3.7 磁気スイッチ

- 強磁性体コアの過飽和リアクトル
- リボン状磁性体を絶縁して使用
- リセット回路使用
- 高繰り返し動作可能（冷却必要）
- 半導体スイッチとの組み合わせで利用

磁気スイッチのスイチング特性
　電圧降下：直線的，オン電圧：小
　電流立ち上がり大，スイッチング損失小
ギャップ，サイラトロン-スイッチの特性
　電圧降下：指数的，オン電圧：数 10～100V

磁気パルス圧縮回路用過飽和リアクトル用コアの特性

磁心材料	鉄系微結晶質合金	鉄系アモルファス	コバルト系アモルファス
型番	FT-1H	2605CO	2705M
飽和磁束密度 Bs(T)	1.35	1.80	0.75
残留磁束密度 Br(T)	1.22	1.60	0.7
保持力 Hc(A/m)	0.8	3.0	1.0
飽和磁歪 λs(×10^6)	+2.3	+35	<1
キューリー温度℃	570	415	365
抵抗率 ρ(μΩ-m)	1.10	1.23	1.36

層間電圧の考え方

$$\frac{1}{N_t}\int_0^{T/2} V(t)\,dt = \int_{A_m} B\cdot ds = 2B_{sat}A_m$$

ここで，A_m は磁性体の占める面積で $A_m = N_L \cdot x_L \cdot W_L$，$N_L$ N_L は積層数，x_L は厚さ，W_L は積層の幅，B_{sat} は飽和磁束密度。

パルス電圧 $V(t) = \frac{V_{max}}{2}(1-\cos\omega t)$，とすると

$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ なので，$\frac{1}{N_t}\int_0^{T/2} V(t)\,dt = \frac{V_{max}T}{4N_t}$，（$N_t$ ターン数）。よって，$A_m = \frac{V_{max}T}{8B_{sat}N_t}$

リボンが同じ長さならば，1 周電圧 $\frac{V_{max}}{N_t}$ 層間絶縁耐電圧は $V_L \geq \frac{V_{max}}{N_t N_L} = \frac{8B_{sat}x_L W_L}{T}\left(\frac{SF}{1-SF}\right)$

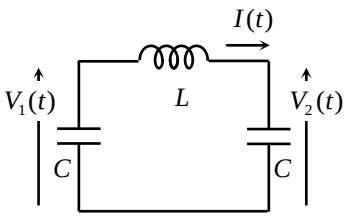
SF は占積率 $SF \triangleq \frac{A_m}{A_T} = \frac{A_m}{A_I + A_m} = \frac{x_L}{x_I + x_L}$

ここで，x_I は絶縁層の厚さ。

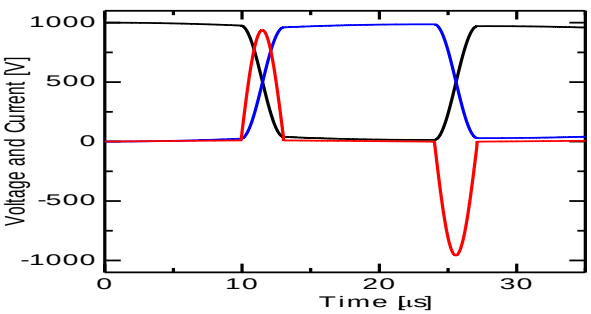
　磁性体の損失は，アモルファス合金を使用した場合は，主に渦電流損失で，磁性体の厚みの 2 乗，磁束密度の変化量の 3 乗，周波数の 1 乗に比例して増加。

過飽和リアクトルを使った CLC 回路

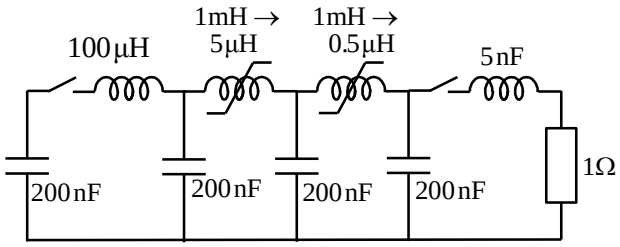
（$C_1 = C_2 = C$）

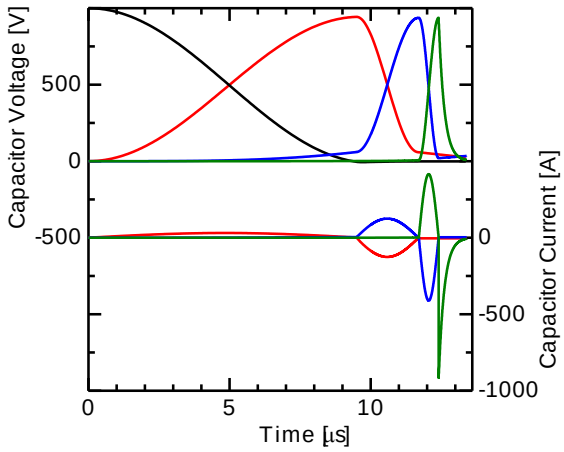


Scilab で確認のこと



３段の磁気パルス圧縮回路計算例（PSpice 使用）





PSpice での計算例

最適設計

電荷移行時間は（1 周期：$2\pi\sqrt{L\cdot C/2}$）

$$\tau_n = \pi\sqrt{L_{n,s}\frac{C}{2}},\ \tau_{n+1} = \pi\sqrt{L_{n+1,s}\frac{C}{2}}$$

