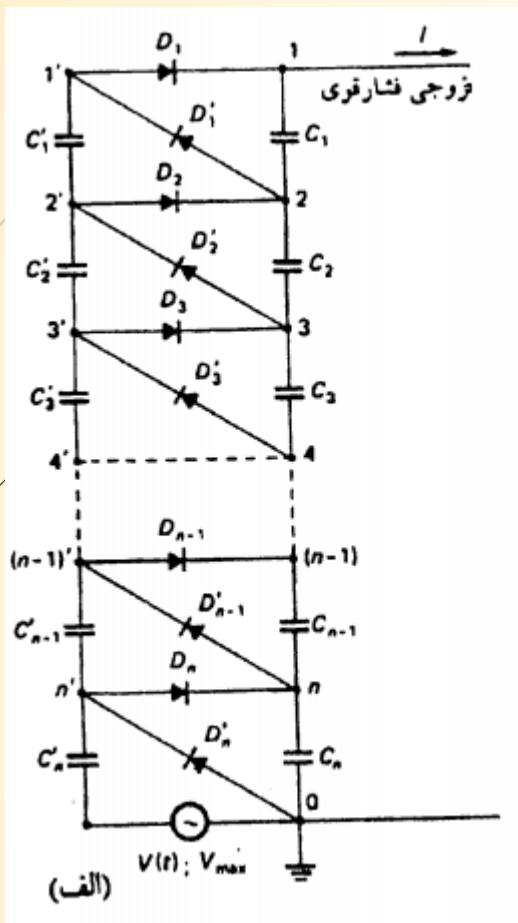


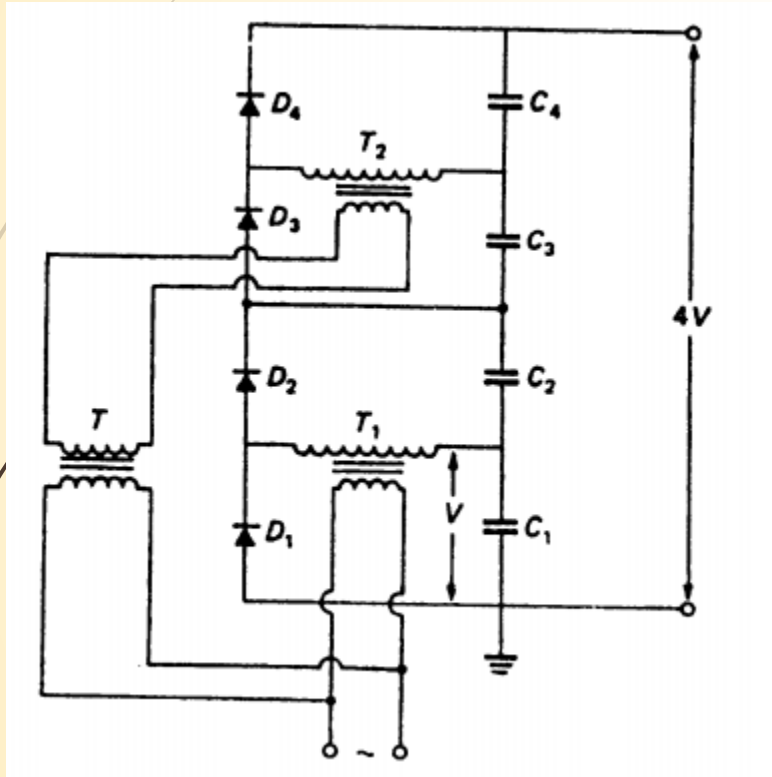
به نام خدا

عایق و فشار قوی

فصل پنجم تولید ولتاژهای فشارقوی



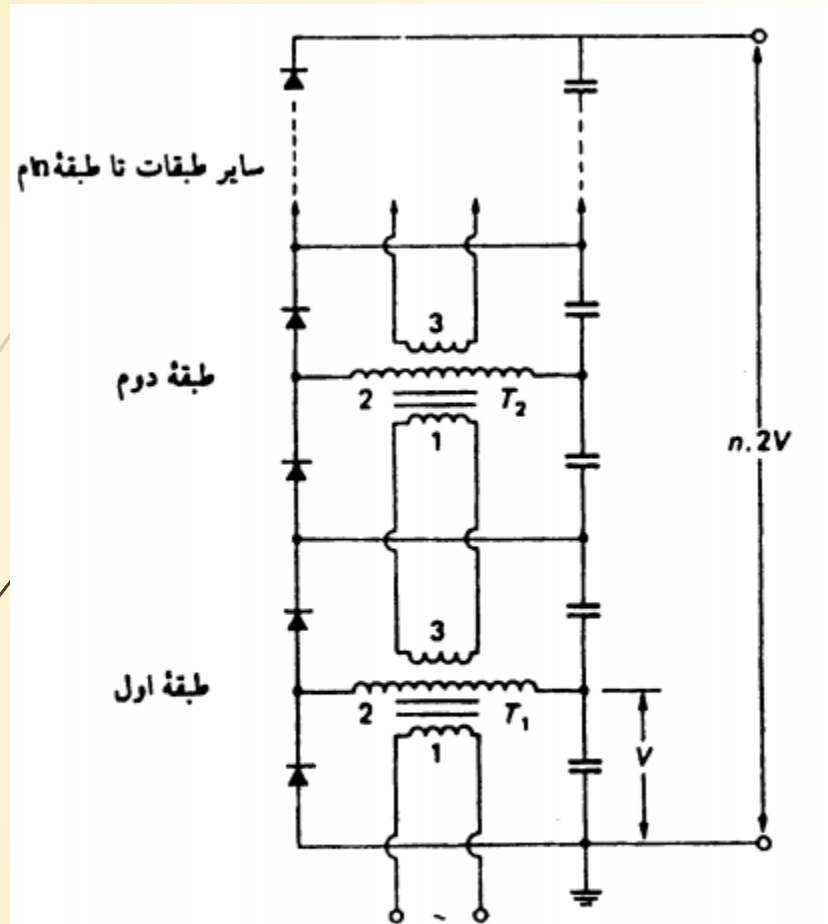
در سال ۱۹۲۰، توسط گرایناخر^(۲) مداری برای تولید ولتاژهای بالای DC ارائه شد، که در سال ۱۹۳۲، کوکرافت^(۱) و والتن آن را بهبود بخشیدند. این مدار که عملاً نوع گسترش یافته‌ای از مدار دو برابر کننده ولتاژ است در شکل (۸-۸-الف) نشان داده شده است که از آن می‌توان تا ولتاژهای ۴، ۶، ۸، ... و ۲n برابر را به دست آورد. چنان که از شکل (۸-۸) پیدا است، اولین پله مدار (قسمت $0-n-n'-V(t)$) همان مدار دو برابر کننده ولتاژ است.



