3.4 磁気パルス圧縮回路

磁気スイッチの動作原理

磁性体内の磁束

$$\Phi = B \bullet S = \int V_p dt$$

巻線に加えたパルス電圧と磁束変化量の関係

$$\Delta B = \frac{1}{NS}\int_0^{t_p} V_p dt = \frac{V_p t_p}{NS}$$

磁束が飽和するまでの時間

$$t_s = \frac{\Delta BNS}{V_p} = \frac{(B_{sat} \pm B_r)SN}{V_p}$$

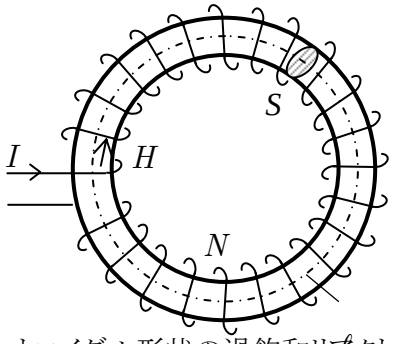
リアクトル非飽和時のインダクタンス

$$L_{unsat} = \mu_r \mu_0 \frac{SN^2}{\ell}$$

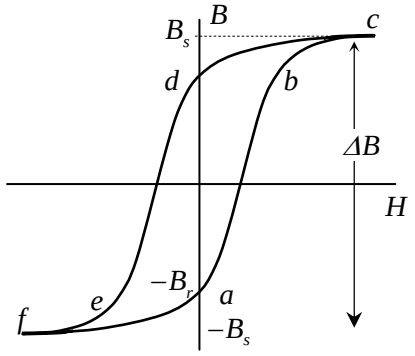
リアクトル飽和時のインダクタンス

$$L_{sat} = \mu_0 \frac{SN^2}{\ell}$$

両者の比は: $1/\mu_r$



トロイダル形状の過飽和リアクトル



$B-H$ カーブ

* a からスタートするようにリセット動作を行う。
a - b 間の傾きは磁性体の比透磁率 μ_r を示す

過飽和リアクトルの動作

コンデンサ放電を考える

(1) コンデンサ C の初期電圧: V_0

(2) 時刻 0 でスイッチ ON: 過飽和リアクトル L のコア（磁性体）は非飽和状態

回路電流の時定数:

非飽和時のインダクタンス L_{unsat} と C 容量値

回路電流値:

