به نام خدا

عایق و فشار قوی

فصل پنجم
تولید ولتاژهای فشارقوی

مقدّمه

اصولاً استقامت الکتریکی تجهیزات عایقی، باید خیلی بیشتر از ولتاژ نامی مورد استفادهٔ 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 به‌صورت زیر معرّفی کرد:

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

اضافه ولتاژهای مورد نظر به هنگام بروز اتّصال کوتاه در شبکه، سوئیچینگ و اصابت رعد و برق به‌وجود می‌آید. به این منظور باید ولتاژهای بالاتر از ولتاژهای نامی عایق‌ها، در آزمایشگاه‌های فشار قوی تولید شوند تا به‌وسیلهٔ آن‌ها بتوان تجهیزات عایقی مانند: کلیدهای فشار قوی، ترانسفورماتورها، کابل‌ها، بوشینگ‌ها، مقره‌ها و غیره را در برابر اضافه ولتاژها آزمایش نموده و ولتاژ شکست آن‌ها را تعیین نمود. با این آزمایش‌ها، طرّاحی 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 خاصّی 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 اتّصال کوتاه، طبق مشخّصات مقرر شده در استانداردهای بین‌المللی تولید می‌شود. طبق این استانداردها توصیه می‌شود که تجهیزات مورد استفاده در ولتاژهای بالاتر از ۳۰۰kV، 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 حدّاکثر خود، بین ۱۰۰ تا ۳۰۰μsec باشد. از این‌رو، موج ضربه‌ای استاندارد سوئیچینگ، دارای زمان پیشانی ۲۵۰μsec و زمان پشت موج ۲۵۰۰μsec می‌باشد. مشخّصات مربوط به امواج ضربه در قسمت‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

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 مطالعهٔ 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.

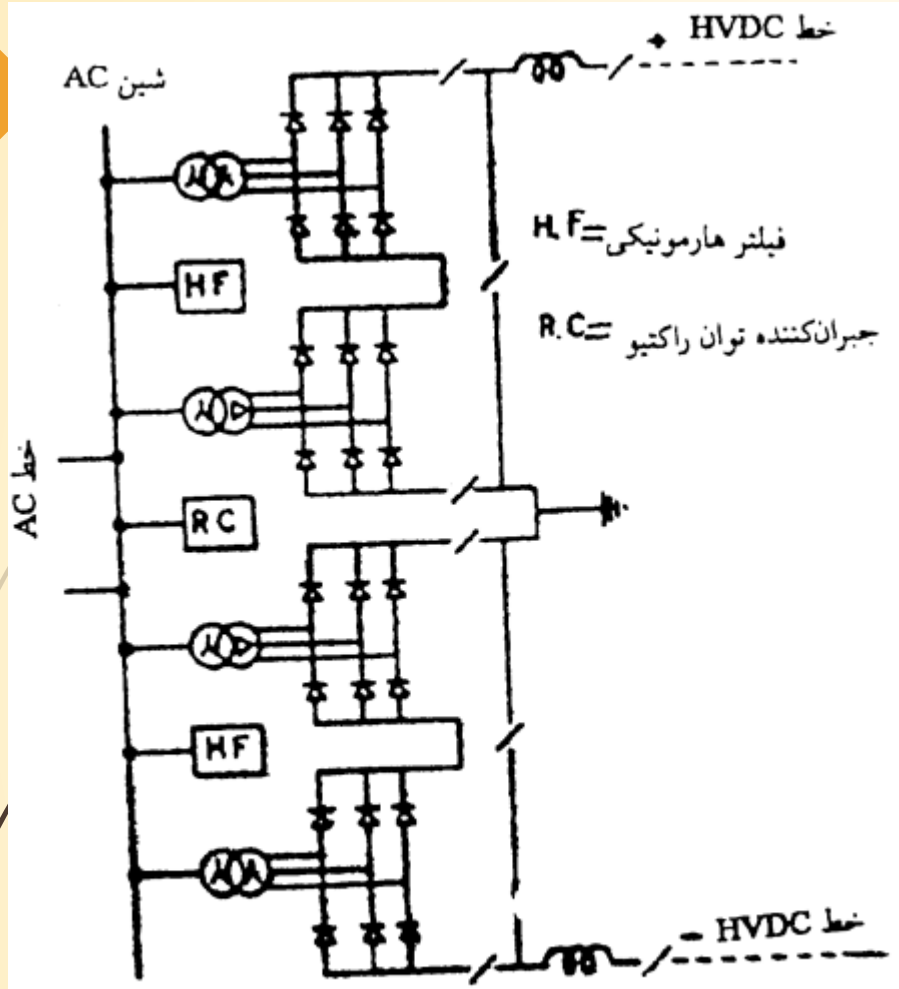
۲- در فیزیک برای شتاب دهنده‌ها(مشابه شتاب دادن پروتون یا الکترون در تلویزیون): در میدان‌های الکتریکی قوی یکنواخت، به ذرّات الکتریکی نیروی زیادی وارد شده و شتاب می‌گیرند.

