ میزان مناسبی برای هر یک از این سه مقدار خواهد بود گر چه برای BSL میزان ۱۵٪ هم توصیه شده که کافی است. بنابراین روابط زیر را می‌توان ارائه نمود.

$$CWW/FOW > 1/2 \quad (۱)$$

$$BIL/LpL > 1/2 \quad (۲)$$

$$BSL/SpL > 1/15 \quad (۳)$$

با در دست داشتن مشخصات دستگاه تحت حفاظت (که معمولاً ترانسفورماتور و یا رآکتور شنت است) می‌توان مشخصات‌گذاری برقی را تعیین کرد و یا برعکس مناسب بودن یک برقی را خاص را تست نمود.

روش ایجاد هماهنگی که در بالا اشاره شده، حالت ساده و خاصی از شبکه‌های واقعی است. در این حالت یک دستگاه تحت حفاظت در انتهای یک خط قرار دارد و برقی در فاصله‌ای قابل اغماض از دستگاه نصب شده است. اما در حالت کلی برقی با دستگاه فاصله دارد و یا خطوط متعدد به یک پست وارد می‌شوند. این حالتها به صورت ساده در این قسمت بحث می‌شوند.

۳- اثر فاصله :

در فاصله بین برقی و سایر تجهیزات نوساناتی بوجود می‌آید که به افزایش ولتاژ خط نسبت به ولتاژ برقی منجر خواهد شد. علاوه بر این افت ولتاژ اندوکتیو روی سیم ارتباطی برقی هم مزید بر علت است. افزایش ولتاژ باعث خواهد شد تا حاشیه اطمینان موجود که برای حفاظت در نظر گرفته شده محدود شود و یا بطور کلی از بین برود.

افزایش ولتاژ را می‌توان توسط رابطه ساده زیر تخمین زد.

$$U_1 = U_{ns} + 2dc / dt.\tau = U_{ns} + 2 dc / dt. (D/C) \quad (۴)$$

این رابطه با فرضیاتی چند از تحلیل مدار بدست می‌آید که از استدلال آن صرف نظر می‌شود. مقادیر این رابطه به صورت زیر هستند:

U_1 : ولتاژی که به ترمینال ترانسفورماتور می‌رسد.

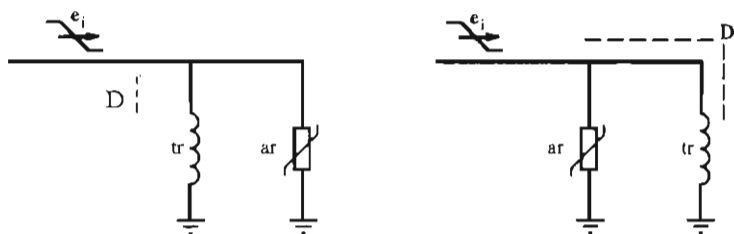
U_{ns} : ولتاژ ترمینال برقی یا سطح حفاظتی برقی که افت ولتاژ اندوکتیو نیز در آن در نظر گرفته شده است.

$S = dc / dt$: پیشانی موج ورودی برحسب KV/ μ sec

$\tau = D/C$: زمان رسیدن موج از برقی به ترانسفورماتور که می‌توان آنرا برحسب مقادیر

آشناتر C,D (فاصله و سرعت) نشان داد.

شکل ۶ در صفحه زیر به درک بهتر این موضوع کمک می‌کند. لازم به ذکر است که ترتیب برخورد موج و یا قرار گرفتن دستگاه و برقیگر اهمیتی ندارد.



« شکل ۶: ترتیب برخورد موج »

اگر مقدار رابطه (۴) محاسبه شود روابط ۱-۳ به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

$$\frac{CWW}{FOW + \Delta U_f} > 1.2 \quad (5)$$

$$\frac{BIL}{LpL + \Delta U_L} > 1.2 \quad (6)$$

$$\frac{BSL}{SpL + \Delta U_s} > 1.15 \quad (7)$$

که در آن ΔU اضافه ولتاژ ناشی از فاصله و افت اندوکتیو است. پیشانی موج، صاعقه و کلیدزنی مقدار متفاوتی خواهد بود ولی روابط کاملاً مشابه‌اند. برای مثال در صاعقه می‌توان نوشت:

$$\Delta U_L = L di / dt + 2 de / dt. (D/C) \quad (8)$$

بدین ترتیب حداکثر فاصله را می‌توان به سهولت محاسبه نمود که تنها برای صاعقه آورده می‌شود.

