

فصل هشتم

تولید ولتاژهای فشار قوی

۸-۱- مقدمه

اصولاً استقامت الکتریکی تجهیزات عایقی، باید خیلی بیشتر از ولتاژ نامی مورد استفاده آنها باشد. در واقع عایق‌ها باید از یک ضریب اطمینان بالایی برخوردار باشند تا در برابر اضافه ولتاژهای احتمالی، دچار شکست الکتریکی نشوند. این ضریب اطمینان را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد:

$$\text{ولتاژ شکست عایق} = \text{ضریب اطمینان} \times \text{ولتاژ نامی عایق}$$

اضافه ولتاژهای مورد نظر به هنگام بروز اتصال کوتاه در شبکه، سوئیچینگ و اصابت رعد و برق به وجود می‌آید. به این منظور باید ولتاژهای بالاتر از ولتاژهای نامی عایق‌ها، در آزمایشگاه‌های فشار قوی تولید شوند تا به وسیله آنها بتوان تجهیزات عایقی مانند: کلیدهای فشار قوی، ترانسفورماتورها، کابل‌ها، پوشینگ‌ها، مقره‌ها و غیره را در برابر اضافه ولتاژها آزمایش نموده و ولتاژ شکست آنها را تعیین نمود. با این آزمایش‌ها، طراحی و کیفیت تجهیزات الکتریکی و عایق‌ها مورد تأیید یا رد قرار می‌گیرند. در آزمایشگاه‌ها معمولاً سه نوع ولتاژ فشار قوی برای آزمایش‌های مختلف و انجام مطالعات تحقیقاتی برای بررسی رفتار عایق‌ها در برابر ولتاژهای فشار قوی مختلف تولید می‌شود:

۱- ولتاژ فشار قوی DC،

۲- ولتاژ فشار قوی AC: این ولتاژ معمولاً با فرکانس‌های کاربردی در صنعت

تولید می‌شود. البته برای کاربردهای خاصی از جمله در آزمایش‌های ترانسفورماتورها (برای دیرتر به اشباع رفتن هسته)، ولتاژهای فشار قوی با فرکانس‌های بالا تولید می‌شود؛ ولی عموماً عایق‌ها را با ولتاژهای AC با فرکانس صنعتی آزمایش می‌کنند؛

۳- ولتاژ فشار قوی ضربه‌ای: موج ولتاژ ضربه‌ای صاعقه و موج ضربه‌ای ناشی از سوئیچینگ و اتصال کوتاه، طبق مشخصات مقرر شده در استانداردهای بین‌المللی تولید می‌شود. طبق این استانداردها توصیه می‌شود که تجهیزات مورد استفاده در ولتاژهای بالاتر از 300 kV ، با ولتاژهای ضربه‌ای از نوع سوئیچینگ آزمایش شوند. اگر چه شکل موج ضربه‌ای سوئیچینگ در حالت‌های مختلف، متفاوت است ولی تجربه نشان داده است که پایین‌ترین استقامت الکتریکی در حالتی است که زمان رسیدن موج به مقدار حداکثر خود، بین 100 تا $300\ \mu\text{sec}$ باشد. از این‌رو، موج ضربه‌ای استاندارد سوئیچینگ، دارای زمان پیشانی $250\ \mu\text{sec}$ و زمان پشت موج $2500\ \mu\text{sec}$ می‌باشد. مشخصات مربوط به امواج ضربه در قسمت‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

۸-۲- کاربرد ولتاژ فشار قوی DC

از مهمترین کاربردهای ولتاژ فشار قوی DC، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- انجام کارهای تحقیقاتی و مطالعاتی روی عایق‌ها: برای مطالعه رفتار عایق‌ها از ولتاژهای DC استفاده می‌کنند. اگر عایقی در برابر ولتاژهای فشار قوی DC، استقامت داشته باشد، آن‌گاه حتماً در برابر ولتاژهای فشار قوی AC نیز استقامت خواهد داشت.

۲- در فیزیک برای شتاب دهنده‌ها (مشابه شتاب دادن پروتون یا الکترون در تلویزیون): در میدان‌های الکتریکی قوی یکنواخت، به ذرات الکتریکی نیروی زیادی وارد شده و شتاب می‌گیرند.

۳- در پزشکی برای تولید اشعه X.