۳- در پزشکی برای تولید اشعه X.

۴- در صنایع برای فیلتر کردن دود خروجی نیروگاه‌های حرارتی و کارخانجات سیمان و پاشیدن رنگ: ذرّات آلوده در بین الکترودهای فلزی میدان الکتریکی به‌صورت ذرّات باردار درمی‌آیند و با سرعت به سمت الکترودهای مذکور جذب می‌شوند. این الکترودها در مسیر دودکش خروجی نصب می‌گردند و بدین وسیله، از ورود ذرّات آلوده به هوای آزاد جلوگیری می‌شود. در رنگ‌آمیزی الکترواستاتیکی نیز ذرّات رنگ به‌صورت ذرّات باردار، با سرعت روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شوند. از ویژگی‌های این نوع رنگ‌آمیزی، 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 علّت ظرفیت خازنی نسبتاً بالای کابل‌های با طول زیاد، جریان زیادی نیاز می‌باشد. همچنین تخلیه‌های مکرر در حفره‌های داخلی احتمالی، باعث کاهش درجهٔ 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 شدّت میدان درون عایق می‌باشد.



شکل (۸-۱): سیستم یکسوساز در خطوط HVDC

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، تریستورهای فشار قوی با تحمّل ولتاژ بالاتری ساخته شده است که در یکسوکننده‌های خطوط مورد نظر به‌کار می‌رود. در سال ۱۹۷۲، تریستورهای تا قدرت ۷۰kW و در سال ۱۹۸۳ با قدرت ۱۰۰۰kw ساخته شده است. در خطوط انتقال HVDC، عموماً از یکسوکننده‌های ۱۲ پالس[۱۱] استفاده می‌شود تا اعوجاج ولتاژ خروجی بسیار کم باشد. شکل کلّی این مدارها به‌صورت شکل (۸-۱) می‌باشد. مقدار راکتورهای سری در حدود ۰/۴ تا ۱H می‌باشد که برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و جریان و محدود کردن جریان یکسوکننده‌ها در هنگام وقوع اتّصال کوتاه در خطّ انتقال HVDC به‌کار می‌رود. این خطوط، معمولاً به‌صورت دو سیمی استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها مثبت و دیگری منفی می‌باشد و اصطلاحاً به‌نام خطوط DC دوقطبی 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.

مزایای استفاده از خطوط HVDC

استفاده از خطوط HVDC مزایای زیر را به‌همراه 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 حدّاقل به سه هادی نیاز است. میزان قدرت و جریان انتقالی در خطوط AC و DC به‌شکل زیر تعیین می‌شوند:

$$P_{AC} = \sqrt{۳} V I_{AC} \cos\phi$$

$$I_{AC} = \frac{P_{AC}}{\sqrt{۳} V \cos\phi} \qquad (۱-۸)$$

$$P_{DC} = ۲ V I_{DC}$$

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{۲ V} \qquad (۲-۸)$$

قابلیّت 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 خطّ HVDC نیاز به فضای کم‌تری نسبت به خطّ HVAC مشابه دارد و در نتیجه نیاز به پایه‌های کوچکتری است. بنابراین، هزینهٔ نصب خطوط هم کاهش می‌یابد.