パルス圧縮の条件は

$\tau_n \gg \tau_{n+1}$ より，$L_{n,s} \gg L_{n+1,s}$

ここで添え字 $_{n,s}$ は n 段の飽和時インダクタンスを表す。なお，電荷の移行中に後段に電荷が漏れない条件は：　$L_{n+1,us} \gg L_{n,s}$，　ここで，$_{n+1,us}$ は $n+1$ 段の非飽和時インダクタンス。

過飽和リアクトルの磁性体コア特性や形状は同じとして，巻数のみ変えたとすると

$$L_{n,s} = \mu_0 \frac{SN_n^{\ 2}}{\ell}$$

$$L_{n+1,us} = \mu_r\mu_0 \frac{SN_{n+1}^{\ 2}}{\ell}\chi,\ L_{n+1,s} = \mu_0 \frac{SN_{n+1}^{\ 2}}{\ell}$$

χ は占積率（巻線を含めた断面積に対する磁性体コア断面積の占める割合）。以上から

$$\mu_r\chi N_{n+1}^{\ 2} \gg N_n^{\ 2},\ \mu_r\chi \gg \left(\frac{N_n}{N_{n+1}}\right)^2 = \delta^2$$

δ：巻数比。パルス圧縮比 ξ は

$$\xi = \frac{\tau_n}{\tau_{n+1}} = \sqrt{\frac{L_{n,s}}{L_{n+1,s}}} = \frac{N_n}{N_{n+1}} = \delta$$

$\mu_r\chi \gg \xi^2$　より，$\mu_r = 20{,}000$，$\chi = 0.6$ ならば $20{,}000\times 0.6 = 12{,}000,\ 109 \gg \xi$ となり ξ は 5~6 に制限される。

電荷移行率（エネルギー転送率）の最大値は，電荷がちょうど半周期 τ_n で移行した時に次段が飽和すればよい。このとき電荷の損失はない。$n+1$ 段が飽和する電圧（磁束の時間変化量）が n 段の半周期後の電圧と等しいとして

$$V_{n+1}(t) = N_{n+1}S\chi\frac{dB}{dt} = \frac{V_0}{2}\left(1-\cos\frac{\pi}{\tau_n}t\right)$$

上式を積分して磁束を求めると，

$$\int_0^{\tau_n} V_{n+1}(t)dt = N_{n+1}S\chi\Delta B = \frac{\tau_n}{2}V_0$$

なお $\Delta B \approx 2B_s$ である。

蓄積エネルギーは

$$\frac{1}{2}CV_0^{\ 2} = \frac{1}{2}C\frac{4N_{n+1}^{\ 2}S^2\chi^2\Delta B^2}{\tau_n^{\ 2}}$$

$$= \frac{4}{\pi^2}\frac{1}{\mu_0\xi^2}\ \chi^2\Delta B^2 S\ell$$

よって，$S\ell \propto \left(\frac{1}{2}CV_0^{\ 2}\right)\xi^2$ の関係が得られる。エネルギー効率の良い回路を実現するには，コア体積：$S\ell$（ℓ：磁路長）を蓄積エネルギーと圧縮比の 2 乗の積に比例させる必要がある。

磁気パルス圧縮回路方式例

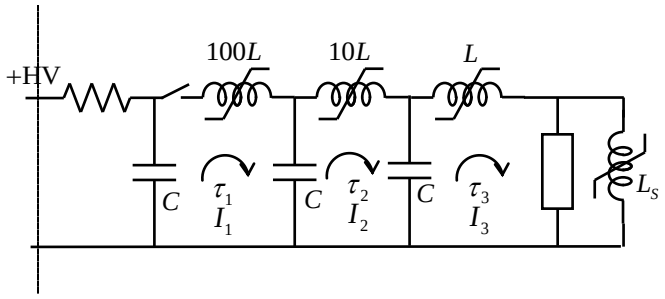
磁気パルス圧縮回路例

(a)3 段直列接続・電流増幅型

電流増幅率

パルス圧縮比

エネルギー転送効率

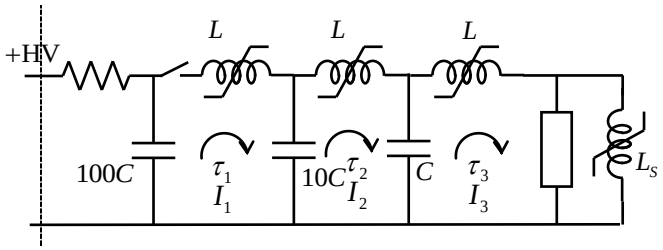
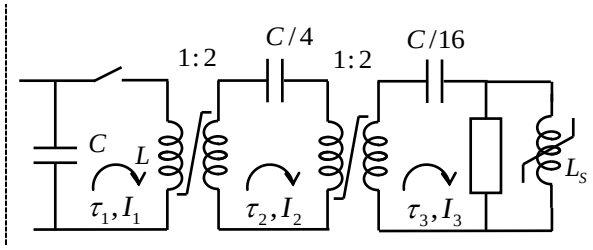


(b)3 段直列接続・電圧増幅型

電圧増幅率

パルス圧縮比

エネルギー転送効率



(c)3 段並列接続・電圧増幅型