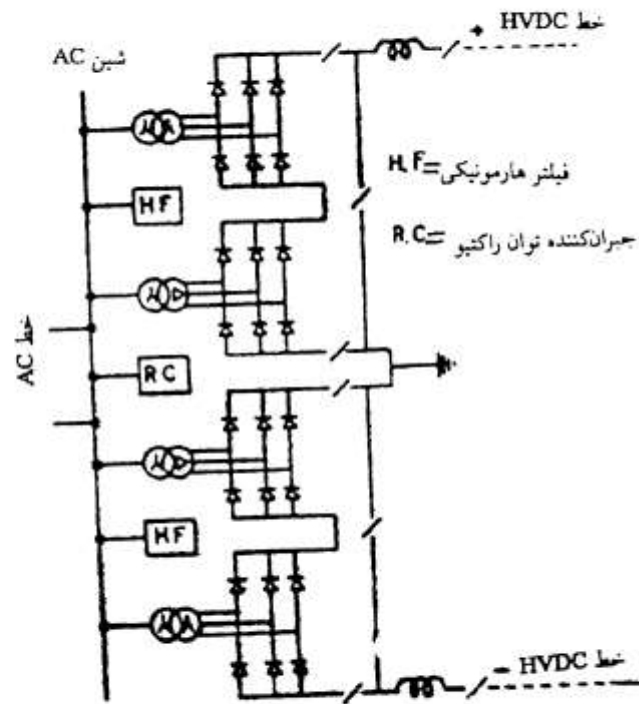
۴- در صنایع برای فیلتر کردن دود خروجی نیروگاه‌های حرارتی و کارخانجات سیمان و پاشیدن رنگ: ذرات آلوده در بین الکترودهای فلزی میدان الکتریکی به صورت ذرات باردار درمی‌آیند و با سرعت به سمت الکترودهای مذکور جذب می‌شوند. این الکترودها در مسیر دودکش خروجی نصب می‌گردند و بدین وسیله، از

ورود ذرات آلوده به هوای آزاد جلوگیری می‌شود. در رنگ آمیزی الکترواستاتیکی نیز ذرات رنگ به صورت ذرات باردار، با سرعت روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شوند. از ویژگی‌های این نوع رنگ آمیزی، یکنواختی ضخامت رنگ در تمام نقاط سطوح و قابلیت تنظیم ضخامت رنگ روی سطح مورد نظر است.

۵- در مخابرات برای ایستگاه‌های پخش تلویزیونی.

۶- برای آزمایش کابل‌های فشار قوی AC با طول زیاد: اگر کابل‌های فشار قوی AC را بخواهیم با ولتاژهای بالای AC آزمایش کنیم، به علت ظرفیت خازنی نسبتاً بالای کابل‌های با طول زیاد، جریان زیادی نیاز می‌باشد. همچنین تخلیه‌های مکرر در حفره‌های داخلی احتمالی، باعث کاهش درجه عایقی آن‌ها می‌شود. بنابراین، آزمایش آن‌ها با ولتاژ DC مناسب‌تر است. اگر چه در این آزمایش‌ها از نظر شرایط کاری، کابلی که با ولتاژ AC کار می‌کند متفاوت می‌باشد، ولی اعتبار آن از دیدگاه تجربی پذیرفته می‌شود؛ زیرا هدف از این کار، بررسی توزیع شدت میدان درون عایق می‌باشد.

۷- برای آزمایش تجهیزات مورد استفاده در خطوط انتقال HVDC: در خطوط انتقال HVDC، نیاز به جریان‌های خیلی زیادی است. از سال ۱۹۷۰ به بعد، تریتورهای فشار قوی با تحمل ولتاژ بالاتری ساخته شده است که در یکسوکننده‌های خطوط مورد نظر به کار می‌رود. در سال ۱۹۷۲، تریتورهای تا قدرت ۷۰ kW و در سال ۱۹۸۳ با قدرت ۱۰۰۰ kW ساخته شده است. در خطوط انتقال HVDC، عموماً از یکسوکننده‌های ۱۲ پالس^(۱۱) استفاده می‌شود تا اعوجاج ولتاژ خروجی بسیار کم باشد. شکل کلی این مدارها به صورت شکل (۸-۱) می‌باشد. مقدار راکتورهای سری در حدود ۰/۴ تا ۱ H می‌باشد که برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و جریان و محدود کردن جریان یکسوکننده‌ها در هنگام وقوع اتصال کوتاه در خط انتقال HVDC به کار می‌رود. این خطوط، معمولاً به صورت دو سیمی استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها مثبت و دیگری منفی می‌باشد و اصطلاحاً به نام خطوط DC دو قطبی معروف است. در این روش، ولتاژ خط به خط، دو برابر ولتاژ خط به زمین است. تجهیزات عایقی خطوط مذکور، با ولتاژ DC آزمایش می‌شوند.