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

حدّاکثر دامنهٔ ولتاژ هر سیم در سیستم AC $= \frac{\sqrt{۲}}{\sqrt{۳}} V_{L\text{-}L} = ۰/۸ V_{L\text{-}L}$ (۳-۸)

حدّاکثر ولتاژ هر سیم در سیستم DC $= \frac{۱}{۲} V_{L\text{-}L} = ۰/۵ V_{L\text{-}L}$ (۴-۸)

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

۳- مسئلهٔ حفظ سنکرونیزم بین دو سیستم AC که به‌وسیلهٔ یک خطّ HVDC به هم متّصل شده‌اند، وجود ندارد. همچنین نیازی به یکسان بودن فرکانس‌های دو شبکهٔ AC که با خطّ DC متّصل شده‌اند، نمی‌باشد.

۴- قدرت انتقالی از یک خطّ DC را می‌توان به راحتی توسّط تریستورهای یکسوکنندهٔ آن کنترل نمود و در یک مقدار معیّن، ثابت نگه داشت.

۵- اگر در یکی از دو شبکهٔ AC که با یک خطّ DC به هم متّصل شده‌اند، اتّصال کوتاهی رخ دهد، جریان اتّصال کوتاه به شبکهٔ دیگر منتقل نمی‌شود؛ زیرا عموماً جریان اتصال کوتاه، یک جریان رأکتیو است که در سیستم DC، جریان راکتیو منتقل نمی‌شود ($\cos\phi = ۱$).

۶- تلفات خطوط HVDC کم‌تر از خطوط HVAC است؛ زیرا اوّلاً $R_{dc} < R_{ac}$ 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 به‌سبب حالت‌های گذرای موجود در این خطوط، باید زاویهٔ 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. امّا در خطوط HVDC محدودیت پایداری وجود نخواهد داشت.

لازم به‌ذکر است که هزینهٔ خطوط HVDC، به دلیل هزینهٔ بالای مبدل‌های AC/DC و DC/AC بسیار زیاد است، ولی برای خطوط طولانی بین ۶۰۰-۹۰۰km و قدرت‌های بیش از ۱۰۰۰MW، هزینه‌های خطوط DC کم‌تر از خطوط AC خواهد بود. این موضوع برای کابل‌های DC با ارقام کم‌تری مواجه است، به‌طوری که برای فاصله‌های بیش از ۵۰-۱۰۰km اقتصادی‌تر است. یک نمونه از خطّ HVDC، بین ایالت اورگان و لوس‌آنجلس در کشور آمریکا به‌طول ۱۳۷۰km و ولتاژ ۸۰۰kV به‌کار برده شده است که قدرت انتقالی آن، ۱۴۴۰MW می‌باشد.

تعریف ولتاژ DC

طبق استاندارد IEEE و IEC مقدار DC یک ولتاژ به‌صورت متوسّط 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:

$$\bar{V} = \frac{1}{T}\int_{0}^{T} V(t)\,dt \qquad (۵-۸)$$

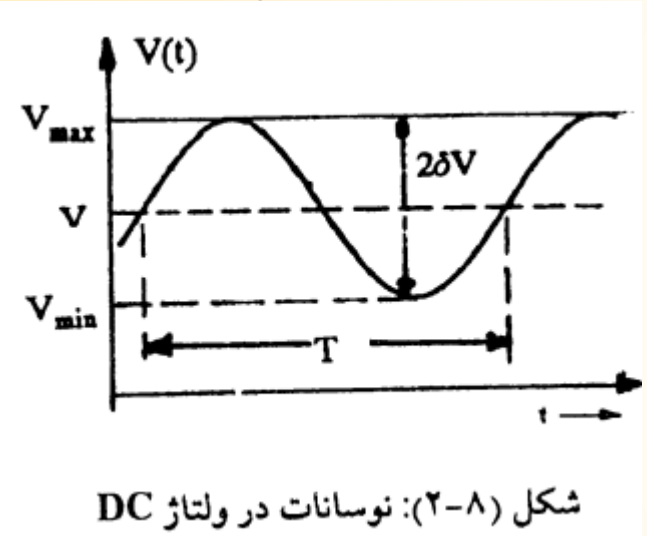
اگر ولتاژ $V(t)$ به یک عایق اعمال گردد، مرتّباً مقدار آن حول مقدار متوسّط $\bar{V}$ نوسان می‌کند؛ یعنی این موج دارای یک اعوجاج با دامنهٔ δV است که:

