به نام خدا

عایق و فشار قوی

فصل پنجم
تولید ولتاژهای فشارقوی

مولّد ضربه‌ای چند طبقه - مدار مارکس[1]

بر اساس مطالب بیان شده در مولّد یک طبقه، ابتدا خازن C_1 شارژ شده و سپس داخل مدار RC دشارژ می‌شود. معمولاً ولتاژ شارژ خازن C_1 تا حدّ حدّاکثر ۱۰۰ الی ۲۰۰kV میسّر می‌باشد ولی برای تولید موج‌های ضربه‌ای با ولتاژهای بالاتر، استفاده از یک خازن تکی C_1 باعث بزرگ شدن خازن مذکور و حجیم شدن مدار و پرهزینه شدن آن می‌شود. از این‌رو برای تولید ولتاژهای خیلی بالا، از یک مجموعه بانک خازنی که در ابتدا به حالت موازی قرار دارند و سپس به‌صورت سری در می‌آیند، استفاده می‌شود. در حالت موازی، خازن‌ها شارژ می‌شوند و سپس با سری شدن خازن‌ها، ولتاژ مورد نیاز برای دشارژ خازن‌ها ایجاد می‌شود. این نوع مولّدها که توسّط آقای مارکس ارائه‌شده است، به "مولّد ضربه‌ای چند طبقه" نیز معروف‌اند. طرح کلّی مدار مارکس و مدار اصلاح شدهٔ آن که امروزه برای مولّدهای ضربه‌ای چند طبقه بیشتر استفاده می‌شود، در شکل‌های (۸-۳۱) و (۸-۳۴) به‌صورت نمونه برای یک مولّد چهار طبقه نشان داده شده است. در این مدار،

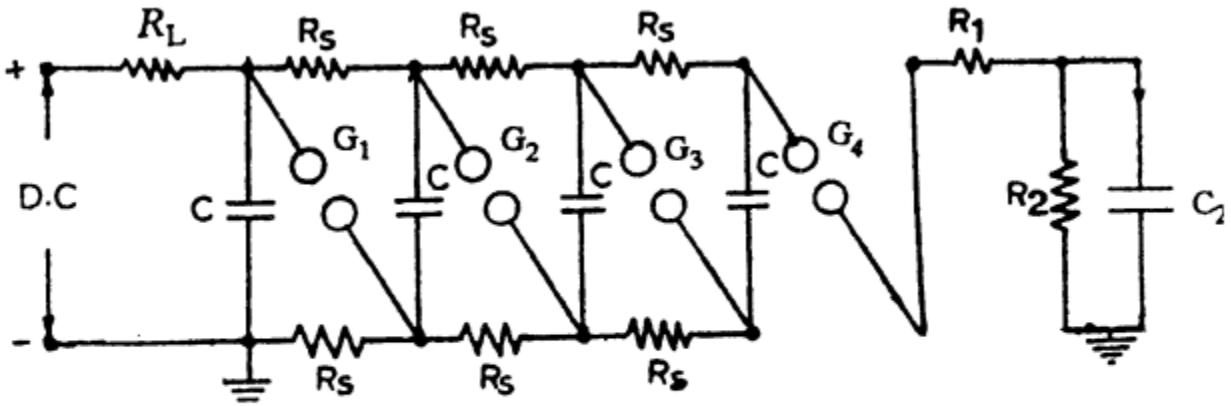
C = ظرفیت‌های خازنی مولّد،

R_L و R_s = مقاومت‌های شارژ خازن‌های مولّد ($R_L \geq ۱۰۰k\Omega$ و R_s=۱۰-۳۰kΩ)،

G = فواصل هوایی برای جرقّه زدن،

$R_۱$ و $R_۲$ = مقاومت‌های سازندهٔ موج،

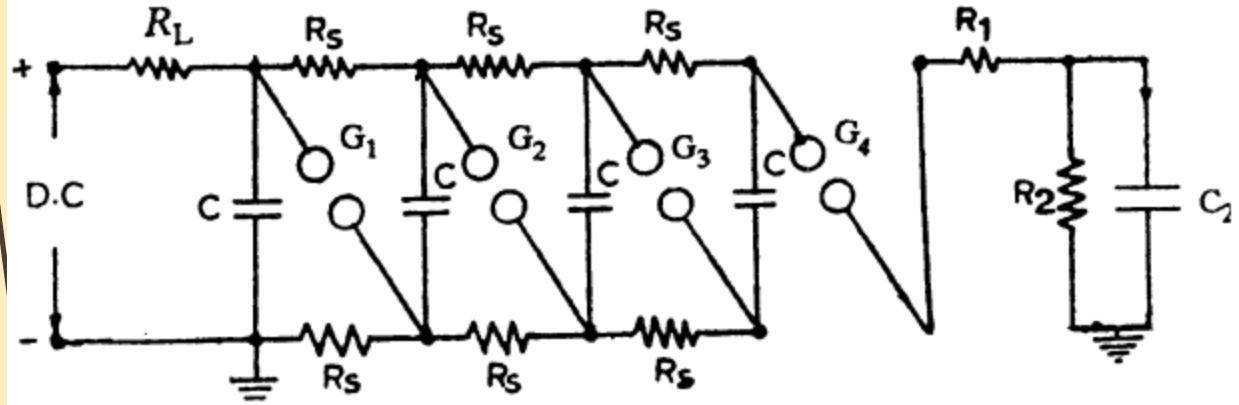
$C_۲$ = عایق نمونهٔ تحت آزمایش.