شکل (۸-۱): سیستم یکسوساز در خطوط HVDC

۸-۲-۱- مزایای استفاده از خطوط HVDC

استفاده از خطوط HVDC مزایای زیر را به همراه خواهد داشت:

- ۱- در خطوط HVDC فقط به دو هادی نیاز است که یکی با ولتاژ مثبت نسبت به زمین و دیگری با ولتاژ منفی نسبت به زمین است؛ ولی در خطوط HVAC حداقل به سه هادی نیاز است. میزان قدرت و جریان انتقالی در خطوط AC و DC به شکل زیر تعیین می‌شوند:

$$P_{AC} = \sqrt{3} V I_{AC} \cos \phi$$

$$I_{AC} = \frac{P_{AC}}{\sqrt{3} V \cos \phi} \quad (۸-۱)$$

$$P_{DC} = 2 V I_{DC}$$

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{2V} \quad (2-8)$$

قابلیت اعتماد در خطوط HVDC بیشتر از خطوط HVAC است؛ زیرا با وقوع خطا، در یکی از دو هادی خط، هنوز هم می‌توان قدرت انتقالی را بدون هیچ‌گونه مشکلی از طریق هادی دیگر منتقل نمود. همچنین خط HVDC نیاز به فضای کم‌تری نسبت به خط HVAC مشابه دارد و در نتیجه نیاز به پایه‌های کوچکتری است. بنابراین، هزینه نصب خطوط هم کاهش می‌یابد.

۲- خطوط HVDC به عایق‌بندی کم‌تری نسبت به HVAC نیاز دارند، زیرا:

$$\text{حداکثر دامنه ولتاژ هر سیم در سیستم AC} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{L-L} = 0.8V_{L-L} \quad (3-8)$$

$$\text{حداکثر ولتاژ هر سیم در سیستم DC} = \frac{1}{2} V_{L-L} = 0.5V_{L-L} \quad (4-8)$$

بنابراین، تلفات کرونا و تداخل رادیویی در HVDC کم‌تر از HVAC است. به همین دلیل کابل‌های DC ارزان‌تر از کابل‌های AC می‌باشد.

۳- مسئله حفظ سنکرونیزم بین دو سیستم AC که به وسیله یک خط HVDC به هم متصل شده‌اند، وجود ندارد. همچنین نیازی به یکسان بودن فرکانس‌های دو شبکه AC که با خط DC متصل شده‌اند، نمی‌باشد.

۴- قدرت انتقالی از یک خط DC را می‌توان به راحتی توسط ترستورهای یکسوکنده آن کنترل نمود و در یک مقدار معین، ثابت نگه داشت.

۵- اگر در یکی از دو شبکه AC که با یک خط DC به هم متصل شده‌اند، اتصال کوتاهی رخ دهد، جریان اتصال کوتاه به شبکه دیگر منتقل نمی‌شود؛ زیرا عموماً جریان اتصال کوتاه، یک جریان راکتیو است که در سیستم DC، جریان راکتیو منتقل نمی‌شود ($\cos\phi = 1$).

۶- تلفات خطوط HVDC کم‌تر از خطوط HVAC است؛ زیرا اولاً $R_{dc} < R_{ac}$ است. ثانیاً جریان راکتیو در خطوط DC وجود ندارد.

۷- در خطوط HVAC، قدرت انتقالی برابر $P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin\delta$ است که به سبب حالت‌های گذرای موجود در این خطوط، باید زاویه δ در شرایط عادی کم‌تر از ۳۰ درجه باشد. بنابراین، در خطوط AC با محدودیت‌هایی در طول خط و قدرت

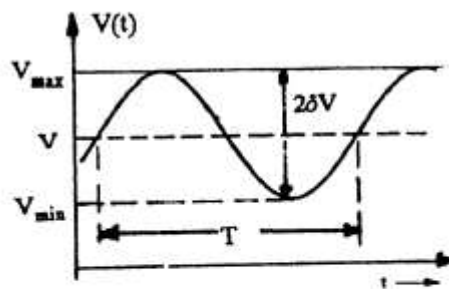
انتقالی مواجه هستیم که برای رفع این مشکل، از خازن‌های سری استفاده می‌شود. اما در خطوط HVDC محدودیت پایداری وجود نخواهد داشت. لازم به ذکر است که هزینه خطوط HVDC، به دلیل هزینه بالای مبدل‌های AC/DC و DC/AC بسیار زیاد است، ولی برای خطوط طولانی بین ۶۰۰-۹۰۰ km و قدرت‌های بیش از ۱۰۰۰ MW، هزینه‌های خطوط DC کم‌تر از خطوط AC خواهد بود. این موضوع برای کابل‌های DC با ارقام کم‌تری مواجه است، به طوری که برای فاصله‌های بیش از ۵۰-۱۰۰ km اقتصادی‌تر است. یک نمونه از خط HVDC بین ایالت اورگان و لوس آنجلس در کشور آمریکا به طول ۱۳۷۰ km و ولتاژ ۸۰۰ kV به کار برده شده است که قدرت انتقالی آن، ۱۴۴۰ MW می‌باشد.

