

RLC 回路の過渡現象（後半）

1 目的

パルス大電流の取り扱い、及びそれを利用した LCR 回路の過渡現象を理解する。

2 原理

2.1 コンデンサ放電

大電流をソレノイド L に流すことで強い磁場 B を発生させる。このためには大きな電流 I が必要となり、本実験ではコンデンサ放電を用いる。コンデンサ放電では、コンデンサ C を高電圧で充電することにより大電荷 Q を貯めることができ、この Q を急速放電 ($\frac{d}{dt} \gg 1$) させることで、 $\frac{dQ}{dt} = I$ により大きな I を発生させる。

2.2 RLC 回路における過渡現象の原理

キルヒホッフの第 2 法則より RLC 回路では以下の回路方程式が成り立つ。

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = E$$

ここで、 $D = \left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}$, $\alpha = -\frac{R}{2L}$, $\beta = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$, $\beta' = \sqrt{-\left\{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}\right\}}$ とおくと、電流 i は以下の式で描かれる。

$$D > 0 \text{ のとき } i = \frac{E}{\beta L} e^{\alpha t} \sinh \beta t$$

$$D < 0 \text{ のとき } i = \frac{E}{\beta' L} e^{\alpha t} \sinh \beta' t$$

$$D = 0 \text{ のとき } i = \frac{E}{L} e^{\alpha t}$$

このとき、電流 i は $D > 0$ のとき過減衰、 $D = 0$ のとき臨界減衰、 $D < 0$ のとき不足減衰となる。

3 実験

3.1 実験器具

TEKTRONIX TBS1022 オシロスコープ, ソレノイドコイル, 高電圧パルス大電流発生電源, セメント抵抗 (1Ω), 可変抵抗 ($< 20\Omega$)

3.2 実験方法

3.2.1 セットアップ

1. 図 1 のように回路を作成する.
2. 充電電圧調整ダイヤルがゼロになっていることを確認してから, パルス電源の電源スイッチを ON にする.
3. 電圧調整ダイヤルをゆっくりと回し, 充電電圧を調整する. 本実験では, 50 V 以下の電圧で行う.

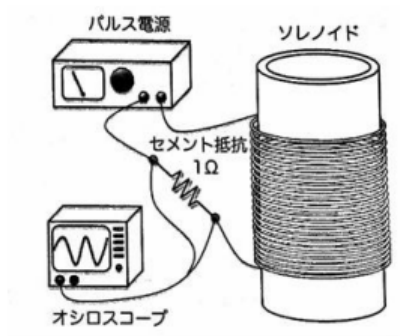


図 1 実験装置

3.2.2 L の測定

図 1 に示す実験配置において, パルス電流を流した際にセメント抵抗 (1Ω) の両端にかかる電圧波形を記録する. ただし, パルス電源内には, $12\mu\text{F}$ のコンデンサが入っており, L の計算を行う際には, セメント抵抗の抵抗値 (1Ω) は無視して良いとする. さらに, 電圧波形から周期 T を測定することで, ソレノイドのインダクタンス L の値を算出する. このときインダクタ L は, 以下の式で算出される.

$$L = \frac{r^2}{4\pi^2 C}$$

3.2.3 R の決定

実験課題 1 から算出したインダクタンス L の値を用いて, 電流波形が臨界制動波形となる際の R の値を計算し, 実際にその抵抗 R を回路に接続することで電流波形が臨界制動波形となることを確認し, 記録する. このとき, 抵抗値 R は以下の式で算出される.

$$R^2 = \frac{4L}{C}$$

4 結果

4.1 実験課題 1

パルス電源を流した際の電圧波形を図 2 に示す．周期 T は $T = 400 [\mu\text{s}]$ と測定される．よって，

$$L = \frac{(400 \times 10^{-6})^2}{4\pi^2 \times 12 \times 10^{-6}} \approx 338 [\mu\text{H}]$$