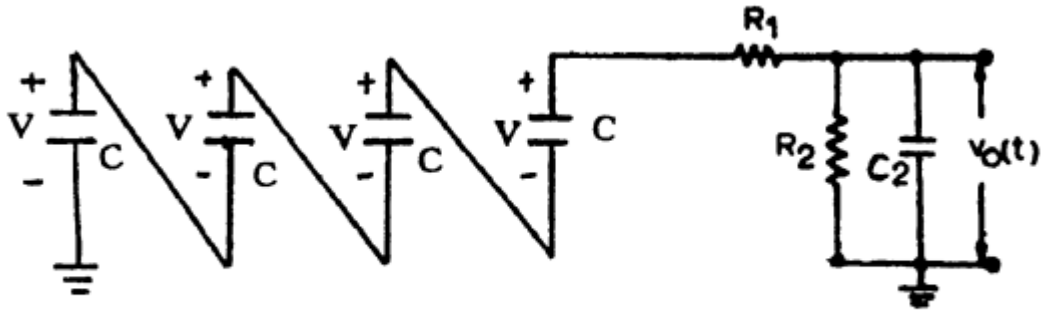
شکل (۸-۳۱): نمایی از طرح مدار مارکس
برای مولّد ضربه چند طبقه

1- Marx

معمولاً مقاومت‌های R_L و R_s برای محدود کردن جریان شارژ خازن‌های C (در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌آمپر)، به‌مقدار بزرگی انتخاب می‌شوند و ظرفیت‌های خازنی C نیز به‌گونه‌ای بزرگ انتخاب می‌شوند که حاصل CR_s (ثابت زمانی شارژ) حدود ۱۰ ثانیه تا ۱ دقیقه است. فاصلهٔ هوایی بین گوی‌ها طوری انتخاب می‌شود که ولتاژ شکست آن‌ها از ولتاژ شارژ V بزرگ‌تر باشد. بنابراین، همهٔ خازن‌ها از طریق مقاومت‌های سری R_s و R_L تا حدّ ولتاژ V در مدّت حدود ۱ دقیقه شارژ می‌شوند. سپس وقتی همهٔ خازن‌ها به اندازهٔ ولتاژ V شارژ شدند بین فاصلهٔ هوایی گوی‌های فلزی جرقّه زده می‌شود. فاصلهٔ G_2 کمی بیشتر از G_1 و فاصلهٔ G_3 کمی بیشتر از G_2 و فاصلهٔ G_4 از بقیه بیشتر است؛ زیرا وقتی G_1 جرقّه می‌زند، ولتاژ $2V$ در دو سر G_2 قرار می‌گیرد و بنابراین، لازم است برای عمل جرقّه زدن متوالی گوی‌های فلزی، فاصلهٔ بین گوی‌های پلّه‌های بالاتر به‌ترتیب، کمی زیادتر باشد. پس از جرقّه زدن همزمان گوی‌های فلزی، خازن‌های C (که به‌طور موازی شارژ شده بودند)، به‌طور سری در مدار RC سمت راست تخلیه می‌شوند. این مدار تخلیه در شکل (۸-۳۲) نشان داده شده است.



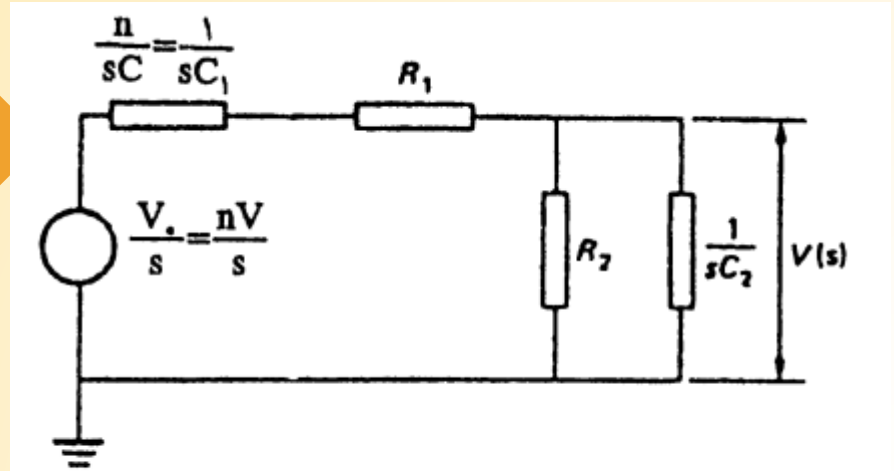
شکل (۸-۳۱): نمایی از طرح مدار مارکس
برای مولّد ضربه چند طبقه