۸-۳- تعریف ولتاژ DC

طبق استاندارد IEEE و IEC مقدار DC یک ولتاژ به صورت متوسط آن تعریف می‌شود (شکل ۸-۲ را ببینید). بنابراین، برای یک ولتاژ متناوب $V(t)$ با دوره تناوب T ، مقدار DC آن برابر است با:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (8-5)$$

اگر ولتاژ $V(t)$ به یک عایق اعمال گردد، مرتباً مقدار آن حول مقدار متوسط \bar{V} نوسان می‌کند؛ یعنی این موج دارای یک اعوجاج با دامنه δV است که:



شکل (۸-۲): نوسانات در ولتاژ DC

$$\delta V = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \quad (6-8)$$

ضریب اعوجاج موج $V(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{ضریب اعوجاج} = \frac{\delta V}{\bar{V}} \quad (7-8)$$

برای ولتاژهای DC فشار قوی، ضریب اعوجاج نباید از مقدار ۰.۵٪ بیشتر باشد.

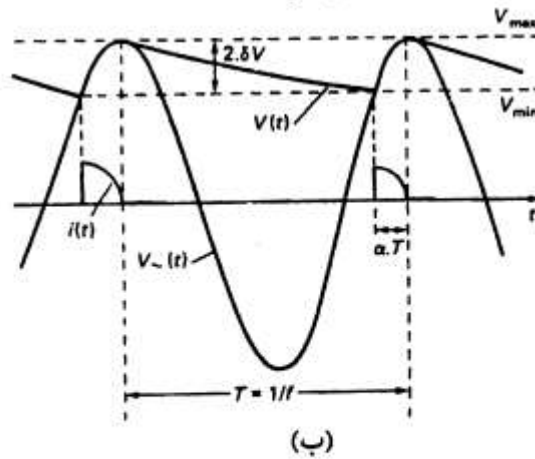
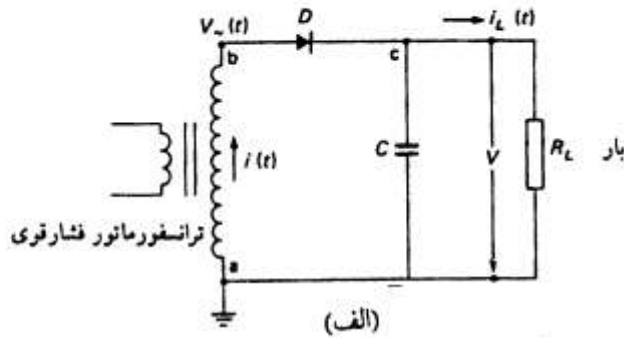
۸-۴- تولید ولتاژ فشار قوی DC

علاوه بر کاربردهای تحقیقاتی که برای این گونه ولتاژها ذکر شده است، از ولتاژهای DC در آزمایشگاه عایق‌های وسایل و تجهیزات فشار قوی به ویژه کابل‌ها و خازن‌ها استفاده می‌شود. چنان‌که بعداً خواهیم دید در تولید ولتاژهای ضربه‌ای فشار قوی هم از مولدهای DC با ولتاژ زیاد استفاده می‌شود. یکی از روش‌های تولید ولتاژهای DC، استفاده از یکسوکننده‌های نیم‌موج یا تمام‌موج است. البته ولتاژ DC تولید شده توسط یکسوکننده‌ها، همواره از مقدار حداکثر ولتاژ AC تغذیه کننده آن‌ها کم‌تر است. برای تولید ولتاژ DC بالاتر، از مدارهای چند برابرکننده ولتاژ DC استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح تولید ولتاژهای فشار قوی DC خواهیم پرداخت.

۸-۴-۱- یکسوساز نیم‌موج

ولتاژهای فشار قوی DC عموماً از یکسوسازی ولتاژهای فشار قوی AC تولید می‌شوند. ساده‌ترین مدار یکسوساز، مدار یکسوساز نیم‌موج است که از یک دیود و خازن تشکیل شده است (مطابق با شکل ۸-۳-الف). اگر از راکتانس پراکنندگی ترانسفورماتور و امپدانس داخلی دیود در طول هدایت آن صرف‌نظر کنیم، وقتی که دیود D هدایت می‌کند، خازن تا ولتاژ V_{max} از ولتاژ $V \sim(t)$ ترانسفورماتور شارژ می‌شود. اگر مقاومت بار، بی‌نهایت باشد ($R_L \rightarrow \infty$)، ولتاژ DC که در دو سر خازن قرار می‌گیرد، در مقدار V_{max} ثابت می‌ماند. در این مدار، باید دیود D ، تحمل ولتاژ معکوس $2V_{max}$ را داشته باشد.