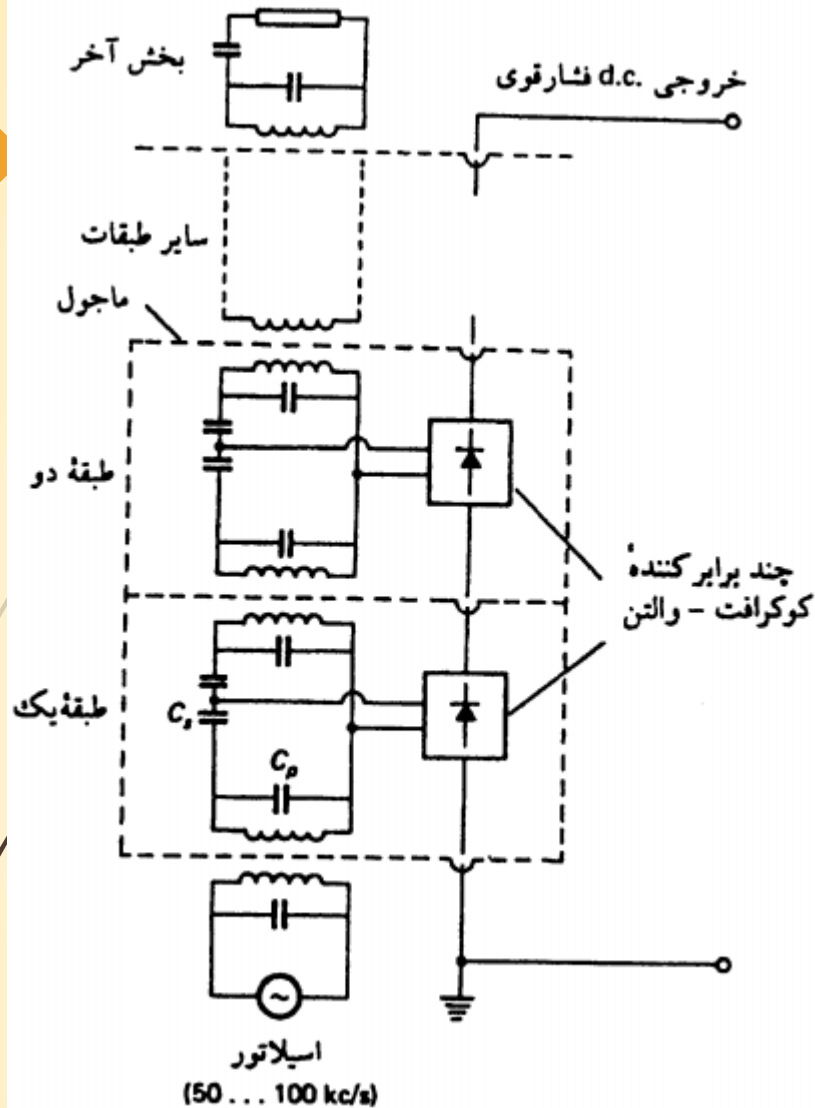
2- Allibone

در مدار چند برابرکننده ولتاژ کوکرافت (والتن)، مقدار توان خروجی مدار محدود است. هنگامی که برای تولید ولتاژ فشار قوی به ترانسفورماتورهای زیاده‌تری نیاز است، می‌توان با سری کردن مدارهای یکسوکننده‌ای که هر کدام، منبع تغذیه AC جداگانه و مربوط به خود را دارند، استفاده کرد. شکل (۸-۱۱) یک نمونه از چنین مداری را که توسط آلیون ارائه شده، نشان می‌دهد. این مدار در مواردی که نیاز به ولتاژ خروجی بزرگتری بدون امکان تغییر سطح ولتاژ ترانسفورماتور ورودی باشد، به کار می‌رود. دیودهای D_1 و D_2 و ترانسفورماتور T_1 همراه با خازن‌های C_1 و C_2 ، ولتاژ خروجی $2V_{max}$ را (مانند حالت قبل) به وجود می‌آورند. با تکرار این مدار به صورت سری یا زنجیره‌ای، ولتاژ خروجی به $4V_{max}$ می‌رسد. T یک ترانسفورماتور ایزوله‌کننده برای جداکردن $2V_{max}$ از زمین است. بنابراین، ترانسفورماتور T_2 در پتانسیل $2V_{max}$ نسبت به زمین قرار دارد. بدون استفاده از ترانسفورماتور ایزولاسیون، مسئله عایق‌بندی ترانسفورماتورهای پله‌های بعدی در برابر ولتاژ DC بسیار مشکل می‌شود.