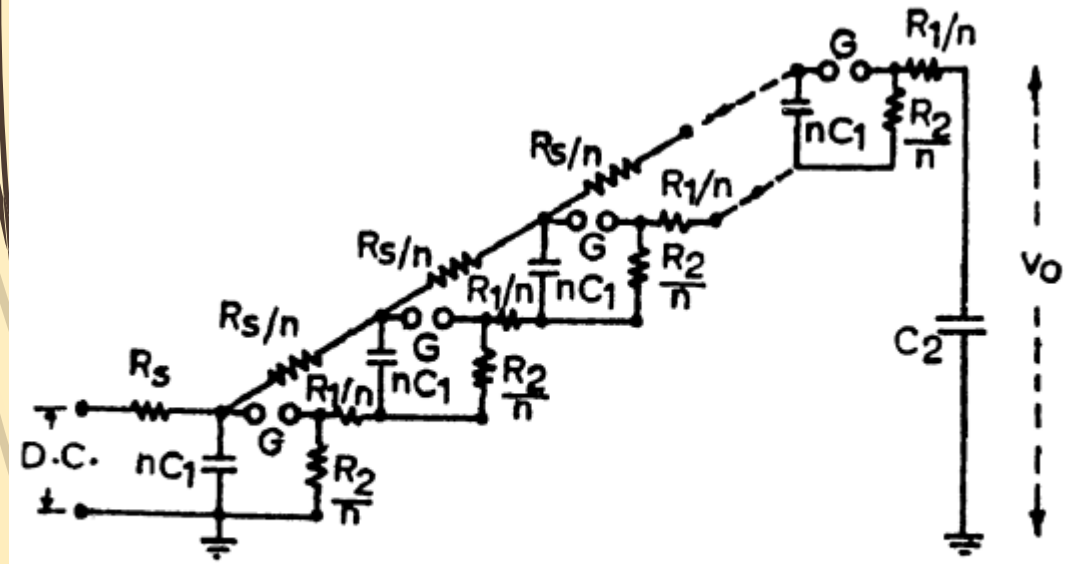
شکل (۸-۳۲): مدار معادل اوّلیهٔ مولّد ضربه چهار طبقه

در نهایت، با اتّصال تمام گوی‌ها به یکدیگر، مدار معادل یک مولّد ضربه n طبقه با شارژ کامل خازن‌ها به‌صورت شکل (۸-۳۳) در می‌آید. با توجّه به این‌که ثابت زمانی تخلیه ($\frac{C}{n}R_2$) در برابر ثابت زمانی شارژ (C_1R_s) خیلی کوچک است، بنابراین، تخلیه در مقاومت‌های سری R_s صورت نمی‌گیرد. مدار معادل مولّد ضربه‌ای n طبقه، مشابه مدار معادل مولّد ضربه‌ای یک طبقه (مدار ساده RC) می‌باشد که به‌جای ظرفیت خازنی مولّد (C_1)، ظرفیت خازنی $\frac{C}{n}$ و به‌جای ولتاژ باتری (منبع V_0)، ولتاژ nV جایگزین شده است. مزیّت مولّد n طبقه این است که از تعدادی خازن با ولتاژ نامی کم‌تر به‌جای یک خازن با ولتاژ نامی بالا (که عایق‌بندی آن بسیار مشکل و هزینهٔ ساخت آن نیز خیلی زیاد است)، استفاده می‌شود. لازم به‌ذکر است که برای تولید موج ضربه‌ای منفی، کافی است پلاریتهٔ خازن‌های شارژ شونده را تعویض کرد.

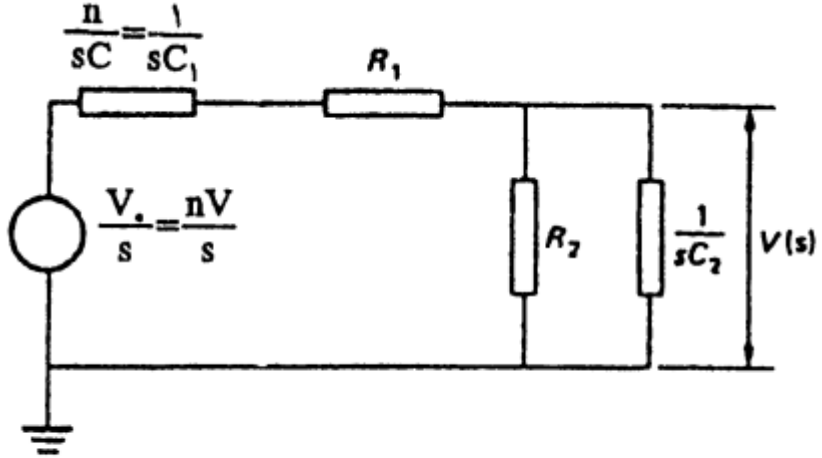
امروزه برای صرفه‌جویی در فضای اشغال شده توسّط مولّد و اقتصادی‌تر شدن مدار، مقاومت‌های R_1 و R_2 نیز بین طبقات مدار مارکس تقسیم می‌شود و از مدار اصلاح شدهٔ شکل (۸-۳۴) استفاده می‌شود.



شکل (۸-۳۳): مدار معادل نهایی مولّد ضربه n طبقه



شکل (۸-۳۴): طرح دیگری از مولّد ضربه چند طبقه



شکل (۸-۳۳): مدار معادل نهایی مولّد ضربه n طبقه

مثال (۸-۲): یک ژنراتور موج ضربه‌ای ۸ طبقه را در نظر بگیرید که ظرفیت خازنی هر طبقهٔ آن ۰/۱۶μF بوده و خازن هر طبقه به‌مقدار ۱۲۰kV شارژ می‌شود. اگر ظرفیت خازنی عایق نمونهٔ تحت آزمایش ۱۰۰۰pF باشد، مقاومت‌های R_1 و R_2 مدار را برای تولید موج ضربه‌ای ۱/۲/۵۰μsec به‌دست آورید. همچنین دامنهٔ ولتاژ خروجی این ژنراتور و بازدهٔ آن را محاسبه کنید.