$$\delta V = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \qquad (۶-۸)$$

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

$$\text{ضریب اعوجاج} = \frac{\delta V}{\bar{V}} \qquad (۷-۸)$$

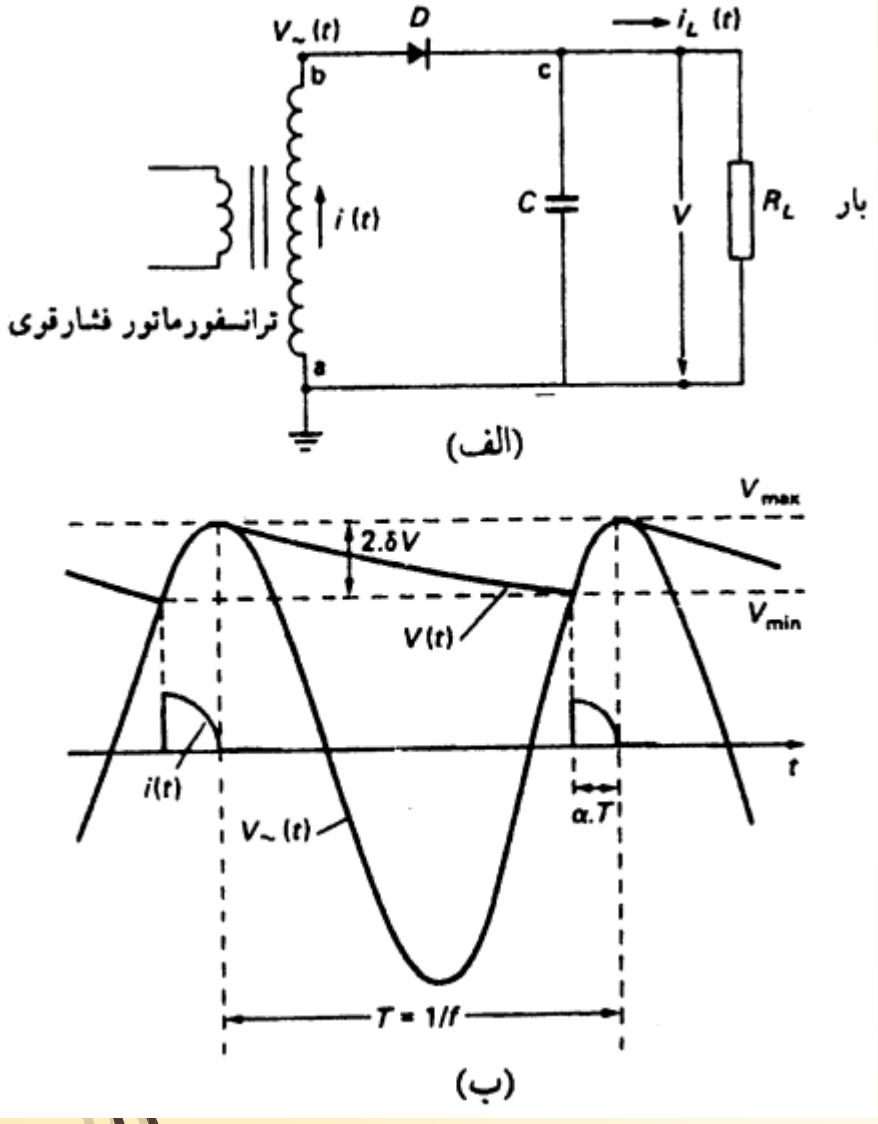
برای ولتاژهای DC فشار قوی، ضریب اعوجاج نباید از مقدار ۵٪ بیشتر باشد.



شکل (۸-۲): نوسانات در ولتاژ DC

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 مولّدهای DC با ولتاژ زیاد استفاده می‌شود. یکی از روش‌های تولید ولتاژهای DC، استفاده از یکسوکننده‌های نیم‌موج یا تمام‌موج است. البته ولتاژ DC تولید شده توسّط یکسوکننده‌ها، همواره از مقدار حدّاکثر ولتاژ AC تغذیه کنندهٔ آن‌ها کم‌تر است. برای تولید ولتاژ DC بالاتر، از مدارهای چند برابرکنندهٔ ولتاژ DC استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح تولید ولتاژهای فشار قوی DC خواهیم پرداخت.



