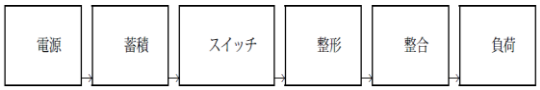
1.4 パルスパワー装置の構成とエネルギー蓄積

大電力短パルス発生のために複数回路要素が必要

1） 電源，エネルギー源
2） エネルギー蓄積要素
3） スイッチ素子
4） パルス整形回路
5） インピーダンス整合回路
6） 負荷



エネルギーの蓄積形態

- 静電エネルギー(Electrostatic Energy)
- 磁気エネルギー(Magnetic Energy)
- 運動エネルギー(Kinetic Energy)
- 化学エネルギー(Chemical Energy)
- 位置エネルギー(Potential Energy)

この講義では電気エネルギー（静電，磁気）を対象とする。

1.5 容量性エネルギー蓄積方式

電界のエネルギーをコンデンサ（キャパシタ）に蓄積して，投入（または短絡）スイッチ（OFF から ON に変化）により取り出す方式

電界のエネルギーと容量性蓄積

上下の電極間に電圧 $V(=Q/C)$ まで充電する過程は，上部電極の電位が V のとき電荷を dq 増加させるのに必要な仕事量は，$dW_{\mathrm{e}}=V\bullet dq$ だから

$$W_{\mathrm{e}}=\int_0^Q V\bullet dq=\int_0^Q \frac{q}{C}dq=\frac{1}{2C}Q^2=\frac{1}{2}CV^2 \quad [\mathrm{J}]$$

電圧の外部電源によって充電すると考えると

$$W_{\mathrm{e}}=\int_0^t V\bullet I\,dt=\int_0^t V\frac{dq}{dt}dt=\int_0^Q V\bullet dq=\frac{1}{2}CV^2$$

$C=\dfrac{\varepsilon W\ell}{d}=\varepsilon\dfrac{S}{d}$ [F]だから，静電エネルギー密度は

$$u_{\mathrm{e}}=\frac{\frac{1}{2}CV^2}{S\bullet d}=\frac{1}{2}\varepsilon\frac{S}{d}\frac{1}{Sd}V^2=\frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{d}\right)^2=\frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r E^2$$

結局，$u_{\mathrm{e}}=\dfrac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r E^2$ [J/m^3]。

重量あたりは誘電体の密度 ρ [kg/m^3]より，

$u_{\mathrm{we}}=\dfrac{1}{2\rho}\varepsilon_0\varepsilon_r E^2$ [J/kg]。

1.6 誘導性エネルギー蓄積方式

コイル電流によって磁界のエネルギーを蓄積し，開放スイッチ（ON から OFF）により取り出す方式

磁界のエネルギーと誘導性蓄積

固定ループに一定電流 I が流れている。ループの周囲に発生する磁界 B が持つ全エネルギーは

$u_m=\dfrac{B^2}{2\mu}$ より，　$W_m=\int_v u_m\,dv$ から求める。

ループ内の全磁束: $\Phi=L\,I$ であり，電流を変化させる場合に妨げる方向に発生する起電力は

$U=\dfrac{d\Phi}{dt}=L\dfrac{di}{dt}$。 よって外部からの仕事

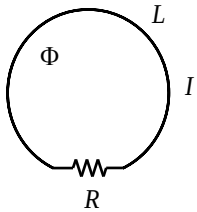
$dW=Ui\,dt=Li\,di$ を，ループ電流が 0 から I になるまで積分して $W_m=\int dW=\int_0^I Li\,di=\dfrac{1}{2}LI^2$

$\dfrac{d\Phi}{dt}=L\dfrac{dI}{dt}=-IR$。 一方磁界のエネルギー変化量は。

$\dfrac{dW_m}{dt}=\dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{1}{2}LI^2\right)=LI\dfrac{dI}{dt}=-I^2R$。 抵抗でのエネルギー消費量に一致。

エネルギーの保持時間（1巻コイル）は，インダクタンス $L\simeq\dfrac{\mu\pi a^2}{\ell}$，抵抗

$R=\rho\dfrac{2\pi a}{\ell\delta}$，より，エネルギー保持時定数は $\tau\simeq\dfrac{\mu}{2\rho}a\delta$（$\rho$，$\delta$ はコイルの厚みと低効率）。$a=100\,\mathrm{mm}$，$\delta=1\,\mathrm{mm}$，$\mu=4\pi\times10^{-7}$ H/m，$\rho=1.7\times10^{-8}\ \Omega\cdot\mathrm{cm}$（20℃銅）より，$\tau\simeq3.7\,\mathrm{ms}$。この時定数よりも十分短時間内に蓄積と放出が必要。



実際の回路例：省略

右図で，初期状態でインダクタ L_1 に電流が $i_1(t)$ 流れているとする。$R(t)$ は時間と共に急激に増加するスイッチの抵抗をあらさし，R_L はプラズマなどの負荷抵抗を表す。回路方程式は，