اگر مدار از طریق بارگیری شود، ولتاژ V ثابت نمی‌ماند و طی دوره T ، مقدار



شکل (۸-۳): یکسوکننده تک فاز نیم‌موج

الف) شکل مدار؛ ب) منحنی ولتاژها و جریان‌ها در بار R_L

بار Q به R_L منتقل می‌شود.

$$Q = \int_T i_L(t) \cdot dt = \int_T \frac{V(t)}{R_L} dt = I \cdot T = \frac{I}{f} \quad (۸-۸)$$

که I مقدار متوسط جریان DC (متوسط جریان $i_L(t)$ و ولتاژ DC دو سر بار که طبق شکل (۸-۳-ب) دارای اعوجاج است، می‌باشد. این مقدار بار Q طی مدت زمان αT (که دیود D هدایت می‌کند) به بار منتقل می‌شود. پس:

$$Q = \int_{\alpha T} i(t) \cdot dt = \int_T i_L(t) \cdot dt \quad (۹-۸)$$

جریان $i(t)$ ، جریان ثانویه ترانسفورماتور است. چون $\alpha T < T$ است، بنابراین، دامنه

جریان $i(t)$ بزرگ‌تر از جریان $i_L(t)$ است. دامنه اعوجاج δV را می‌توان دقیقاً در دوره تخلیه $T-\alpha T$ محاسبه نمود. برای مدار موجود و با صرف‌نظر کردن از افت ولتاژ دو سر ترانسفورماتور و دیود و با فرض $\alpha \cong 0$ خواهیم داشت:

$$Q = 2 \times \delta V \cdot C = I \cdot T \quad (10-8)$$

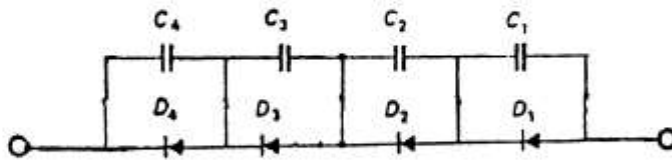
$$\delta V = \frac{I \cdot T}{2C} = \frac{I}{2fC} \quad (11-8)$$

این رابطه، ارتباط بین ضریب اعوجاج، جریان بار و پارامترهای مدار (f و C) را نشان می‌دهد. حاصل ضرب $f \cdot C$ در طراحی این مدار بسیار مهم است.

برای عایق‌ها، مقدار R_L خیلی زیاد است. به همین دلیل، مقدار I بسیار کم است ولی در مدار آزمایش، در صورتی که عایق دچار شکست الکتریکی شود مقدار R_L به سمت صفر می‌رود و جریان I خیلی زیاد خواهد شد، که برای جلوگیری از خطرات بعدی، باید سیستم اتوماتیک سریعاً مدار اولیه ترانسفورماتور را قطع کند یا یک مقاومت خیلی بزرگی را سریعاً در ثانویه مدار ترانسفورماتور قرار دهد. همچنین دیود D باید بتواند این جریان زیاد را برای چند لحظه تحمل کند.

مدار مذکور در محدوده‌های مگاولت هم ساخته شده است. در ضمن، دیود یکسوکننده D از نوع سیلیکونی است تا جریان‌های بالا را تحمل کند. با توجه به این‌که بیشترین ولتاژ قابل تحمل به صورت معکوس برای هر دیود حداکثر $2/5 \text{ kV}$ است، بنابراین، برای تولید ولتاژهای فشار قوی بالا، چندین دیود را با هم سری می‌کنند. در این حالت، ممکن است به دلیل این‌که مشخصات دیودها از نظر ساختمان کاملاً یکسان نیستند، در نتیجه، توزیع ولتاژ روی آن‌ها به طور یکنواخت صورت نمی‌گیرد و ممکن است روی یکی از دیودها، ولتاژ بیش از حد تحمل آن واقع شده و از بین برود و بالطبع بقیه دیودها هم از بین خواهند رفت. برای رفع این مشکل مطابق با شکل (۸-۴)، به موازات هر دیود، یک خازن که ظرفیت آن خیلی کم‌تر از خازن C مدار یکسوساز است، قرار می‌دهند.