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 پراکندگی 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 $(R_L \to \infty)$، ولتاژ DC که در دو سر خازن قرار می‌گیرد، در مقدار $+V_{max}$ ثابت می‌ماند. در این مدار، باید دیود D، تحمّل ولتاژ معکوس $2V_{max}$ را داشته باشد.

اگر مدار از طریق R_L بارگیری شود، ولتاژ V ثابت نمی‌ماند و طی دورهٔ T، مقدار بار Q به R_L منتقل می‌شود.

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

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

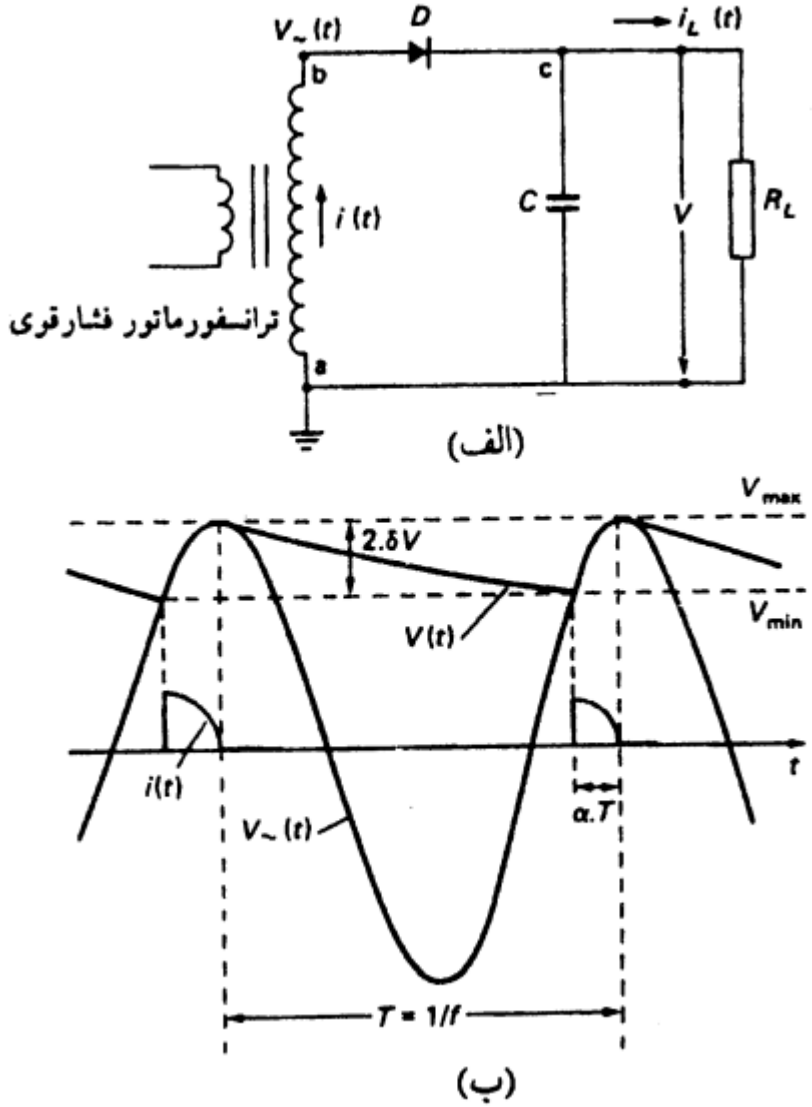
$$Q = \int_{\alpha T} i(t)\cdot dt = \int_T i_L(t)\cdot dt \qquad (۸-۹)$$