と求められる．

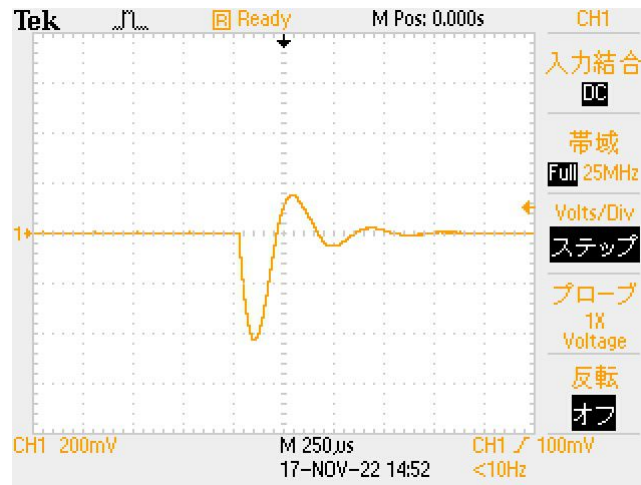


図 2 セメント抵抗 (1Ω) の両端にかかる電圧波形

4.2 実験課題 2

実験課題から算出したインダクタンス L の値を用いると、抵抗値 R は

$$R = \sqrt{\frac{4 \times 337.7 \times 10^{-6}}{12 \times 10^{-6}}} \approx 10.6 [\Omega]$$

と求められる。さらに、可変抵抗を調整し、実際に抵抗 R を回路に接続すると図 3 に示すように電流波形が臨界制動波形となる結果を得られた。

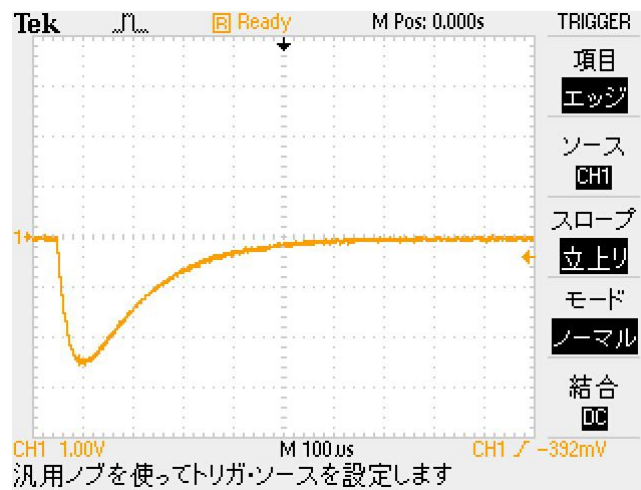


図 3 臨界制動波形

5 データ解析と考察

1. 実験課題 1 で得られた L の実験値を理論値と比較せよ。なお、計算においては長岡係数を考慮すること。

ソレノイドコイルの自己インダクタンス L は、ソレノイドコイルの半径を a 、長さを b として以下の式を用いて求めることができる。

$$L = \pi \lambda a^2 \mu_s \mu_0 \frac{N^2}{b}$$

また、コイルの直径と長さの比は以下の式を用いて求めることができる。

$$k = \frac{2a}{b}$$

ここで、ソレノイドコイルの測定では、 $a = 0.0465 \text{ [m]}$, $b = 0.250 \text{ [m]}$ となった。このとき、コイルの直径と長さの比は

$$k = \frac{2 \times 0.0465}{0.250} = 0.372$$

となる。テキスト p54 の表 2: 長岡係数表を参考にすると、求めた値 0.372 に近い 0.4 場合長岡係数 λ は 0.850 と求められる。したがって、 $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ [H/m]}$, $\mu_s = 1 \text{ [H/m]}$ から、ソレノイドコイルの自己インダクタンス L は、

$$L = \pi \times 0.850 \times (0.0465)^2 \times 1 \times 1.257 \times 10^{-6} \times \frac{92^2}{0.250} \doteq 246 \text{ [\mu H]}$$

と求められる。ここで L の実験値と理論値を比較すると、その相対誤差率は、

$$\frac{337.7 - 245.7}{245.7} \doteq 37.4 \text{ [%]}$$

となる。

2. (1) で計算した L の理論値を用いて、臨界制動となるとき R の値を算出せよ。また、実験的に求めた R の値と比較し、 R の値が異なるときは、その原因を考察せよ。

(1) で算出した L の理論値を用いると、抵抗値 R の値は、

$$R = \sqrt{\frac{4 \times 245.7 \times 10^{-6}}{12 \times 10^{-6}}} \doteq 9.05 \text{ [\Omega]}$$

と求められる。ここで、 R の実験値と理論値を比較すると、その相対誤差率は、

$$\frac{10.60 - 9.049}{9.049} \doteq 17.1 \text{ [%]}$$

となる。

この相対誤差率の原因として、周期 T の読み取り誤差が考えられる。オシロスコープの横軸の一目盛りは $50 \mu\text{s}$ であり、読み取り誤差が $\pm 5 \mu\text{s}$ 生じる可能性がある。この誤差が生じた際、抵抗値 R は $\pm 0.13 \Omega$ の誤差が生じるため、相対誤差が発生した。

6 宿題

1. サイリスタ (SCR) の動作原理を調べよ.