حل:

$$C_1 = \frac{0/16}{8} = 0/02\ \mu F$$

$$C_2 = 1000 \times 10^{-12} = 1 \times 10^{-9}\ F = 0/001\ \mu F$$

برای موج استاندارد ضربه‌ای ۱/۲/۵۰μsec باید ثابت‌های زمانی زیر را داشته باشیم.

$$\tau_1 = 68/2\ \mu sec$$

$$\tau_2 = 0/405\ \mu sec$$

در نتیجه:

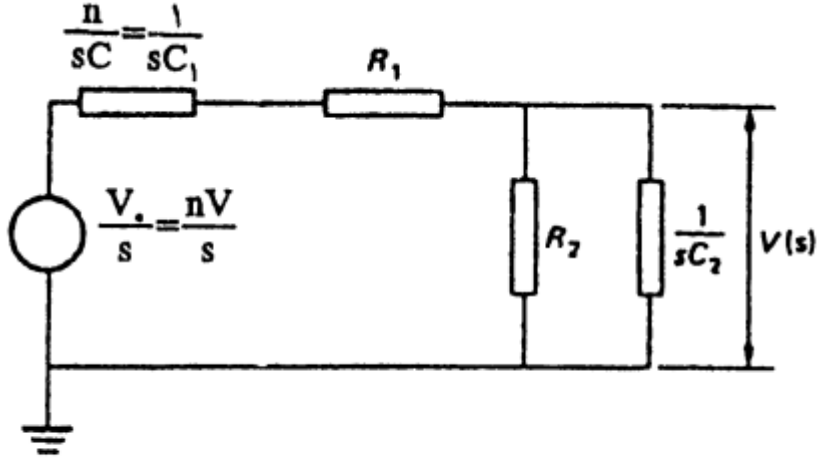
$$\tau_1 = R_2\,(C_1+C_2) \Rightarrow 68/2 = R_2(0/02 + 0/001) \Rightarrow R_2 = 3247\Omega$$

$$\tau_2 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1+C_2} \Rightarrow 0/405 = R_1 \frac{0/02 \times 0/001}{0/02 + 0/001} \Rightarrow R_1 = 425/25\Omega$$

برای تعیین دامنهٔ ولتاژ خروجی (V_p) و بازدهٔ مولّد (η)، ابتدا باید پارامترهای مورد نیاز را محاسبه کنیم:

$$V_0 = 8 \times 120 = 960kV$$

$$\alpha_1 = \frac{-1}{\tau_1} = \frac{-1}{68/2\times10^{-6}} = -14662/75$$



شکل (۸-۳۳): مدار معادل نهایی مولّد ضربه n طبقه

$$\alpha_2 = \frac{-1}{\tau_2} = \frac{-1}{0/405\times10^{-6}} = -2/469\times10^{6}$$

$$K = R_1C_2 = 4/25\times10^{-7}$$

در نتیجه، V_p به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_p = \frac{960}{4/25\times10^{-7}} \times \frac{1}{2/454\times10^{6}} \left[(0/0059)^{0/0059} - (0/0059)^{1/006}\right]$$

$$V_p = 960 \times 0/924 = 887/7\,kV$$

$$\eta = \frac{887/7}{8\times120} = 0/924 = 92/4\%$$

با تغییر فاصلهٔ گوی‌های فلزی G در هر دو مدار شکل‌های (۸-۳۱) و (۸-۳۴) می‌توان دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای را کاهش یا افزایش داد ولی با توجّه به قدرت عایقی دی‌الکتریک خازن‌های C، مقدار ولتاژ شارژ خازن C_1 معادل، از یک مقدار حدّاکثر V_{0max} نمی‌تواند بیشتر شود؛ زیرا باعث آسیب رسیدن به آن‌ها می‌شود. دامنهٔ موج ضربه‌ای تولیدی نیز از یک مقداری که حتماً کم‌تر از مقدار V_{0max} است (به‌علّت اینکه راندمان مولد نمی‌تواند ۱۰۰٪ باشد)، کم‌تر خواهد بود. با توجّه به‌مقدار V_{0max} ، یک پارامتر مهم که به‌عنوان مشخّصات فنّی مولّدهای ضربه‌ای ارائه می‌شود، حدّاکثر انرژی قابل ذخیره توسّط مولّد است که بر حسب کیلوژول بیان می‌شود. مقدار این انرژی برابر است با:

$$W_{max} = \frac{1}{2} C_1 V_{0max}^2 \qquad (۵۹-۸)$$

با تعویض پلاریتهٔ خازن C_1 می‌توان موج ضربه‌ای منفی تولید نمود. استقامت عایقی در برابر موج ضربه‌ای منفی برای عایق‌ها، معمولاً بیشتر از موج ضربه‌ای مثبت است.