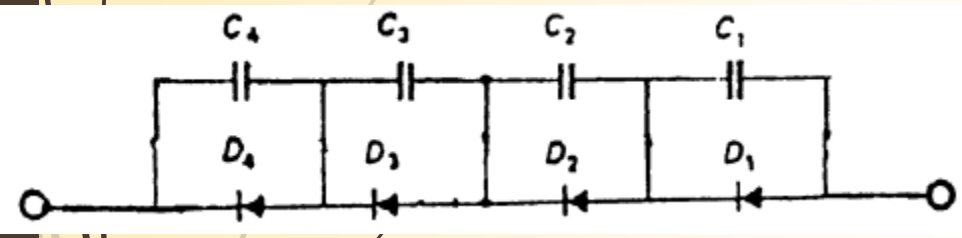
جریان $i(t)$، جریان ثانویّهٔ ترانسفورماتور است. چون $\alpha T < T$ است، بنابراین، دامنهٔ جریان $i(t)$ بزرگ‌تر از جریان $i_L(t)$ است. دامنهٔ اعوجاج δV را می‌توان دقیقا در دورهٔ تخلیهٔ $T-\alpha T$ محاسبه نمود. برای مدار موجود و با صرف‌نظر کردن از افت ولتاژ دو سر ترانسفورماتور و دیود و با فرض $\alpha \cong 0$ خواهیم داشت:

$$Q = 2 \times \delta V\cdot C = I\cdot T \qquad (۸-۱۰)$$

$$\delta V = \frac{I\cdot T}{2C} = \frac{I}{2fC} \qquad (۸-۱۱)$$

این رابطه، ارتباط بین ضریب اعوجاج، جریان بار و پارامترهای مدار (f و C) را نشان می‌دهد. حاصل‌ضرب $f.C$ در طرّاحی این مدار بسیار مهم است.





برای عایق‌ها، مقدار R_L خیلی زیاد است. به‌همین 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 اوّلیهٔ ترانسفورماتور را قطع کند یا یک مقاومت خیلی بزرگی را سریعاً در ثانویّهٔ مدار ترانسفورماتور قرار دهد. همچنین دیود D باید بتواند این جریان زیاد را برای چند لحظه تحمّل کند.

مدار مذکور در محدوده‌های مگاولت هم ساخته شده است. در ضمن، دیود یکسوکننده D از نوع سیلیکونی است تا جریان‌های بالا را تحمّل کند. با توجّه به این‌که بیشترین ولتاژ قابل تحمّل به‌صورت معکوس برای هر دیود حدّاکثر ۲/۵kV است، بنابراین، برای تولید ولتاژهای فشار قوی بالا، چندین دیود را با هم سری می‌کنند. در این حالت، ممکن است به دلیل این‌که مشخّصات دیودها از نظر ساختمان کاملاً یکسان نیستند، در نتیجه، توزیع ولتاژ روی آن‌ها به‌طور یکنواخت صورت نمی‌گیرد و ممکن است روی یکی از دیودها، ولتاژ بیش از حدّ تحمّل آن واقع شده و از بین برود و بالطبع بقیهٔ 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.

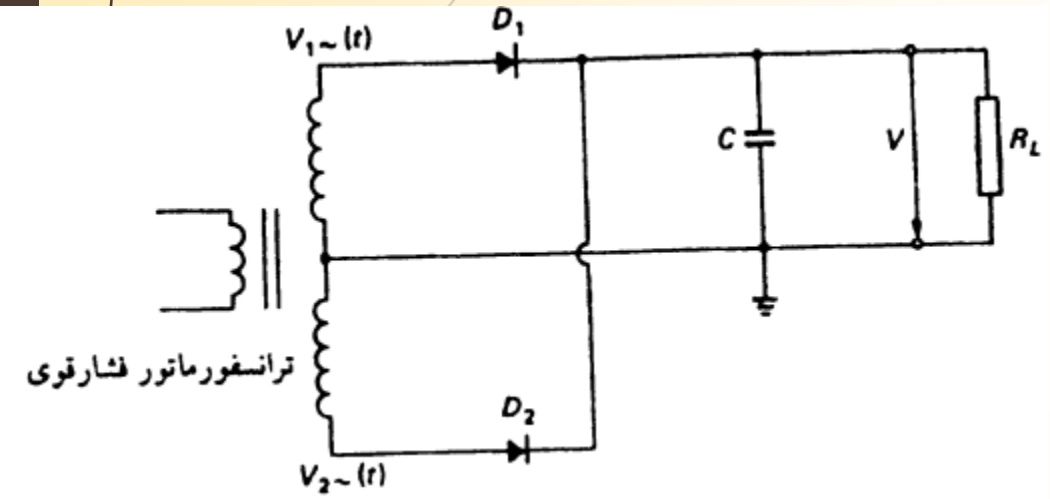
یک نمونه از این یکسوساز که برای یک مدار مولّد ولتاژ DC، ۱/۲MV ساخته شده است، دارای دیودهایی است که طول مجموع آن‌ها ۱۲m است. عیب مدار یکسوکننده نیم‌موج این است که ممکن است ترانسفورماتور در اثر کشیدن جریان زیاد به حالت اشباع برسد (با توجّه به کوتاه بودن زمان روشن بودن دیود و انتقال بار Q از آن). برای غلبه بر این مشکل، می‌توان از مدار یکسوساز تمام‌موج استفاده نمود.