$$D_{max} = \frac{BIL / (1.2) - LpL - (L / Z). de / dt}{1 / C. de / dt} \quad (9)$$

همانطور که بیان گردید این روش تخمینی است. می‌توان روش دقیق‌تری ارائه نمود در این روش افزایش ولتاژ به صورت یک منحنی غیرخطی نسبت به فاصله در نظر گرفته می‌شود. ابتدا نسبت V_1 / V_{sa} محاسبه می‌شود و سپس از روی منحنی (شکل ۷) مقدار $D.S / C. V_{sa}$ خوانده

می‌شود و با استفاده از سایر پارامترها مقدار D تعیین می‌گردد در این منحنی پارامترهای زیر دخیل هستند.

V_t : حداکثر ولتاژ قابل قبول روی ترانسفورماتور (KV).

V_{sa} : ولتاژ برقی به اضافه افت ولتاژ اندوکتیو (KV).

S: شیب موج ورودی $KV / \mu sec$.

C: سرعت مسیر امواج در خط $(1000 ft / \mu sec, 300 m / \mu sec)$.

D: فاصله برقی تا ترانسفورماتور.

دیمانسیون D تنها به دیمانسیون C مربوط است اگر C بر حسب $m / \mu sec$ است D

بر حسب متر خواهد بود.

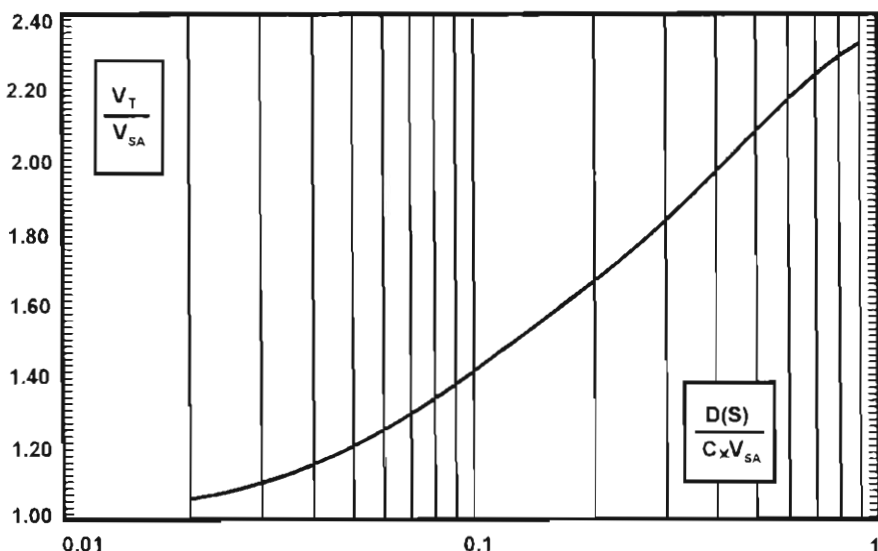
می‌توان منحنی شکل ۷ را با یک معادله غیرخطی تقریب زد و مسئله را بجای حل

گرافیکی به صورت تحلیلی حل نمود. لازم به ذکر است چنین تقریبی برای برقی‌های C - Si

هم وجود دارد که به صورت زیر است:

$$Y = \frac{2.92 X + 0.385}{X + 0.385} \quad \text{MOA} \quad (10)$$

$$Y = \frac{X}{0.0125 + 0.476X} \quad \text{Si - C} \quad (11)$$



« شکل ۷: منحنی اثر فاصله در افزایش ولتاژ »

که در روابط فوق مقادیر X و Y به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Y = V_l / V_{sa} \quad X = D.S / (C.V_{sa}) \quad (12)$$

V_{sa} برای برقی‌های $Si - C$ بدون افت ولتاژ اندوکتیو در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب از روابط (۱۰) و (۱۱) فاصله قابل قبول به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$D_{max} = \frac{C.V_{sa}}{S} \times \frac{(Y - 1) \times 0.385}{2.92 - Y} \quad MOA \quad (13)$$

$$D_{max} = \frac{C.V_{sa}}{S} \times \frac{0.0125 Y}{1 - 0.476 Y} \quad Si - C \quad (14)$$

آخرین نکته در این قسمت شیب موج ورودی است. جهت تعیین شیب موج ورودی در حالت صاعقه با توجه به حفاظ یا عدم حفاظ خط عمل می‌شود. در شبکه‌های تا ۷۰ کیلوولت شیب امواج صاعقه را می‌توان به صورت تقریبی ۹ برابر ولتاژ کار دائمی در نظر گرفت. برای ولتاژهای تا ۳۴۵ این مقدار ۱۲ برابر خواهد بود و ولتاژهای بیشتر یا $2000 \text{ KV}/\mu\text{sec}$ محدود خواهد شد. برای امواج کلیدزنی تحلیل حالت‌گذار می‌تواند شیب موج را تا حدودی مشخص کند ولی به عنوان یک تقریب مناسب می‌توان دامنه اضافه ولتاژ را بر زمان پیشانی بین $100 - 250 \mu\text{sec}$ تقسیم نمود.