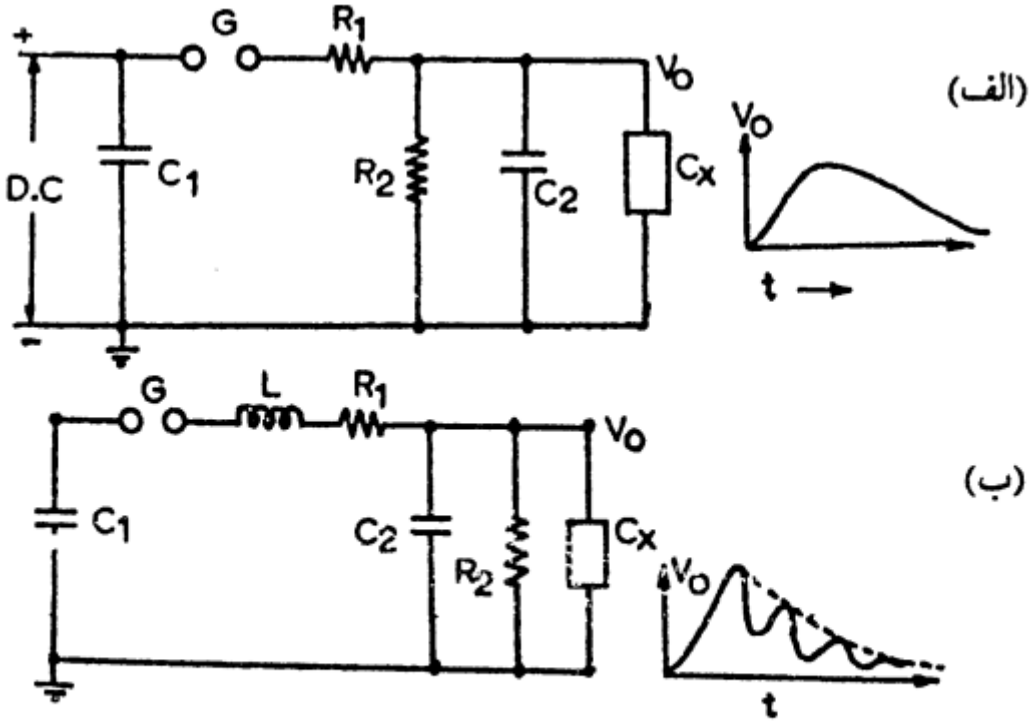
تولید امواج سوئیچینگ[1] نوسانی

امروزه در خطوط انتقال با ولتاژ فوق‌العاده بالا[2] و سیستم‌های قدرت، موج سوئیچینگ یکی از عوامل مؤثّری است که در طرّاحی موادّ عایقی اثر دارند. یک موج ولتاژ سوئیچینگ در اثر باز و بسته شدن ناگهانی کلیدهای قدرت ایجاد می‌شود که همراه با یک قوس الکتریکی درکلید می‌باشد. موج ولتاژ سوئیچینگ ممکن است یک موج نوسانی یا یک موج نوسانی میرا شونده باشد که مقدار فرکانس آن از چند صد هرتز تا چند کیلو هرتز می‌باشد. همچنین مدّت زمان رسیدن به دامنهٔ موج در حدود ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌ثانیه و زمان نزول آن (زمان نیم‌پشت موج) از ۱ تا چند میلی‌ثانیه است. بنابراین، امواج سوئیچینگ در مقایسه با ولتاژهای ضربهٔ صاعقه، دارای انرژی بیشتری هستند. چندین نوع مدار برای تولید امواج سوئیچینگ انتخاب شده‌اند که عبارت است از:

۱- مدار RC مولّد ضربه، برای ایجاد شکل موج‌های با مدّت زمان طولانی‌تر.

۲- ترانسفورماتورهای قدرت یا ترانسفورماتورهای آزمایشی که با امواج نوسانی معیّن ولتاژهای DC تحریک شده است. شکل (۸-۳۶)، مدارات مولّد ضربه را برای ایجاد امواج سوئیچینگ نشان می‌دهد.

ترتیب عناصر مدار، مانند مولّد ضربه‌ای موج صاعقه است. مقادیر R_1 و R_2 برای تولید شکل موج‌های با مدّت زمان طولانی‌تر، مثل ۱۰۰/۱۰۰۰ μsec یا



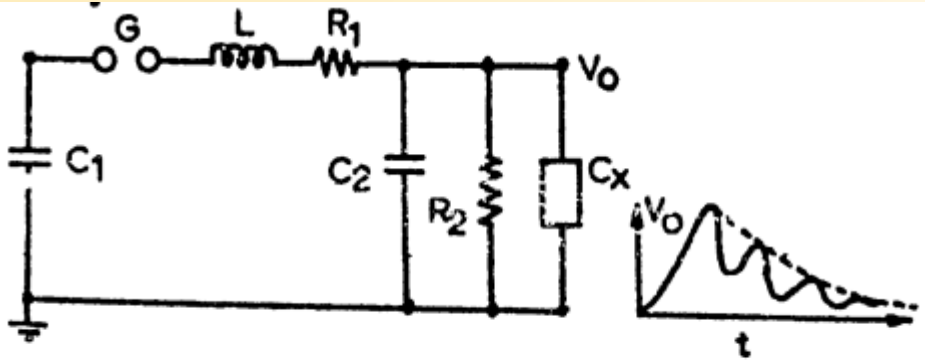
شکل (۸-۳۶) : مدارهایی برای تولید ولتاژهای موج سوئیچینگ

1- *Switching Surges*

2- *Extra High Voltage (EHV)*

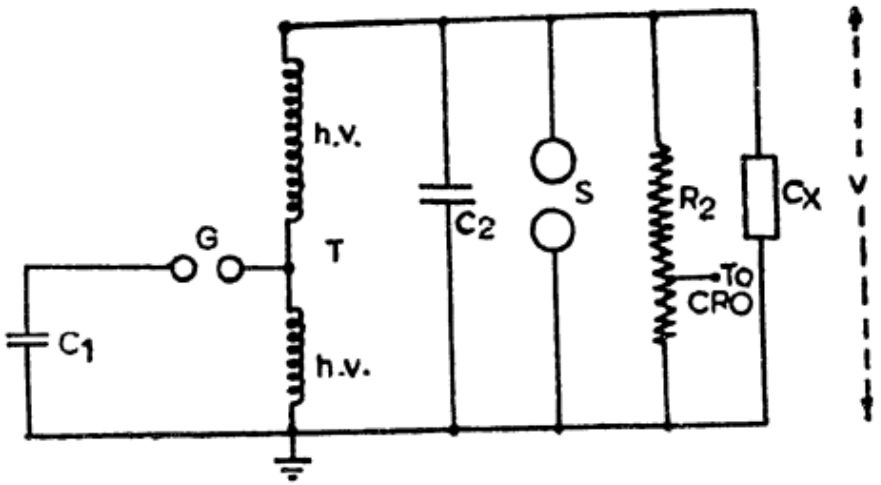
μsec ۴۰۰/۴۰۰۰، به‌ترتیب مقادیری از ۱ تا ۵ کیلو اهم و ۵ تا ۲۰ کیلواهم خواهند بود. بنابراین، R_1 در حدود ۲۰ تا ۳۰٪ مقدار R_2 خواهد بود. از این گذشته، مقادیر مقاومت‌های شارژ کنندهٔ R_1، به‌مقدار زیادی افزایش می‌یابند تا در مرحلهٔ دشارژ خازن C_2، با مقاومت R_2 موازی شود. مدار ارائه شده در شکل (۸-۳۶-ب) نوسانات غیریکنواخت میرا شونده را تولید می‌کند. با استفاده از یک سلف L، مقدار R_1 به‌مقدار زیادی کاهش می‌یابد و در نتیجه، کارآیی مولّد بالا می‌رود. نوسانات میرا شونده ممکن است دارای فرکانس‌هایی در حدود ۱ تا ۱۰ کیلو هرتز باشند که این فرکانس‌ها وابسته به پارامترهای مدار هستند.