یکسوساز تمام‌موج

مدار یکسوساز تمام‌موج مطابق شکل (۸-۵) 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:

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

در صورتی که دامنهٔ ولتاژهای $V_{1\sim}(t)$ و $V_{2\sim}(t)$ دقیقاً مساوی هم نباشند، اعوجاج شکل موج، خیلی زیادتر خواهد شد. از این‌رو، عموماً از همان مدار یکسوساز نیم موج استفاده می‌شود.



مدارهای چند برابر کنندهٔ ولتاژ DC

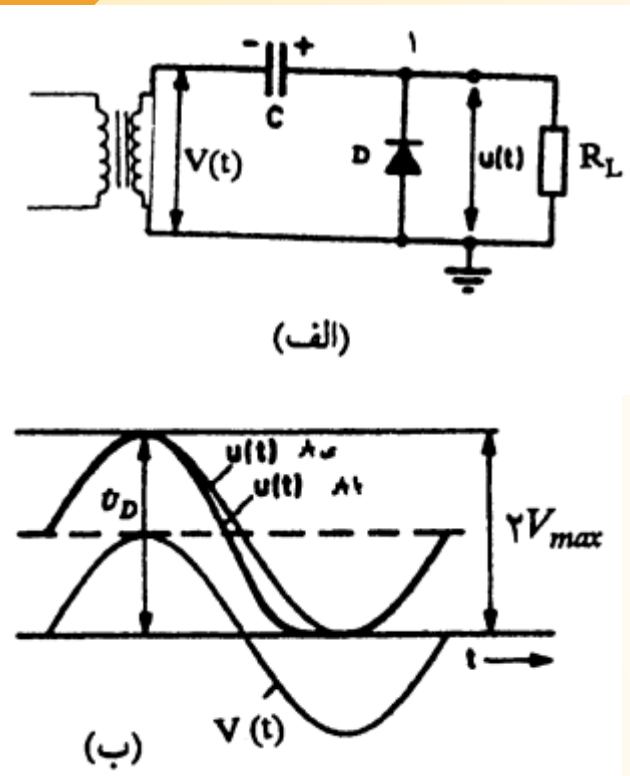
در مدار یکسوساز نیم‌موج و تمام‌موج، ولتاژ DC خروجی در بارگیری، کمی کم‌تر از مقدار حدّاکثر ولتاژ AC ترانسفورماتور است و از آن برای تولید ولتاژهای بالای DC حدّاکثر تا ۲۰۰kV استفاده می‌کنند. برای تولید ولتاژهای بالاتر از این مقدار، از چندبرابرکننده‌های ولتاژ استفاده می‌شود. اساس دستگاه‌های تولید فشار قوی DC با استفاده از چندبرابرکننده‌های ولتاژ، بر طبق مدار دوبرابرکنندهٔ ولتاژ ویلارد قرار دارد.

