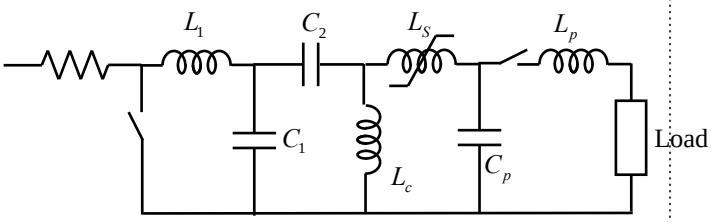
第6回
その他の回路:倍電圧+MPC, LC 反転回路
→回路素子に加わる電圧電流

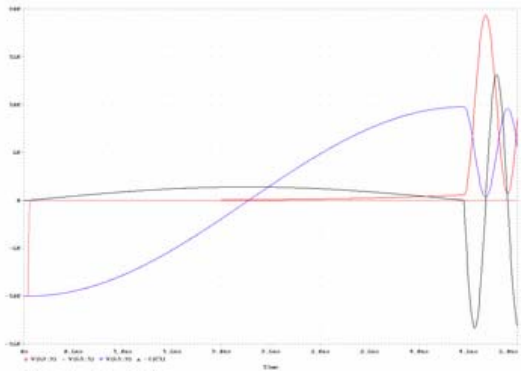
回路素子:キャパシタ, インダクタ,

2.12 倍電圧＋MPC 回路



・コンデンサ C_1 の電圧, 電流は反転する

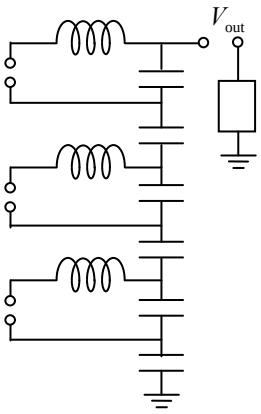
回路素子に加わる電圧を考える



2.13 LC 反転回路

マルクス回路と同様にキャパシタは1つの電源から並列に充電するが, 充電の方向が違っている。また 1 つおきにキャパシタにインダクタンスとスイッチがついている。スイッチを同時に動作させると, キャパシタの電圧は LC 振動して, やがて反転する。この状態では各キャパシタの和の電圧が出力されるので, 出力が最大になる時刻で負荷が放電するなどとすれば, 高電圧を得ることができる。

スタックライン:ケーブルを積み重ねて出力電圧を増やす方式で, LC 反転回路の PFL 版である。



第3章　回路素子

3.1　キャパシタ

$$U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon S}{d}\right)(Ed)^2 = \frac{\varepsilon}{2}E^2 Sd$$

エネルギー密度の最大値:

$$u_{\max} = U / V_{\text{olume}} = \frac{\varepsilon}{2}E_{\max}{}^2 :$$ →表

100V/μm. 3, Umax=1.3×10^5 J/m3

ε_0 = 8.854×10^{-12} [F/m]

極板間に働く力(引力)は仮想変位の方法から以下のようになる，なお x は電界と逆方向。

$$F_x = -\left(\frac{\partial W_e}{\partial x}\right)_{V一定} = \frac{V^2}{2}\frac{d}{dx}C = \frac{V^2}{2}\left(\frac{-\varepsilon S}{d^2}\right)$$

$$= -\frac{\varepsilon}{2}\left(\frac{V^2}{d^2}\right)S = -\frac{\varepsilon}{2}E^2 S$$

あるいは，導体に働く力は単位面積当たり $\frac{\varepsilon}{2}E^2$ だから，$F_x = -\frac{\varepsilon}{2}E^2 S = -\frac{\varepsilon}{2}\left(\frac{V^2}{d^2}\right)S$

	絶縁耐力 MV/m	比誘電率	エネルギ密度
空気	3	1	4.0E+01
SF6 1atm	8	1	2.8E+02
マイカ	200	7	1.2E+06
石英	30	3.8	1.5E+04
セラミック	12	7	4.5E+03
ポリエチレン	150	2.3	2.3E+05
カプト(R)	280	3.6	1.2E+06
テフロン	60	2	3.2E+04
パラフィン	10	2.3	1.0E+03
油含浸紙	15	6	6.0E+03
エチレングリコール	20	39	6.9E+04
シリコンオイル	14	2.8	2.4E+03
絶縁油	27	2.2	7.1E+03
精製水(数μ秒)	80	80	2.3E+06
チタン酸バリウム	10	5000	2.2E+06