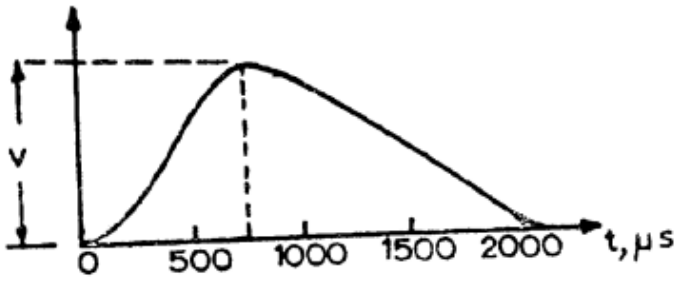
معمولاً حدّاکثر دامنهٔ موج سوئیچینگ از ۲۵۰ تا ۳۰۰kV است که از یک مولّد ضربه‌ای با مقادیر نامی ۱۰۰۰kV و 5kW.sec به‌دست می‌آید. با استفاده از یک سلف L و مقاومت الکتریکی کم، می‌توان موج ضربه‌ای سوئیچینگ با ولتاژ بیشتر از ۵۰۰kV را تولید نمود. امواج سوئیچینگ با دامنه‌های بسیار بالا و مدّت زمان طولانی را می‌توان با استفاده از مدار نشان داده شده در شکل (۸-۳۷) به‌دست آورد. خازن C_1 مولّد ضربه‌ای، با یک ولتاژ DC پایین (۲۰ تا ۲۵ کیلوولت)، شارژ می‌شود و سپس در داخل یک سیم‌پیچ فشار ضعیف از یک ترانسفورماتور قدرت یا ترانسفورماتور آزمایش دشارژ می‌شود. سیم‌پیچ ولتاژ بالا با خازن بار C_2 و با یک مقسم پتانسیل R_2، با یک گوی فاصلهٔ هوایی S و با وسیلهٔ مورد آزمایش، به حالت موازی بسته می‌شود. در طول آزمایش، یک اتوترانسفورماتور، موج سوئیچینگ را در دو سر وسیلهٔ مورد آزمایش به‌شکل مناسب تولید می‌کند.



(ب)

شکل (۸-۳۶) : مدارهایی برای تولید ولتاژهای موج سوئیچینگ





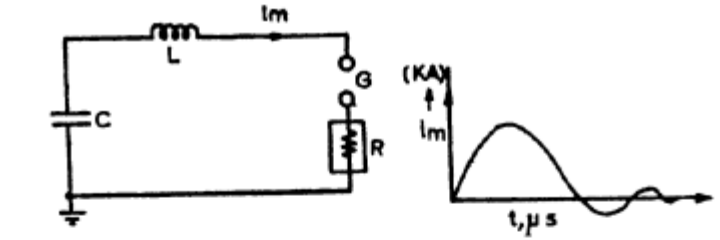
شکل (۸-۳۷): مدار تولید امواج ضربه و شکل موج رایج آن‌ها

مولّد جریان‌های ضربه‌ای

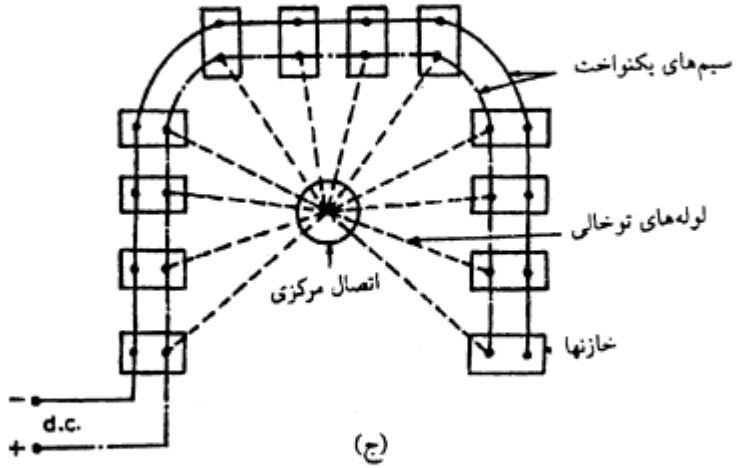
تخلیه‌های الکتریکی صاعقه روی خطوط انتقال، هم امواج ضربه‌ای با ولتاژ بالا و هم امواج ضربه‌ای با جریان بالا را ایجاد می‌کنند. با استفاده از وسیله‌های محافظ مثل تضعیف‌کننده‌های موج، جریان‌های صاعقه بدون وارد کردن صدمه‌ای به خطوط، به زمین تخلیه می‌شوند. بنابراین، موج جریان ضربه‌ای با دامنهٔ بزرگ (تقریباً ۱۰۰kA) را باید در آزمایشگاه‌های تولید جریان ضربه ایجاد نمود تا از آن بتوان در مباحث تحقیقاتی و آزمایش تجهیزات استفاده کرد.