サイリスタは、ゲート (G) からカソード (K) にゲート電流を流すことにより、アノード (A) とカソード (K) 間を導通させることができる 3 端子の整流素子である. 図 4(a) はサイリスタの簡単な構造図で, P 型, N 型, P 型, N 型の順に半導体を接合した 4 層構造で, 途中の P 型半導体にゲート端子を取り付けた構造になっている. また, サイリスタは, 図 4(b) のように, PNP トランジスタと NPN トランジスタとを組み合わせた複合回路としてみることもできる.

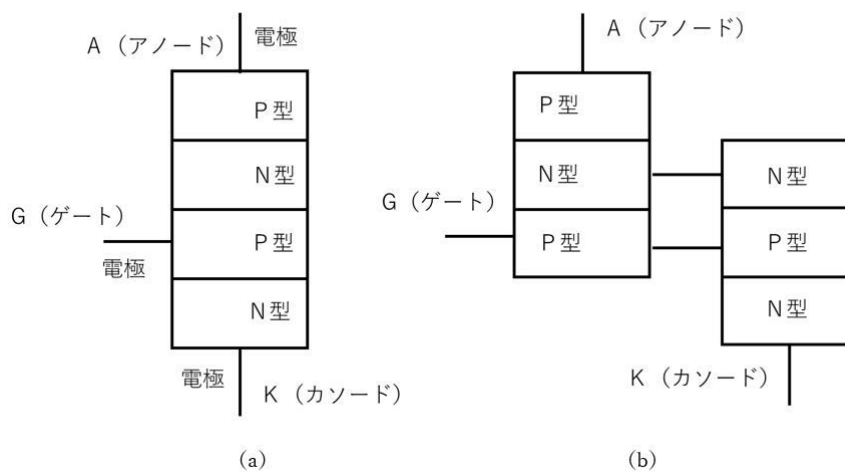


図 4 サイリスタの構造イメージ

ゲート (G) に電流が流れない場合 ($I_G = 0$) には, $Tr2$ は OFF 状態になっていて $Tr2$ のコレクタには電流 (I_{C2}) は流れない. そのため, $Tr1$ のベース (I_{B1}) にも電流は流れず, $Tr1$ も OFF の状態になっている. この状態ではアノード (A) に電圧が加わってもサイリスタの電流は流れない.

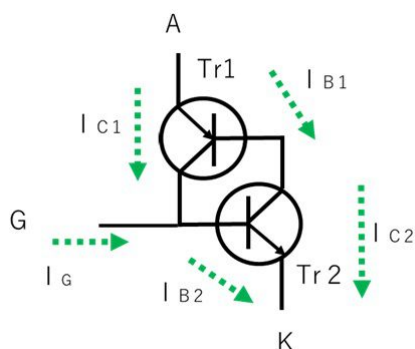


図 5 サイリスタの基本動作

ゲート (G) すなわち $Tr2$ のベースに電流 (I_G) が流れた場合, $Tr2$ は ON 状態になる. これにより $Tr2$ のコレクタを通して $Tr1$ のベース電流 (I_{B1}) が流れる. $Tr1$ にベース電流が流れるので, $Tr1$ は ON 状態になる. そして, $Tr1$ のコレクタを通して $Tr2$ のベースに電流 (I_{B2}) が流れる.

$Tr1$ から $Tr2$ のベースに電流が流れるので, ゲートの電流が無くなってもサイリスタのアノード (A) 側からカソード (K) 側には電流が流れ続ける. これを「自己保持状態」という.

また, 導通状態を停止させるには, アノード (A) とカソード (K) 間の電流を一定値以下に下げることが必要である.

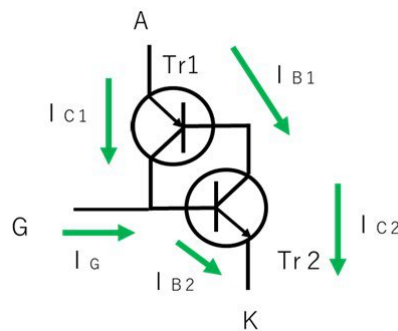


図 6 自己保持状態

参考文献

- [1] Wikipedia 磁気定数 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%B0%97%E5%AE%9A%E6%95%B0>
- [2] アイアール技術者教育研究所 3分でわかる技術の超キホン サイリスタとは? 原理・使い方などをわかりやすく解説 <https://engineer-education.com/thyristor/>