با انتخاب مقادیر مساوی برای خازن‌ها، توزیع پتانسیل برای دیودها یکنواخت خواهد بود. این مدار به علت نیاز هر پله به یک ترانسفورماتور ایزولاسیون، برای تعداد بیش از دو پله اقتصادی نیست. بنابراین، در مدارهایی با تعداد پله‌های بیشتر، از ترانسفورماتورهای ویژه‌ای استفاده می‌شود. چنین مداری در شکل (۸-۱۲) نشان داده شده است. ترانسفورماتور هر پله از سه سیم‌پیچ اولیه ۱ (فشار ضعیف)، ثانویه ۲ (فشار قوی) و سیم‌پیچ ثالثیه ۳ (فشار ضعیف) تشکیل می‌شود. از سیم‌پیچ سوم هر پله برای تحریک اولیه ترانسفورماتور پله بعدی استفاده می‌شود؛ بدین ترتیب عایق‌بندی مورد نیاز ولتاژ DC، روی ترانسفورماتورهای پله‌های مختلف تقسیم می‌شود. این نکته روشن است که در این مدار، انرژی همه پله‌ها باید از ترانسفورماتور پایینی تأمین شود. بنابراین، باز هم محدودیت تعداد پله‌ها وجود خواهد داشت؛ چرا که در این حالت، ترانسفورماتور اولی، کل بار ترانسفورماتورهای دیگر طبقات را به عهده داشته و امکان اشباع شدن آن بسیار زیاد است.



شکل (۸-۱۲): مدار اصلاح شده آلیون



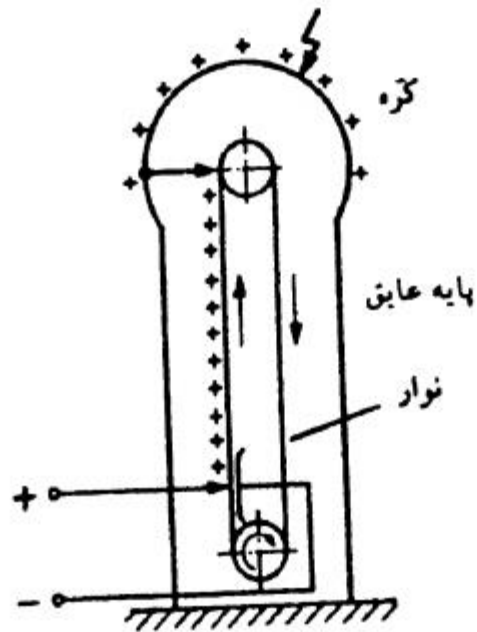
مدار دیگری که در تولید ولتاژ فشار قوی DC به کار می رود، مدار انجرتون است. طرح کلی این مولد در شکل (۸-۱۳) نشان داده شده است. اگر چه این ژنراتور، از نظر توان خروجی به حدود ۱MV و چند میلی آمپر محدود می شود، ولی ضریب ناهمواری بسیار کوچک، پایداری زیاد، تنظیم سریع و انرژی ذخیره شده کم آن، از مزیت های اساسی این مولد می باشد.

ژنراتورها از اتصال سری ترانسفورماتورها تشکیل می شوند. این ترانسفورماتورها با خازن های سری C_s تزویج شده اند تا این خازن ها در فرکانس های بالای منبع، بخش عمده ای از اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتورها را جبران کنند. به علاوه به موازات هر یک از سیم پیچ های اولیه و ثانویه، خازن C_p متصل می شود که جبران سازی جریان مغناطیس کنندگی را به عهده دارد. در انتهای زنجیره و کامل ترانسفورماتورها، یک بار مقاومتی متصل شده است. از این رو شبکه، مشابه خط خاتمه یافته ای است که در راستای آن، یک ولتاژ AC، تقریباً ثابت می ماند و فقط دارای یک اختلاف فاز بین ورودی (منبع تغذیه فرکانس بالا) و خروجی (خاتمه) است. بنابراین، ترانسفورماتورها برای افزایش ولتاژ AC به کار نرفته اند.

اکنون این امکان وجود دارد که به هر طبقه، یک مدار والتن متصل شود و در هر طبقه با اعمال ولتاژ ورودی کوچک (در حدود چند کیلو ولت)، ولتاژهای خروجی بزرگی (در حدود چند ده کیلو ولت) حاصل شود. در آن صورت، خروجی مدارهای والتن که به صورت ولتاژ DC هستند، با هم سری می شوند. واحدهایی از این مدار، تا ۲۵

طبقه هم ساخته شده اند. لازم به ذکر است که فرکانس ورودی منبع هم، از ۵۰ تا ۱۰۰ kHz قابل تغییر است.