مدار ویلارد[1]

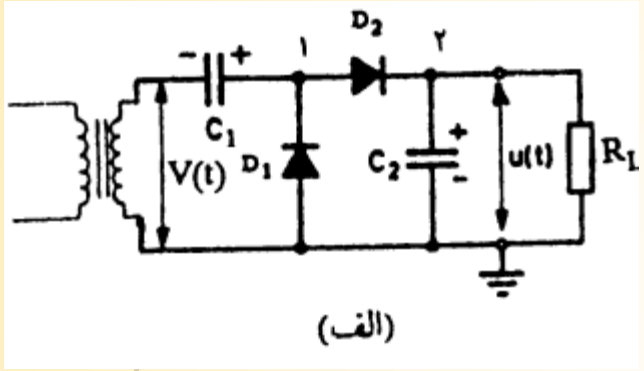
اساس این مدار مطابق شکل (۸-۶) می‌باشد. در نیم سیکل منفی، موج ولتاژ ثانویّهٔ ترانسفورماتور، خازن C را از طریق دیود D به‌مقدار V_{max} شارژ می‌کند.

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

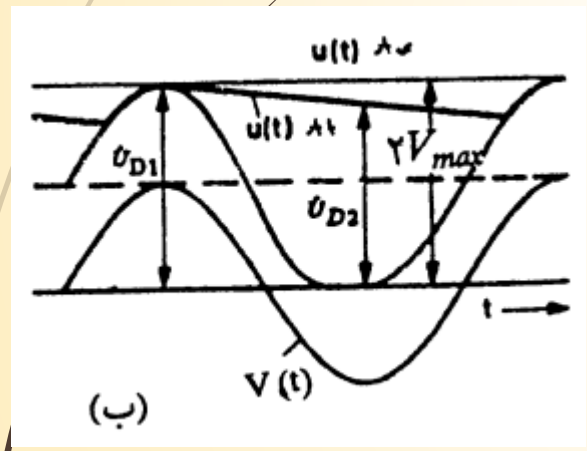
در نیم سیکل مثبت بعدی، موج ولتاژ $V(t)$ روی مقدار V_{max} قرار گرفته و ولتاژ نقطهٔ ۱ به دو برابر ولتاژ V_{max} خواهد رسید؛ ولی در نیم‌سیکل بعد از آن‌که دیود D دوباره جریان را هدایت می‌کند به صفر هم می‌رسد. بدین ترتیب یک دو برابر کنندهٔ ولتاژ به‌دست می‌آید که ولتاژ نقطهٔ ۱ ، موجی است که بین مقدار صفر تا $۲V_{max}$ تغییر



1- *Villard*



(الف)



(ب)

می‌کند. اگر مقاومت R_L بی‌نهایت باشد، در مقدار حدّاکثر منفی ولتاژ ثانویهٔ ترانسفورماتور، ولتاژ خروجی به صفر می‌رسد و در غیر این‌صورت، زودتر به صفر می‌رسد. حال برای ثابت نگهداشتن ولتاژ دو سر بار یک یکسوکنندهٔ نیم‌موج در نقطهٔ ۱ قرار می‌دهیم. در حقیقت به جای ترانسفورماتور یکسوساز نیم‌موج، از یک مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ ویلارد استفاده می‌کنیم (مطابق با شکل ۸-۷). به این ترتیب، ولتاژ نقطهٔ ۲ به دو برابر مقدار V_{max} یعنی $۲V_{max}$ خواهد رسید. اگر بار R_L وجود نداشته باشد ($R_L=\infty$)، ولتاژ نقطهٔ ۲ ثابت و به‌مقدار $۲V_{max}$ خواهد بود. در این مدار، دیودهای $D_۱$ و $D_۲$ باید توانایی تحمّل ولتاژ معکوس $۲V_{max}$ را داشته باشد؛ زیرا ولتاژ نقطهٔ ۱ در زمانی به صفر می‌رسد، ولی ولتاژ نقطهٔ ۲ در $۲V_{max}$ ثابت خواهد ماند. این موضوع، برای دیود $D_۱$ هم صادق خواهد بود؛ زیرا با توجّه به زمین بودن پایین دیود، ولتاژ نقطهٔ ۱ تا $۲V_{max}$ هم خواهد رسید. اگر مقاومت بار R_L بی‌نهایت نباشد، ولتاژ خروجی دارای اعوجاج خواهد بود. همانند مدار یکسوساز نیم‌موج، اعوجاج برابر $\delta V=\frac{I}{۲fC_۲}$ می‌شود که I جریان DC بار است.