یک نمونه از این یکسوساز که برای یک مدار مولد ولتاژ $1/2 \text{ MV, DC}$ ساخته شده است، دارای دیودهایی است که طول مجموع آن‌ها 12 m است. عیب مدار یکسوکننده نیم‌موج این است که ممکن است ترانسفورماتور در اثر کشیدن جریان



شکل (۴-۸): رفع مشکل دیودها با موازی کردن خازن‌ها

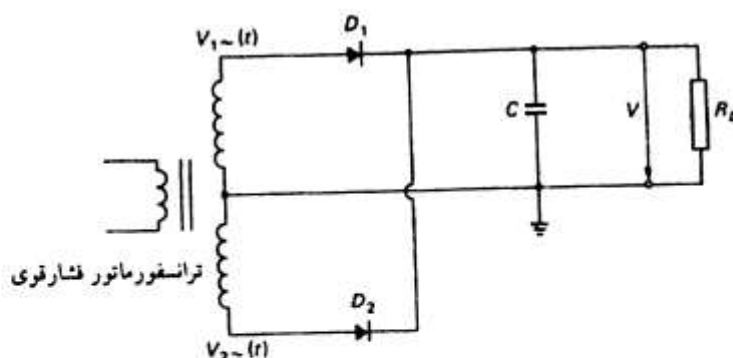
زیاد به حالت اشباع برسد (با توجه به کوتاه بودن زمان روشن بودن دیود و انتقال بار Q از آن). برای غلبه بر این مشکل، می‌توان از مدار یکسوساز تمام‌موج استفاده نمود.

۲-۴-۸- یکسوساز تمام‌موج

مدار یکسوساز تمام‌موج مطابق شکل (۵-۸) است. در این مدار، دیودهای D_1 و D_2 هر کدام طی یک نیم‌سیکل، جریان را هدایت می‌کنند ($\frac{T}{2}$) و در نتیجه اعوجاج شکل موج، نسبت به روش یکسوساز نیم‌موج، نصف خواهد شد. در نتیجه، اعوجاج در این مدار برابر است با:

$$\delta V = \frac{I}{4fC} \quad (۱۲-۸)$$

در صورتی که دامنه ولتاژهای $V_1 \sim(t)$ و $V_2 \sim(t)$ دقیقاً مساوی هم نباشند، اعوجاج شکل موج، خیلی زیادتر خواهد شد. از این رو، عموماً از همان مدار یکسوساز نیم‌موج استفاده می‌شود.



شکل (۵-۸): مدار یکسوساز تمام‌موج با خازن یکسوساز

۸-۴-۳- مدارهای چند برابر کننده ولتاژ DC

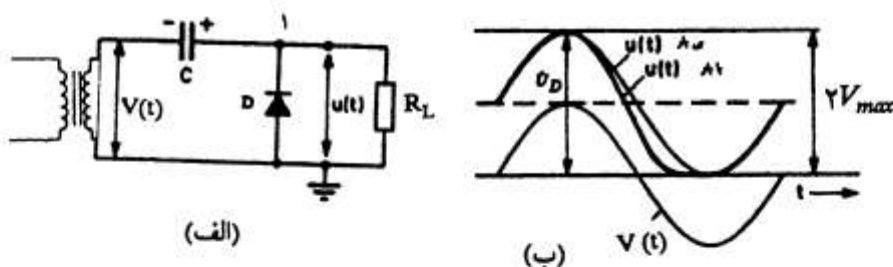
در مدار یکسوساز نیم موج و تمام موج، ولتاژ DC خروجی در بارگیری، کمی کم‌تر از مقدار حداکثر ولتاژ AC ترانسفورماتور است و از آن برای تولید ولتاژهای بالای DC حداکثر تا 200 kV استفاده می‌کنند. برای تولید ولتاژهای بالاتر از این مقدار، از چندبرابرکننده‌های ولتاژ استفاده می‌شود. اساس دستگاه‌های تولید فشار قوی DC با استفاده از چندبرابرکننده‌های ولتاژ، بر طبق مدار دوبرابرکننده ولتاژ ویلارد قرار دارد.