مولدهای الکترواستاتیکی، انرژی مکانیکی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. اصول کار مولدهای الکترواستاتیکی بر مبنای روش انتقال بارهای الکتریکی است که با کمک آنها می‌توان ولتاژهایی تا حدود ۵ مگاولت را در حالت بی‌باری به دست آورد. در این مولدها بارهای الکتریکی در خلاف جهتی که میدان الکتریکی بر آنها نیرو وارد می‌کند، رانده می‌شوند. برای این کار از انرژی مکانیکی استفاده می‌شود. یکی از انواع این مولدها، مولد واندوگراف^(۱) است که می‌تواند ولتاژهایی در حدود ۶MV را تولید کند و از آن در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای هم استفاده می‌شود. متأسفانه این مولدها در ولتاژهای بالا، قادر به تأمین جریان باری بیش از ۲۵۰mA نیستند و با افزایش این جریان، ولتاژ خروجی سریعاً افت می‌کند. به همین جهت از این نوع مولدها در کارهای تحقیقاتی به‌ویژه در فیزیک هسته‌ای برای تأمین ولتاژ DC شتاب دهنده‌های ذرات استفاده می‌شود.



شکل (۸-۱۵): ساختمان ژنراتور الکترواستاتیک واندوگراف

اساس این مولد DC در شکل (۸-۱۵) نشان داده شده است. در این مدار، به وسیله یک منبع ولتاژ DC، در اثر کرونای ایجاد شده در نوک یک سوزن، بار الکتریکی روی تسمه دوار عایق پاشیده می شود (ولتاژ منبع از ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوولت می باشد). این تسمه به وسیله یک موتور با سرعت v چرخانده می شود. در محور بالایی، این ذرات باردار به وسیله یک میله نوک تیز جارو شده و به سطح الکتروود فلزی کروی شکل منتقل می شوند. در اثر تجمع ذرات باردار روی سطح الکتروود، یک پتانسیل نسبت به زمین ایجاد می شود که با اضافه شدن ذرات باردار، پتانسیل مذکور اضافه می شود.

اگر ظرفیت خازنی بین الکتروود فلزی کروی و زمین به مقدار C باشد و مقدار بار جمع شده روی سطح کره Q باشد، آنگاه پتانسیل ایجاد شده برابر است با:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (۸-۲۴)$$

اگر ژنراتور DC مذکور به یک مصرف‌کننده متصل شود و جریان بار مصرفی، با بار جمع شده روی الکتروود، در هر لحظه برابر باشد، آنگاه ولتاژ ثابت می‌ماند. در صورتی که تسمه با سرعت v m/s بچرخد و چگالی بار سطحی تسمه هم برابر σ clumb/m² باشد و پهنای تسمه هم برابر b باشد، در آن صورت، جریان شارژ بار الکتریکی توسط تسمه به الکتروود برابر است با:

$$I = \sigma b v \quad (25-8)$$

همچنین مقدار بار جمع شده در مدت زمان t ثانیه برابر است با:

$$Q = I \cdot t \quad (26-8)$$

الکتروود فلزی باید به قدری بزرگ باشد که شدت میدان الکتریکی روی سطح کره خیلی زیاد نشود و کرونا و تخلیه الکتریکی جزئی اتفاق نیفتد تا از افزایش ولتاژ

الکتروود جلوگیری نکند. همچنین نیروی وارد بر تسمه‌ها باید به قدری باشد که باعث لرزش تسمه‌ها نگردد. بدین منظور، ابتدا نیروی وارد بر تسمه را محاسبه می‌کنیم.