$$I = V_0\sqrt{\frac{C}{L_{unsat}}}$$ より小電流

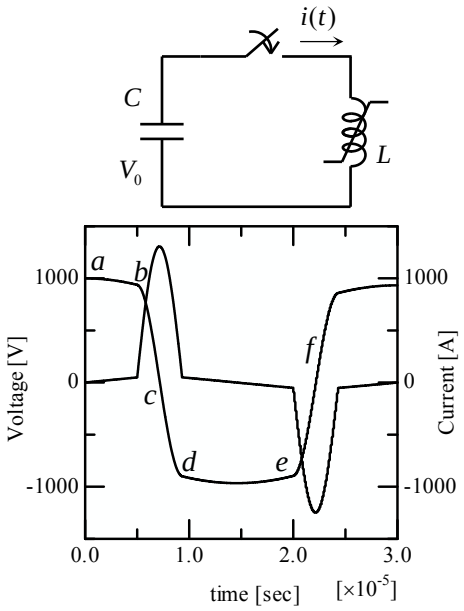
(3) 過飽和リアクトル L が飽和状態に変化

回路電流の時定数: 飽和時のインダクタンス L_{sat} と C 容量値

回路電流値（V_0' は飽和時の電圧）

$$I \approx V_0'\sqrt{\frac{C}{L_{sat}}}$$ より大電流

(4) 回路電流が反転し, コアは非飽和



電流, 電圧波形

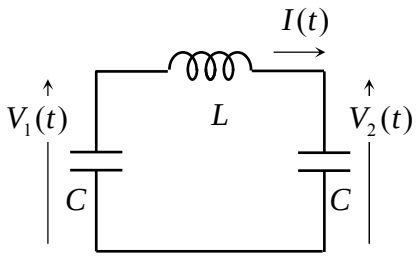
(1) $B-H$ カーブ上の a からスタート

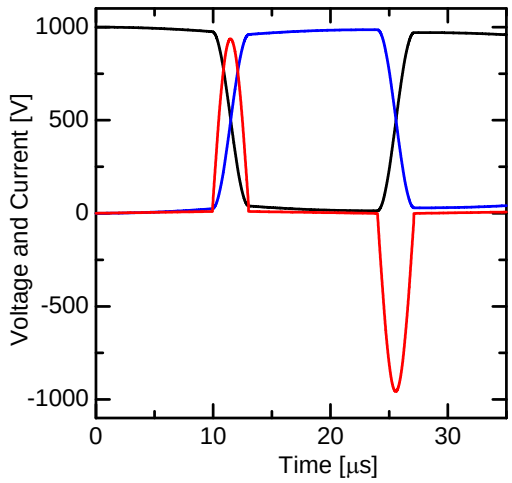
(2) b に進む

(3) b − c − d 間は過飽和リアクトルが飽和: $\mu_r \to 1$, $L_{unsat} \to L_{sat}$

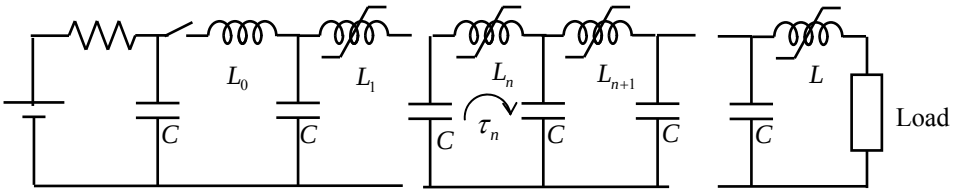
(4) d より非飽和, e に進む

過飽和リアクトルによる CLC 回路
（$C_1 = C_2 = C$）





n 段の磁気パルス圧縮回路



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てはいけないので，その条件は

$L_{n+1,us} \gg L_{n,s}$

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

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

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

$$\frac{1}{2} C V_0{}^2 = \frac{1}{2} C \frac{4 N_{n+1}{}^2 S^2 \chi^2 \Delta B^2}{\tau_n{}^2}$$

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

よって，$S\ell \propto \left(\frac{1}{2} C V_0{}^2\right) \xi^2$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。

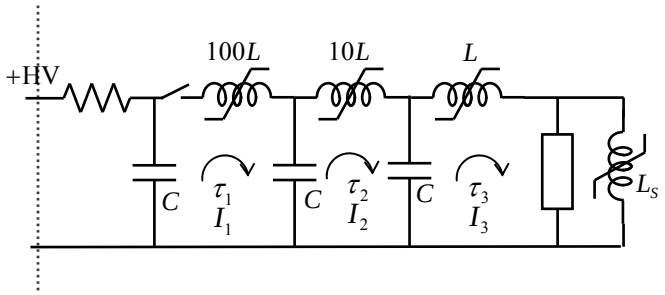
磁気パルス圧縮回路例

(a) 3 段直列接続・電流増幅型

パルス圧縮比：$\tau_1 / \tau_3 \approx \sqrt{50} \approx 7$

電流増幅率：$I_3 / I_1 \approx \sqrt{50} \approx 7$

エネルギー転送効率：$\varepsilon_3 / \varepsilon_1 \approx 1$

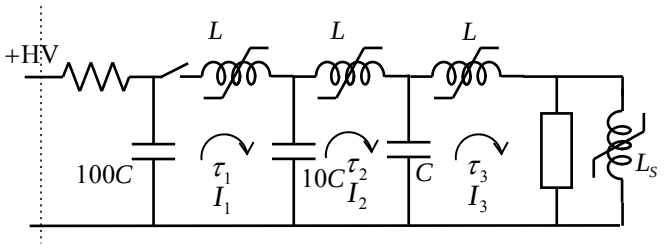


(b) 3 段直列接続・電圧増幅型

パルス圧縮比：$\tau_1 / \tau_3 \approx 3$

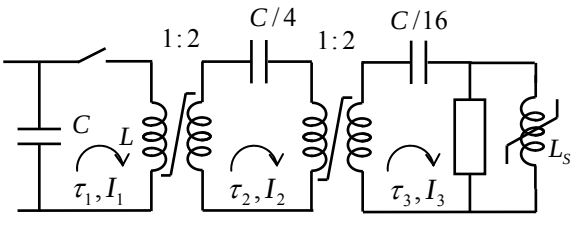
電圧増幅率：$V_3 / V_1 \approx 4$

エネルギー転送効率：$\varepsilon_3 / \varepsilon_1 \approx 0.16$



(c) 3 段並列接続・電圧増幅型

パルス圧縮比：$\tau_1 / \tau_3 \approx 4$

電圧増幅率：$V_3 / V_1 \approx 4$

エネルギー転送効率：$\varepsilon_3 / \varepsilon_1 \approx 1$