تعریف شکل موج‌های جریان ضربه‌ای

شکل موج‌هایی که در آزمایش‌ها استفاده می‌شوند، ۴/۱۰μsec و ۸/۲۰μsec هستند که مشخّصات کلّی آن مطابق با شکل (۸–۳۸–ب) نشان داده شده است. خطای مجاز منظور شده روی زمان‌های جلو و عقب موج در حدود ٪۱۰± است. علاوه بر موج جریان ضربهٔ استاندارد، امواج مربّعی با مدّت زمانی طولانی در آزمایش نیز استفاده می‌شوند. امواج مربّعی معمولاً مدّت زمانی بین ۰/۵ تا 5msec دارای مقدار ثابتی هستند که زمان‌های صعود و نزول این نوع امواج، کم‌تر از ٪۱۰ زمان کلّ موج می‌باشد. این خطای منظور شده برای حدّاکثر ولتاژ، در حدود ٪۲۰+ و ٪۰– است (به‌عبارت دیگر مقدار حدّاکثر جریان ممکن است از مقدار تعیین شده بیشتر باشد، امّا کم‌تر از آن نمی‌تواند باشد). همچنین مدّت زمان موج برابر مدّت زمانی است که مقدار جریان، حدّاقل به‌مقدار ٪۱۰ از مقدار حدّاکثر جریان باشد.



(الف) (ب)



(ج)

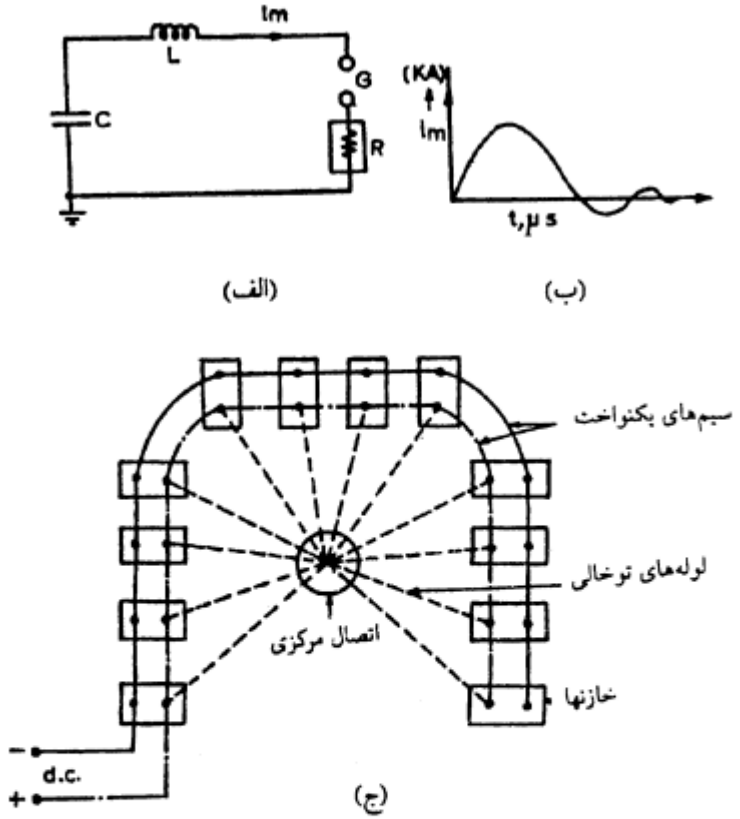
R_s = مقاومت شارژ S = فاصلهٔ هوایی جرقه زن
T = موضوع آزمایش LC = شبکه ساخت ضربه
R_v = تقسیم ولتاژ برای اندازه‌گیری ولتاژ
R_{sh} = جریان شنت برای اندازه‌گیری جریان

شکل (۸–۳۸): مدار تولید جریان ضربه‌ای و شکل موج آن؛
الف) مدار اصلی یک مولّد جریان ضربه‌ای؛ ب) شکل موج جریان ضربه‌ای؛
ج) ترتیب خازن‌ها برای تولید جریان ضربه‌ای

۸-۸-۲- مدار تولید امواج جریان ضربه‌ای

برای تولید جریان‌های ضربه‌ای با دامنهٔ بالا، یک سری خازن در حالت موازی مطابق شکل (۸-۳۸-ج) متّصل می‌شوند و در یک مقدار معیّن شارژ شده و از طریق یک مدار سری R-L دشارژ می‌گردند که در شکل (۸-۳۸-الف) نشان داده شده است. در این شکل، یک بانک خازنی در حالت موازی قرار دارد که خازن‌های آن از طریق یک منبع DC (با اندازهٔ ولتاژ بالاتر از ۲۰۰kV) شارژ می‌شوند. مقاومت R، بیانگر مقاومت دینامیکی وسیلهٔ تحت آزمایش و مقاومت مدار شنت[۱۱] می‌باشد. همچنین L یک سلف جریان بالا با هستهٔ هوایی است که معمولاً از یک لوله مارپیچ با تعداد دور کمی از سیم‌های پیچیده تشکیل شده است. اگر خازن به اندازهٔ ولتاژ V شارژ شود، و فاصلهٔ هوایی دو گوی فلزی، به‌طور ناگهانی از طریق جرقّه متّصل گردند، آنگاه خازن دشارژ می‌شود. جریان i_m ایجاد شده از معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$V = R\,i_m + L\frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C}\int_{\cdot} i_m\,dt$$