$$dq = \sigma b \cdot dx$$

$$dF = E(x) \cdot dq = E(x) \sigma b \cdot dx$$

در نتیجه، نیروی وارد بر تسمه برابر است با:

$$F = \int E(x) \sigma b \cdot dx = \sigma b \int E(x) dx = \sigma b V$$

در این روابط، S طول تسمه و b ضخامت آن است. در صورتی که سرعت موتور برابر

$$v = \frac{dx}{dt} = cte$$

باشد، آنگاه توان موتورها برابر خواهد بود با:

$$P = F \cdot v = \sigma b V v$$

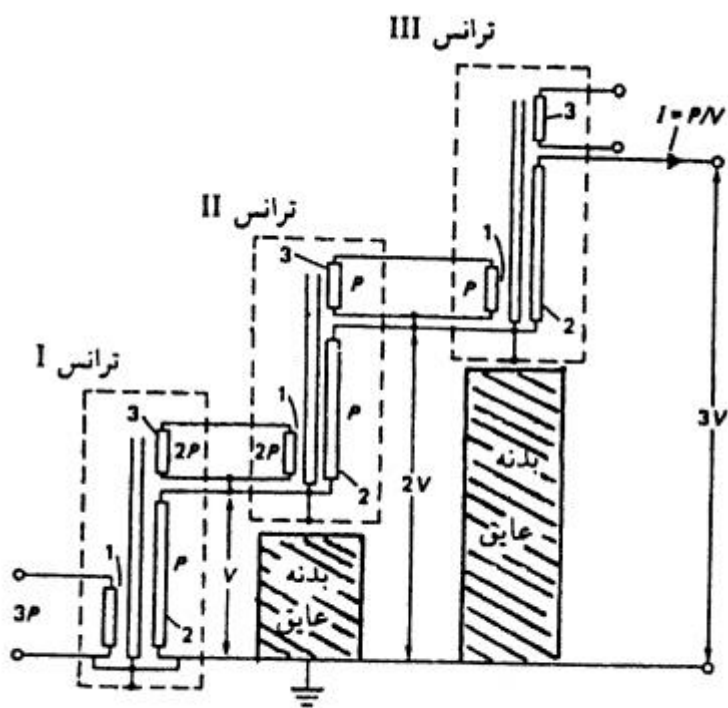
لازم به ذکر است که ولتاژ تولیدی این مولدها بسیار زیاد است ولی قدرت خروجی آنها بسیار کم می‌باشد و می‌توانند بارهای با جریان مورد نیاز خیلی کم را تغذیه کنند. اگر مقاومت بار متصل به الکتروود، برابر R باشد و ولتاژ الکتروود کروی شکل مولد، برابر V باشد، آنگاه جریان شارژ بار برابر است با:

$$I = \frac{V}{R}$$

(۲۷-۸)

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.

برای تولید ولتاژهای تا حدود 300 kV از یک ترانسفورماتور افزایشدهنده ولتاژ تک فاز با امپدانس کم تر از 5% استفاده می شود. با تنظیم ولتاژ فشار ضعیف متغیر ورودی، ولتاژ فشار قوی دلخواه از خروجی آن به دست می آید. برای تولید ولتاژهای بالاتر از 300 kV ، استفاده از یک ترانسفورماتور تک فاز به دلیل وزن زیاد، غیر قابل حمل بودن، نصب مشکل و همچنین هزینه عایق بندی زیاد، عملی نبوده و بنابراین، از چند طبقه ترانسفورماتور یا اصطلاحاً ترانسفورماتورهای سری استفاده می شود. ترانسفورماتورهای سری از چند ترانسفورماتور جداگانه که هر کدام دارای سه سیم پیچ اولیه (۱)، ثانویه با ولتاژ فشار قوی (۲)، و سیم پیچ تحریک (۳) هستند، تشکیل می شوند. شکل (۸-۱۷) چنین ترانسفورماتورهایی را که به صورت سری قرار گرفته اند نشان می دهد.



شکل (۸-۱۷): یک نمونه مدار سه طبقه ترانسفورماتورهای سری

اولین ترانسفورماتور (I) در پتانسیل زمین قرار دارد و اختلاف پتانسیل سیم پیچ ثانویه آن نسبت به زمین V است. ترانسفورماتور دوم (II) روی یک تکیه گاه عایقی قرار دارد و بدنه آن نسبت به زمین دارای اختلاف پتانسیل V و سیم پیچ ثانویه آن دارای اختلاف پتانسیل $2V$ نسبت به زمین می باشد. به همین ترتیب بدنه ترانسفورماتورهای بعدی با زمین، اختلاف پتانسیل های $3V, 4V, \dots, (n-1)V$ ، و سیم پیچ ثانویه آنها ولتاژ V نسبت به بدنه و ولتاژهای $3V, 4V, \dots, nV$ را نسبت به زمین دارند که n ، تعداد ترانسفورماتورهاست. لازم به ذکر است، همان گونه که از شکل (۸-۱۷) پیداست، سیم پیچ ثانویه و اولیه هر یک از ترانسفورماتورها در انتها به بدنه، اتصال الکتریکی دارد.