۸-۴-۳-۱- مدار ویلارد^(۱)

اساس این مدار مطابق شکل (۸-۶) می‌باشد. در نیم سیکل منفی، موج ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور، خازن C را از طریق دیود D به مقدار V_{max} شارژ می‌کند.

$$V(t) = V_{max} \sin \omega t \quad (۸-۱۳)$$

در نیم سیکل مثبت بعدی، موج ولتاژ $V(t)$ روی مقدار V_{max} قرار گرفته و ولتاژ نقطه ۱ به دو برابر ولتاژ V_{max} خواهد رسید؛ ولی در نیم سیکل بعد از آن که دیود D دوباره جریان را هدایت می‌کند به صفر هم می‌رسد. بدین ترتیب یک دو برابر کننده ولتاژ به دست می‌آید که ولتاژ نقطه ۱، موجی است که بین مقدار صفر تا $2V_{max}$ تغییر



شکل (۸-۶): مدار ویلارد و تغییرات ولتاژ نقاط مشخص

۸-۵- تولید ولتاژ فشار قوی AC

برای آزمایش قدرت عایقی تجهیزات مورد استفاده در خطوط فشار قوی AC، لازم است تا در آزمایشگاه‌ها به وسیله ترانسفورماتورهای آزمایشگاهی، ولتاژهای فشار قوی AC را تولید نماییم. گرچه خطوط AC در سیستم‌های انتقال همیشه به صورت سه فاز هستند، ولی برای آزمایش عایق‌ها، ولتاژ فشار قوی AC به صورت تک‌فاز لازم است.

آزمایش تجهیزات عایقی همیشه شامل اعمال یک ولتاژ فشار قوی AC به یک بار خازنی با تلفات توان بسیار کوچک است که می‌توان با صرف نظر کردن از تلفات آن، توان نامی خروجی (P_n) مورد نیاز از یک مولد فشار قوی AC را تعیین نمود.

$$I_n = \frac{V_n}{X_c} = V_n \omega C_t \quad (28-8)$$

$$P_n = V_n I_n = K V_n^2 \omega C_t, \quad K \geq 1 \quad (29-8)$$

که جریان I_n در حدود چند میلی‌آمپر است. در این رابطه،

C_t = ظرفیت خازنی عایق نمونه تحت آزمایش،

V_n = ولتاژ نامی مؤثر مولد فشار قوی AC،

K = ضریب اطمینان برای در نظر گرفتن خازن‌های اضافی در کل مدار مورد آزمایش است.

این ظرفیت‌های خازنی اضافی به سبب الکترودها، اتصالات رابط بین عایق نمونه و دستگاه‌ها می‌باشند. همچنین وسایل اندازه‌گیری از جمله مقسم‌های ولتاژ خازنی یا فاصله‌های هوایی بین گوی‌های درون مدار مورد آزمایش نیز مؤثر می‌باشند.

ظرفیت خازنی عایق نمونه تحت آزمایش (C_t)، برای بعضی از عایق‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

چند ده پیکو فاراد	مقره‌های بشقاب‌ی آویزان یا مقره پست
۱۰۰ تا ۱۰۰۰ پیکو فاراد	مقره‌های پوشینگ (عبوری)
۲۰۰ تا ۵۰۰ پیکو فاراد	ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری
حدود ۱۰۰۰ پیکو فاراد	ترانسفورماتورهای قدرت با توان کم‌تر از ۱۰۰۰ kVA
۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ پیکو فاراد	ترانسفورماتورهای قدرت با توان بیشتر از ۱۰۰۰ kVA
۲۵۰ تا ۳۰۰ پیکو فاراد بر متر	کابل‌های فشار قوی با عایق کاغذ و روغن
حدود ۶۰ پیکو فاراد بر متر	کابل‌های فشار قوی با عایق گازی

از آنجایی که ولتاژ مورد آزمایش فقط برای مدت زمان کوتاه و خیلی محدودی به عایق اعمال می‌شود، بنابراین، قدرت نامی مولد فشار قوی AC را نیز برای مدت زمان‌های کوتاه در حدود حداکثر ۱۵ دقیقه در نظر می‌گیرند. همچنین با توجه به بزرگ بودن ثابت زمانی افزایش درجه حرارت در ترانسفورماتورها، به سیستم‌های خنک‌کنندگی پیچیده‌ای نیاز نمی‌باشد. با توجه به جریان بسیار کم عبوری از سیم‌پیچ

انتخاب ولتاژ انتقال، همواره یک مسئله مهم فنی و اقتصادی در طراحی خطوط انتقال نیرو به شمار می‌رود.

۱- انتخاب ولتاژ اقتصادی: ولتاژهای استاندارد شده انتقال نیرو در ایران ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت می‌باشد. ولتاژهای فوق توزیع ۱۳۲ و ۶۳ کیلوولت و ولتاژهای توزیع ۲۰ و ۱۱ کیلوولت تعیین شده‌اند. ۳۳ کیلوولت به جای ۲۰ کیلوولت در استان خوزستان، ولتاژ ۱۱ کیلوولت در استان‌های خوزستان و فارس، سیستان و بلوچستان و ۶۶ کیلوولت به جای ۶۳ در فارس استفاده می‌شود.