R_s = مقاومت شارژ S = فاصلهٔ هوایی جرقّه زن
T = موضوع آزمایش LC = شبکه ساخت ضربه
R_v = تقسیم ولتاژ برای اندازه‌گیری ولتاژ
R_{sh} = جریان شنت برای اندازه‌گیری جریان

شکل (۸-۳۸): مدار تولید جریان ضربه‌ای و شکل موج آن؛
الف) مدار اصلی یک مولّد جریان ضربه‌ای؛ ب) شکل موج جریان ضربه‌ای؛
ج) ترتیب خازن‌ها برای تولید جریان ضربه‌ای

۱- مقاومت شنت: مقاومت کوچکی که برای افزایش دامنهٔ اندازه‌گیری یک دستگاه سنجش جریان، به‌طور موازی با ترمینال‌های آن قرار می‌گیرد.

معمولاً مدار در حالت زیر میرایی است. یعنی،

$$\frac{R}{۲} < \sqrt{\frac{L}{C}}$$

از این‌رو i_m را می‌توان به‌صورت زیر تعیین نمود:

$$i_m = \frac{V}{\omega L} e^{-at} \sin(\omega t) \qquad (۶۰-۸)$$

که،

$$a = \frac{R}{۲L} \quad , \quad \omega = \sqrt{\frac{۱}{LC} - \frac{R^۲}{۴L^۲}} \qquad (۶۱-۸)$$

مدّت زمانی که جریان i_m از مقدار صفر به اوّلین مقدار پیک خود بالا می‌رود، را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\tau_۱ = \tau_f = \frac{۱}{\omega} \sin^{-۱} \frac{\omega}{\sqrt{LC}} \qquad (۶۲-۸)$$

مدّت زمان برای یک نیم سیکل موج نوسانی میرا شونده $\tau_۲$ به‌صورت زیر است:

$$\tau_۲ = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{۱}{LC} - \frac{R^۲}{۴L^۲}}} \qquad (۶۳-۸)$$

می‌توان نشان داد که معمولاً مقدار حدّاکثر i_m برای یک انرژی معیّن $W = \frac{۱}{۲}CV^۲$ و اندوکتانس مؤثّر L، به‌مقدار V و C غیروابسته است. این موضوع را می‌توان از معادلهٔ (۸-۶۰) هم مشاهده نمود که برای داشتن جریان‌های بالا در یک ولتاژ شارژ V، یک اندوکتانس کوچک لازم است.

برای یک موج جریان ضربهٔ استاندارد $۸/۲۰\mu sec$، مقادیر $a = ۰/۰۵۳۵ \times ۱۰^۶$ و $\omega = ۰/۱۳۳ \times ۱۰^۶$ را خواهیم داشت که در این شرایط، R، L و C به‌ترتیب بر حسب اهم، میکروهانری و میکرو فاراد هستند. در این حالت، حاصل‌ضرب $LC = ۶۵$ است. از این‌رو، با دانستن مقدار ظرفیت مولّد C، مقدار L از رابطهٔ $L = \frac{۶۵}{C}$ محاسبه می‌شود و مقدار R هم از رابطهٔ (۸-۶۱) حاصل می‌شود (به‌طوری که $R = ۲L\alpha$). همچنین مقدار حدّاکثر $i_m = I_p$ از طریق $۱۴/(VC)$ به‌دست می‌آید، که V بر حسب kV و I_p برحسب kA و C بر حسب μF است.

۸-۸-۳- تولید جریان‌های ضربه‌ای با دامنهٔ بالا

برای تولید مقادیر بالای جریان‌های ضربه، یک تعداد از خازن‌ها، در حالت موازی شارژ شده و سپس به‌طور موازی در مدار دشارژ می‌شوند. ترتیب خازن‌ها در شکل (۸-۳۸-ج) نشان داده شده است. برای به حدّاقل رساندن اثر اندوکتانس، خازن‌ها به واحدهای کوچک‌تر تقسیم شده است.

اگر n_1 گروه خازن وجود داشته باشد و هر گروه شامل n_2 واحد و اگر L_0 اندوکتانس مسیر مشترک دشارژ باشد و L_1 مربوط به گروه باشد، پس اندوکتانس مؤثّر L با رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$L = L_0 + \frac{L_1}{n} + \frac{L_2}{n_1 n_2} \qquad (۶۴-۸)$$

قسمت‌های ضروری یک مولّد جریان ضربه عبارتند از:

۱- یک واحد شارژ DC معیّن، تا ولتاژ متغیّری را برای بانک خازنی ایجاد کند.

۲- خازن‌هایی با ظرفیت زیاد (۰٫۵ تا ۵ میکرو فاراد)، که هر کدام با تعداد زیادی اندوکتانس سلفی با ظرفیت کم، با توانایی جریان‌های بالا در حالت اتّصال کوتاه موازی می‌شوند.

۳- یک مجموعهٔ القاگر با هستهٔ هوایی با ظرفیت جریانی بالا.

۴- تجهیزات مخصوص و اسیلوگراف به منظور اندازه‌گیری متغیّرها.

۵- یک واحد تریگر کننده و دوگوی، با فاصلهٔ هوایی برای تولید جرقّه در مولّد جریان.