۴- اثر خطوط موازی :

در حالتی که چند خط به یک پست وارد شوند و یا تعداد خطوط متصل به ترانسفورماتور (یا هر دستگاه دیگر) بیش از یک باشد، رابطه داده شده جوابگو نخواهد بود. مختصر اطلاع از تئوری امواج گذرا می‌توان این نکته را واضح سازد که انرژی موج در این حالت به سایر خطوط نیز منتقل می‌شود. تقسیم انرژی در این خطوط را می‌توان با موازی در نظر گرفتن امپدانس مشخصه خطوط مدل‌سازی نمود. و سپس امپدانس معادل را محاسبه کرد.

اگر n خط به یک پست وارد شوند و امپدانس موجی خطوط نیز مساوی و برابر Z فرض شود و امپدانس مسیر ترانسفورماتور و برقی‌ها نیز برابر Z در نظر گرفته شود، بدین ترتیب امپدانس معادل مجموعه به صورت زیر خواهد بود.

$$Z_{eq} = Z / [(n - 1) + 2] = Z / (n + 1) \quad (15)$$

این فرض بدین دلیل منطقی است که کلیه این مسیرها برای ولتاژ نامی یکسان انتخاب شده‌اند و میزان امپدانس موجی آنها تقریباً مستقل از شکل آنها بوده و وابسته به کلاس ولتاژ آنها است.

باید توجه نمود که موج از یک خط وارد می شود و در $n-1$ خط دیگر، مسیر برنگیر و ترانسفورماتور جاری می شوند.

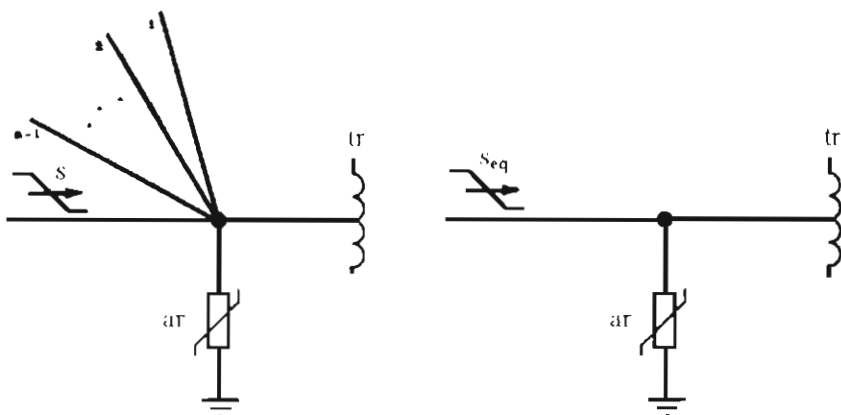
اگر شیب موج ورودی dc_i / dt فرض شود شیب موج هر خط به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\frac{z}{n+1}}{z + \frac{z}{n+1}} \frac{dc_i}{dt} = \frac{2}{n+2} \frac{dc_i}{dt} \quad (16)$$

برای حالت ساده نیز رابطه به صورت $2/3 \cdot dc_i / dt$ است و اگر خواسته شود تا معادل چند خط در مدار قرار گیرد باید شیب موج ورودی دو حالت را مساوی هم قرار داد:

$$\frac{2}{n+2} \frac{dc_i}{dt} = \frac{2}{3} \frac{dc_i}{dt} \Rightarrow \frac{dc_i}{dt} \frac{3}{n+2} \frac{dc_i}{dt} \quad (17)$$

رابطه بالا بدین معنی است که موج با پیشانی dc_i / dt در یک سیستم با n خط معادل موجی با پیشانی $dc_i / dt \cdot 3 / (n+2)$ در سیستم یک خط است. در شکل ۸ این موضوع نشان داده شده است.



$$S_{eq} = \frac{3}{n+2} S = \frac{3}{n+2} \frac{dc_i}{dt}$$

« شکل ۸: معادل پست چند خط »