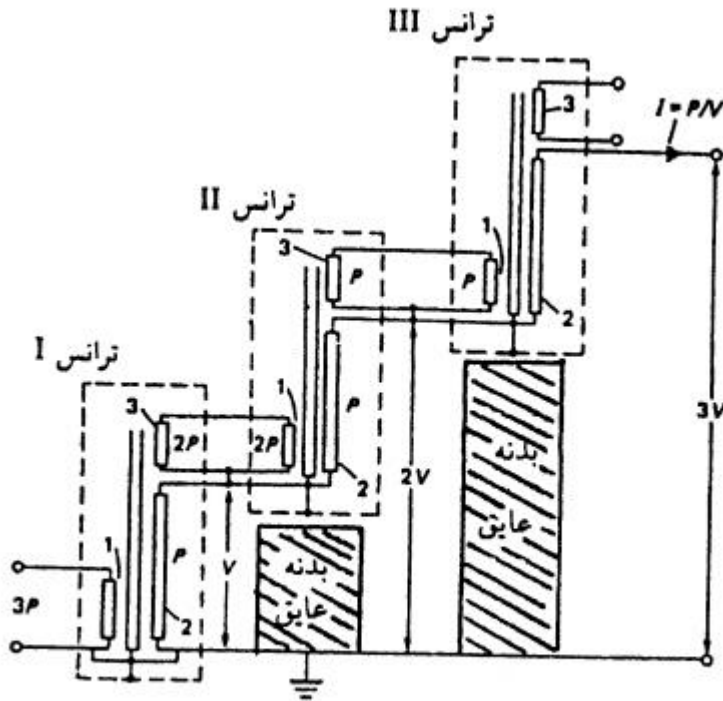
سیم پیچ اولیه هر ترانسفورماتور، از طریق سیم پیچ تحریک ترانسفورماتور قبلی تغذیه می شود. سیم پیچ تحریک هر ترانسفورماتور ممکن است با سیم پیچ ثانویه آن سری باشد. معمولاً همه ترانسفورماتورها از یک نوع هستند و دور سیم پیچ های اولیه هر یک با سیم پیچ تحریک ترانسفورماتور قبلی یکسان است. اتصال این دو سیم پیچ بین ترانسفورماتورها از طریق بوشینگ ها انجام می شود.

ولتاژ تغذیه اولین ترانسفورماتور معمولاً ولتاژ عادی شبکه مثلاً $220V$ است؛ گرچه در ولتاژهای بالا گاهی از ولتاژهای تا $10kV$ هم برای تغذیه اولین ترانسفورماتور استفاده می شود. از مزایای ترانسفورماتورهای سری، قابلیت جدا کردن آنها از یکدیگر و همچنین اتصال تعداد دلخواهی از آنها برای دستیابی به ولتاژهای مختلف می باشد. همچنین، حمل و نقل و نصب آنها نیز راحت می باشد. این ترانسفورماتورها را می توان به صورت موازی هم به یکدیگر وصل کرد و جریان های بالاتری به دست آورد. از معایب این نوع مولدها می توان تقسیم غیریکنواخت قدرت را روی آنها نام برد.