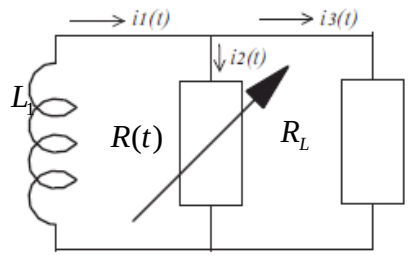
$$i_1(t) = i_2(t) + i_3(t)$$

$$L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + i_2(t)R(t) = 0$$

$$i_2(t)R(t) = i_3(t)R_L$$

だから，整理して以下の微分方程式を得る。

$$\frac{di_1(t)}{dt} + \frac{R(t)\cdot R_L}{L_1\left(R(t)+R_L\right)} i_1(t) = 0$$



なお，$R(t)$ は時間と共に変化するので，積分項を残す。

$$i_1(t) = I(0)\exp\left\{-\int \frac{R(t)\cdot R_L}{L_1\left(R(t)+R_L\right)} dt\right\}$$

ただし，$i_1(0) = I(0)$。また負荷電流 $i_3(t)$ は，

$$i_3(t) = I(0)\frac{R(t)}{R(t)+R_L}\exp\left\{-\int \frac{R(t)\cdot R_L}{L_1\left(R(t)+R_L\right)} dt\right\}$$

ここで，$R(t) = mt$，m :定数，とおき積分すると，

$$i_3(t) = I(0)\frac{mt}{mt+R_L}\exp\left\{\frac{R_L{}^2}{mL}\ln\left[\frac{mt+R_L}{R_L}\right] - \frac{R_L t}{L}\right\}$$

抵抗負荷 R_L で消費される電力 $P(t) = \left(i_3(t)\right)^2 R_L$ は，$\tau = \sqrt{\frac{L}{m}}$ の時に最大となる。

$$P_{\max} = \left(i_3(\tau)\right)^2 R_L$$
$$= \frac{I(0)^2 R_L \alpha^2}{\left(1+\alpha\right)^2}\exp\left[\left(\frac{-2}{\alpha}\right) + \left(\frac{2}{\alpha^2}\right)\ln\left(1+\alpha\right)\right]$$

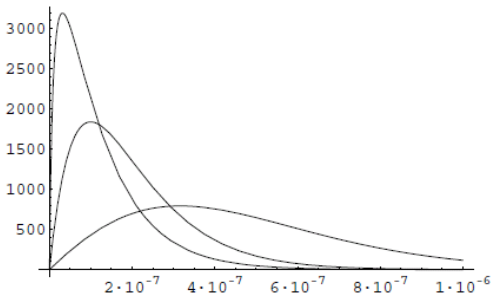
ここで，$\alpha = \sqrt{\frac{mL}{R_L{}^2}}$ 。

Q　$i_3(t)$ を解析的に解け

Q　$R(t) = R_0\exp(at)$，a :定数，とした場合の $i_3(t)$ を導け

$R_L = 50\,\Omega$，$L = 1\,\mu\mathrm{H}$，$I(0) = 5000\,\mathrm{A}$，

$m = 10^9\,\Omega\mathrm{sec}^{-1}$，$m = 10^8\,\Omega\mathrm{sec}^{-1}$，$m = 10^7\,\Omega\mathrm{sec}^{-1}$，
とした場合の負荷電流 $i_3(t)$ の波形を右図に示す。
ピーク電流（電力）は，スイッチング時間が短いほど大。



Q　Scilab で $i_3(t)$ の波形を書け

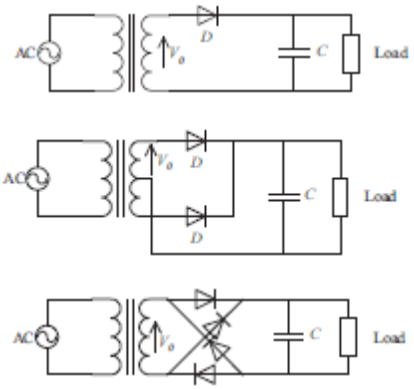
1.7 高電圧充電回路

整流回路

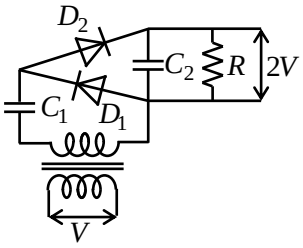
半波整流回路(Half-wave rectification circuit)

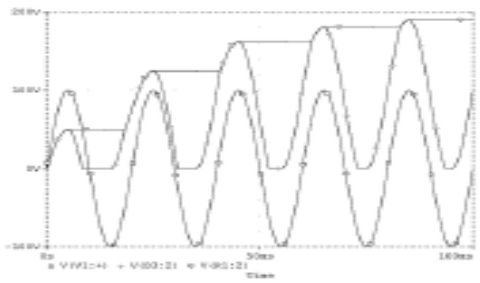
全波整流回路(Full -wave rectification circuit)

ブリッジ整流回路(Bridge rectification circuit)



ビラード回路(Villard circuit)





Q　各部電圧を描く，頭の中，PSpice を使って

コッククロフト・ウォルトン回路

Cockcroft-Walton circuit20 世紀の初頭にイギリスの物理学者であるコッククロフトとウォルトン

バンデグラフ発電機(Van de Graaff Generator)

絶縁ベルトに電荷を付与して，高圧側電極に電荷を集めて高電圧を得る方式。取り出し電流はベルトのスピードと帯電電荷量に制限され大きくないが，電圧は極めて高い値が得られる。