با استفاده از رابطه فوق و مطالبی که راجع به اثر فاصله بیان شد می توان حالات غیر ساده را به حالت ساده معادل تبدیل نموده و هماهنگی را انجام داد. به عنوان یک روش کلی برای برخورد با مسئله هماهنگی روند گام به گام زیر را می توان پیشنهاد نمود:

- ۱- ترانسفورماتور و یا المان دیگری که در نظر گرفته نمی شود حذف شود.
- در تمام بررسی ها هدف تعیین کارایی برقی جهت المانی است که بدترین شرایط را داراست. مسلماً سایر المانهایی که در شرایط بهتری قرار دارند مشکلی نخواهند داشت این گام حذف این المانها را انجام می دهد.
- ۲- خطوطی را که در نظر گرفته نمی شوند حذف شوند.
- ممکن است بعضی از خطوط در هنگام کاری عادی باز شوند یا اکثر مواقع خارج از مدار باشند.
- ۳- نقطه مشترک بین ترانسفورماتور، برقیگیز و خط دارای ضربه را پیدا نموده و آنرا نامگذاری کرد (برای مثال نقطه M) برای یافتن بدترین شرایط ممکن است لازم شود تمام خطوط را تک تک تست نمود در هر یک از این مراحل احتمالاً نقطه M ثابت نمی ماند.
- ۴- فواصل "L.L.D" که عبارتند از فاصله ترانسفورماتور تا M و فاصله برقیگیز تا M و فاصله برقیگیز تا نقطه زمین (ارت) ، مشخص شود.
- ۵- تمام خطوطی را که در فاصله L به سیستم متصل شده اند حذف کرد.
- ۶- n را مساوی تعداد خطوط باقیمانده قرار داده و مدار را رسم نمود.
- ۷- پیشانی موج معادل را محاسبه کرد.
- ۸- با استفاده از منحنی ولتاژ روی ترانسفورماتور را بدست آورده و از هماهنگ بودن حفاظت مطمئن گردید.

۵- نتیجه گیری :

هدف حفاظتی از نصب برقیگیز، ایجاد یک سطح حفاظتی مطمئن است. این سطح حفاظتی به ازاء دامنه وسیعی از شیب موجها باید ایمنی تجهیزات را فراهم سازد. برای اطمینان از چنین پوششی تنها تست چند نقطه کافی است. فاصله بین برقیگیز و اجزاء و همچنین پیچیدگی و تعداد خطوط ورودی حالات خاصی هستند که نیازمند بررسی به شکل خاص هستند. روشهای ساده ای جهت بررسی این وضعیتها وجود دارد که این حالتها را به حالت ساده تبدیل می کند. در این مقاله الگوریتمی جهت حل مسأله هماهنگی عایقی بین برقیگیز و ترانسفورماتور ارائه گردیده است و طی آن نشان داده شده است که هر ترکیب پیچیده را می توان از این روش به شکلهای ساده از مسأله تبدیل نمود.

1. IEC 99 - 1 Lightning arresters 1970.
 2. IEC 99 - 4 Lightning arresters 1991.
 3. IEC 99 - 1A Supplement to IEC 99 - 1.
 4. IEC 71 - 1.2 Insulation co - ordination 1976.
 5. IEC 71 - 3 Guide for Insulation co - ordination 1982.
 6. IEEE/ANSI C 62.1 & 62.22 1989.
 7. IEEE/ANSI C 62.2 & 62.22 1987.
 8. IEEE tutorial course on surge protection, Chapter 4 1979.
 9. Surge protection of power sys. Westing house Elec. Corporation march 1975.
 10. Surges in high Voltage network, KLAUS RAGGALLAR.
 11. IEEE red book Chapter 4 1986.
 12. ABB EXLIM Series Technical information.
۱۳. رعد و برق و خطوط انتقال انرژی ط. شاهرخشاهی ۱۳۶۸ مؤلف.
۱۴. اضافه ولتاژهای قطع وصل ط. شاهرخشاهی ۱۳۶۸ امیرکبیر.
۱۵. اصول مهندسی فشار قوی دکتر محمدی ۱۳۵۵ مؤلف.
۱۶. سمینار کارشناسی ارشد برقی‌های اکسید روی ع. انفذ دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۱۷. سمینار برقی‌های اکسید روی محمد میرغفوریان شرکت برقی‌پارس.
۱۸. استاندارد پیشنهادی برقی‌های ۲۰ و ۳۲ کیلوولتی دفتر فنی وزارت نیرو.