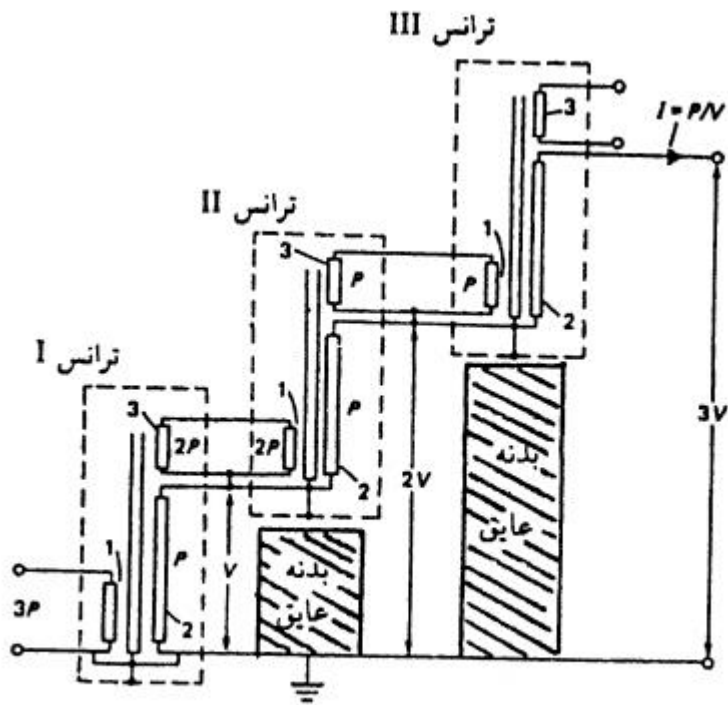
در شکل (۸-۱۷) حاصل ضرب جریان در ولتاژ هر سیم پیچ با P نشان داده شده است. در این شکل، ترانسفورماتورهای سری از سه ترانسفورماتور I و II و III تشکیل شده است و قدرت خروجی آن $3P$ است. در سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور III مقدار جریان عبارت است از:

$$I = \frac{3P}{3V} = \frac{P}{V}$$

پس بار P باید از طریق اولیه آن تأمین شود. از طرفی اولیه ترانسفورماتور III، بار P را از طریق سیم پیچ تحریک ترانسفورماتور II تأمین می کند. ثانویه ترانسفورماتور II هم، بار P را به ثانویه ترانسفورماتور III تحویل می دهد. پس اولیه ترانسفورماتور II باید بار $2P$ را تأمین کند، و سرانجام بار $2P$ از سیم پیچ تحریک ترانسفورماتور I تأمین می شود. ثانویه این ترانسفورماتور هم بار P را به ثانویه ترانسفورماتور II تحویل می دهد. پس اولیه ترانسفورماتور I باید بار $3P$ را تأمین کند. بنابراین، ترانسفورماتور I باید سه برابر بار ترانسفورماتور III را تحمل کند، در نتیجه بالطبع، باید سیم پیچ ها و عایق بندی آنها برای چنین باری مناسب باشند.



شکل (۸-۱۷): یک نمونه مدار سه طبقه ترانسفورماتورهای سری



شکل (۸-۱۷): یک نمونه مدار سه طبقه ترانسفورماتورهای سری

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

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

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

که جریان I_n در حدود چند میلی آمپر 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 خازن های اضافی در کل مدار مورد آزمایش است.

این ظرفیت های خازنی اضافی به سبب الکترودها، اتصالات رابط بین عایق نمونه و دستگاه ها می باشند. همچنین وسایل اندازه گیری از جمله مقسم های ولتاژ خازنی یا فاصله های هوایی بین گوی های درون مدار مورد آزمایش نیز مؤثر می باشند.

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

ترانسفورماتورهای این مولد (در حد میلی‌آمپر)، نیاز به سطح مقطع بزرگ برای سیم‌پیچ‌ها نیست و با توجه به عدم نیاز به سیستم‌های خنک‌کنندگی (رادیاتور و روغن)، حجم اشغال شده توسط ترانسفورماتورهای مولد، در مقایسه با ترانسفورماتورهای قدرت خیلی کم است. هر ترانسفورماتور از بدنه استوانه‌ای با پوشش خارجی عایقی تشکیل می‌شود که تکیه‌گاه عایقی برای طبقات بالاتر را تشکیل می‌دهد و استوانه‌ها روی هم قرار می‌گیرند و ارتفاع بلندی ایجاد می‌کنند.