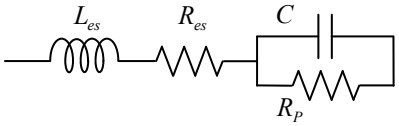
ギャップ間距離 x とした。電圧が変化すると極板間に働く引き合う力が変化する。振動電流が流れる場合は，機械力が繰り返し加わり，電極接続部の破損や，誘電体材料の劣化につながる。

キャパシタの等価回路

等価直列インダクタンス: L_{es}

等価直列抵抗: R_{es}　キャパシタ内部の接続線および外部に引き出すリード線

並列漏れ抵抗: R_P　材料固有の値:例 100MΩ



高電圧用フィルムコンデンサ

・1 つ当たりのキャパシタンス大

・キャパシタンスの温度変化少

・電流反転で寿命短縮

・インダクタンスが比較的大きくなる

高電圧用セラミックコンデンサ(ドアノブ型)

・小型，高耐圧，低インダクタンス(数～10nH)

・温度上昇で静電容量変化(BaTiO3)

・電圧印加でキャパシタンス減少(BaTiO3)

SrTiO3 は上記変化小だが誘電率小

水コンデンサ

・比誘電率は約 80(状本，温度上昇と共に低下)

・大きな誘電率と絶縁耐力

・比誘電率の周波数依存性は 1GHz 以下では小

・体積抵抗率は不純物により大きく変化

精製水 1×10^5Ωcm，水道水 1×10^2Ωcm

・等価回路は，C と R の並列回路

高速充電が必要:充電エネルギーに対する

充電時のエネルギー損失比を計算してみよ

3.2 インダクタ

インダクタの蓄積エネルギー: $U = \frac{1}{2}LI^2$

ソレノイドコイルの自己インダクタンスを代入すると $U = \frac{1}{2}\frac{\mu\pi r^2 N^2}{\ell}I^2$ である。仮想変位の方法より

$$F = \left(\frac{\partial U}{\partial \ell}\right) = \frac{\mu\pi r^2}{2}(NI)^2\frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{1}{\ell}\right)$$

ソレノイドは内部にのみ磁界があるので

$H = \frac{NI}{\ell}$, $I = \frac{\ell H}{N} = \frac{\ell B}{\mu N}$, より $NI = \frac{\ell B}{\mu}$

$$-F = \frac{\mu\pi r^2}{2}(NI)^2\frac{1}{\ell^2} = \pi r^2\frac{\mu}{2\ell^2}\frac{\ell^2 B^2}{\mu^2} = \pi r^2\frac{B^2}{2\mu}$$

コイル断面積でわれば，単位面積当たりの力は

$-F = \frac{B^2}{2\mu_0}$ [N/m^2]

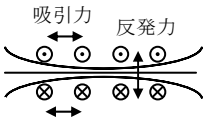
半径方向の力も同様に

$F = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right) = \frac{2\mu\pi r}{2\ell}(NI)^2$ より，

$$F = \frac{2\mu\pi r}{2\ell}\left(\frac{\ell B}{\mu}\right)^2 = 2\pi r\ell\frac{B^2}{2\mu}$$

コイルの内面積で割れば，$F = \frac{B^2}{2\mu_0}$

コイルの長さ方向では巻線間に吸引力，半径方向には反発力が働く。コイルは内径方向に拡がろうとする。



なお単位体積あたりのエネルギーは

$$u = \frac{1}{2}\frac{\mu\pi r^2}{\ell}(NI)^2\frac{1}{\pi r^2\ell} = \frac{\mu}{2\ell^2}\left(\frac{\ell B}{\mu}\right)^2 = \frac{B^2}{2\mu}$$

[J/m^3=Nm/m^3]

実際のコイルのインダクタンス

単線円形コイル

$$L = 10^{-7}\times 4\pi R\left(\ln\frac{R}{r} - 2 + \delta\right)$$

$r/R < 0.2$，直流では $\delta = 0.25$

単層円筒形コイル（長岡係数）

$$L = 10^{-7}\times\lambda\frac{(2\pi rN)^2}{\ell}$$

r :円筒半径，ℓ :コイル長さ，N :巻数

λ :長岡係数

パルスパワー使用時のコイルが受ける変化

- コイル温度

  $T \propto J^2 \times \tau$（電流密度×パルス幅）
- 電磁力:コイルの半径方向に働く力

  $F \propto (NI)^2$（起磁力の 2 乗）

  巻線の引っ張り応力 $F_T \propto F \propto (NI)^2$

例えばソレノイドコイルでは蓄積エネルギーは

$U = \frac{1}{2}\frac{\mu\pi r^2}{\ell}(NI)^2$ なので，限界値はコイル巻線の引っ張り応力限界，つまりコイルの破壊強度で決定される。値は概ね $u \simeq 10^7$ J/m^3