• تلفات توان رابطه مستقیم با جریان و امپدانس خط دارد.

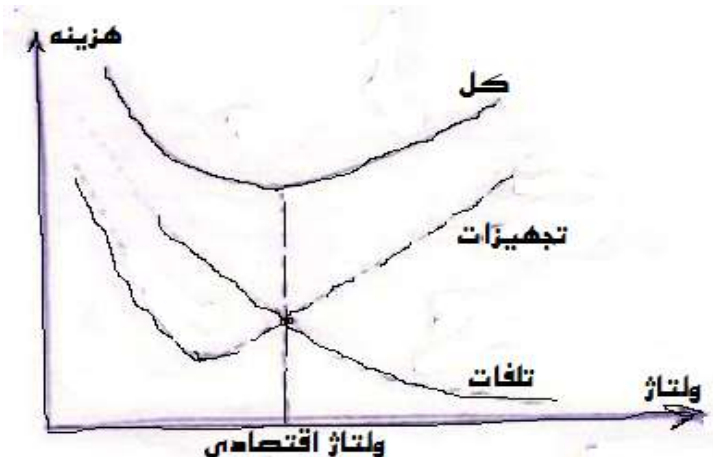
$$P_{Loss} = R.I^2$$

در این رابطه P برحسب کیلوولت آمپر، R مقاومت سیم برحسب اهم، I برحسب کیلوآمپر می‌باشد. این رابطه در مورد تلفات قدرت در شبکه تکفاز و خطوط کوتاه صادق است و در صورت افزایش ولتاژ تا دو برابر ولتاژ موجود، جریان به نصف کاهش یافته و در نتیجه تلفات انرژی به علت رابطه مستقیم آن با مجذور جریان به یک چهارم مقدار قبلی خواهد رسید بنابراین می‌توان گفت قابلیت انتقال خط با توان دوم ولتاژ رابطه مستقیم دارد و لذا انتقال انرژی زیاد فقط با ولتاژهای بالا اقتصادی خواهد بود.

تعیین ولتاژ به کمک رابطه تجربی استیل: این رابطه با شناخت توان و طول خط امکان محاسبه ولتاژ انتقال را در اختیار ما قرار می‌دهد.

$$U = 5.5 \sqrt{L + \left(\frac{S}{150}\right)}$$

U : ولتاژ انتقال برحسب کیلو ولت. L : مسافت برحسب مایل (1mile=1.609km).
 S : توان ظاهری مورد انتقال برحسب کیلو ولت آمپر.



فصل دهم

امواج سیار در خطوط انتقال

۱-۱-۱۰- مقدمه

بر اثر برخورد صاعقه‌های آسمانی یا بر اثر عبور ابرهای باردار از بالای خطوط انتقال، اضافه ولتاژهای ناگهانی به صورت موج ضربه‌ای روی خطوط انتقال القا می‌شود. همچنین بر اثر سوییچینگ ناشی از کلیدزنی یا اتصال کوتاه، یک اضافه ولتاژ ضربه‌ای ایجاد می‌گردد. هنگامی که این اضافه ولتاژها در یک نقطه ایجاد می‌شوند، به طور آنی و همزمان تمام نقاط خط دارای این اضافه ولتاژ نمی‌شوند، بلکه این امواج به صورت موج‌های سیار روی خطوط انتقال حرکت می‌کنند و با توجه به سرعت امواج الکترومغناطیسی (کمیت‌های الکتریکی نیز از همین نوع هستند)، مدتی طول می‌کشد تا یک موج از ابتدای خط به انتهای خط برسد. سرعت حرکت موج‌های الکترومغناطیسی بستگی به محیطی دارد که در آن انتشار می‌یابند. مثلاً در هوا، سرعت آن‌ها ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه است. اگر این موج‌های سیار ضربه‌ای، داخل تجهیزات سیستم قدرت (مانند ترانسفورماتورها و ماشین‌های الکتریکی) شوند، موجب توزیع نابرابر تنش‌های الکتریکی در طول سیم‌پیچ‌ها شده و می‌توانند موجب از بین رفتن عایق‌بندی آن‌ها شوند. بنابراین، باید از ورود آن‌ها به تجهیزات جلوگیری شود.

برای بررسی و مطالعه این امواج سیار روی خطوط انتقال، از مدل گسترده یک خط انتقال که به صورت شکل (۱-۱۰) است، استفاده می‌کنیم. برای سهولت، از مقاومت و کندوکتانس خط نیز صرف نظر می‌کنیم؛ یعنی یک خط بدون تلفات را در نظر می‌گیریم.