

## 1. 目的

インパルス電流を実験室で発生させ、それを計測する事により、LCR 回路の過渡現象、高電圧コンデンサの取り扱い、高電圧大電流計測の理解を深める。

絶縁試験に伴い、懸垂がいしによる乾燥フラッシュオーバ試験を行う。この実験により絶縁試験の知識と身近にあるガイシの特徴を理解する。

## 2. 実験概要

### (1) インパルス電流の発生

大容量のコンデンサを使用し充電する。充電したところから放電させる。今回の実験では 45kV の電圧を発生させる。これは電線にかかる電圧が 6.6kV と考えると、約 6 倍の電圧であり、今までの行ってきた実験の中で最も高い電圧である。

### (2) インパルス電流の測定

測定は大電流を使用、尚且つインパルス電流を測定したいため、応答速度の速いオシロスコープを用いなければならない。オシロスコープは電圧測定を行う機器のため、分流抵抗器を使用して電流を測定する。また、オシロを電磁誘導から保護するための工夫として、オシロスコープはなるべく離れた位置に置き測定を行う。さらに、同軸ケーブルを使用すること、それを 2 本用意し平行にすることにより、誘導起電力のだいたいを相殺することができる。

その他に、充電を行うコンデンサの故障を防ぐため、電流計を用いる。このために高抵抗を用いなければならない。そのため、抵抗にはガード電極を使用し漏れ電流が起きないように工夫しなければならない。

また、図 1 から電流値を求める式は以下ようになる。

$$i = v \frac{r + R_1 + R_3}{r R_5}$$

$R_1, R_2, R_3, R_4$  はマッチング抵抗であり  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 75\Omega$ 、 $r \ll R_1, R_3$  となる。

$R_5, R_6$  はマッチング抵抗値の分圧される部分の抵抗であるため  $R_5 = R_6 = 75\Omega$  とする。これより

$$i = v \frac{2}{r} \quad \dots (1)$$

と表される。

### (3) インパルス電流の理論値の導出

波高値  $i_m$  を求める式として、以下のように表す。

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \dots (2)$$

とすれば、電流波形  $i(t)$  として

$$i(t) = \frac{E}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[ \frac{-\alpha t}{\sqrt{LC}} \sinh \left[ \sqrt{\alpha^2 - 1} \cdot \frac{t}{\sqrt{LC}} \right] \right] \quad \dots (3)$$

波高値までの時間  $t_m$  とすると

$$t_m = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \quad \dots (4)$$

$$i_m = E \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[ -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \right] \quad \dots (5)$$

となる。

#### (1) 球ギャップによる交流フラッシュオーバ電圧の測定

この測定では球ギャップを使用し、変圧値の特性を調べる。これを調べることは次に行われる懸垂がいしの乾燥フラッシュオーバ電圧試験へと続く。球ギャップは直径の等しい2個の金属球を使用し、2個の球の間を変えてフラッシュオーバを発生させる。また、この時にフラッシュオーバ電圧の補正を行わなければならない。以下に補正方法を示す。

相対空気密度  $\delta$  が 0.95～1.05 のとき

$$V = \delta V_n \quad \dots (式 1)$$

ただし、

$V$  : フラッシュオーバ電圧 (kV)

$V_n$  : 標準気圧、標準温度における放電電圧 (kV)

$\delta$  : 相対空気密度

$$\delta = \frac{b}{101.3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \quad \dots (式 2)$$

$b$  : 測定時の気圧 (kPa)

$t$  : 測定時の気温 (°C)

#### (2) 懸垂がいしによる乾燥フラッシュオーバ電圧試験

懸垂がいしに電圧を加えていき、フラッシュオーバ時の電圧を測定する。なお、この実験により、標準大気状態のフラッシュオーバ電圧を求める。ここで、懸垂がいしの絶縁特徴を調べる。

標準大気状態を計算するため、以下の式によって補正を行う。

$$V_s = V_{\delta h} \cdot \frac{K_h}{K_d} \quad \dots (式 3)$$

ここで、

$V_s$  : 標準大気状態におけるフラッシュオーバ電圧

$V_{\delta h}$  : 対空気密度  $\delta$ 、絶対湿度  $h$  におけるフラッシュオーバ電圧

$K_d$  : 空気密度補正係数

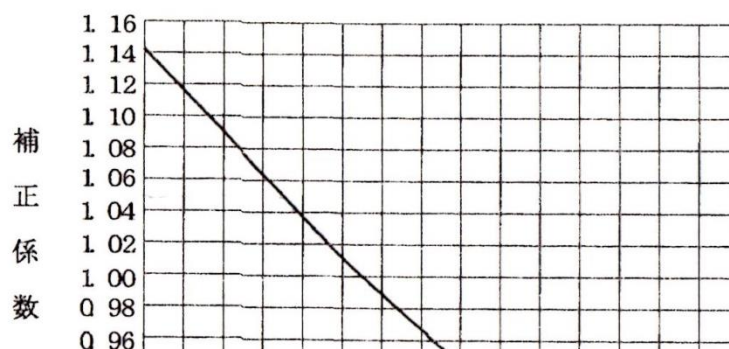
$K_h$  : 湿度補正係数

また、規約実効値を求めるため以下の式を用いる。

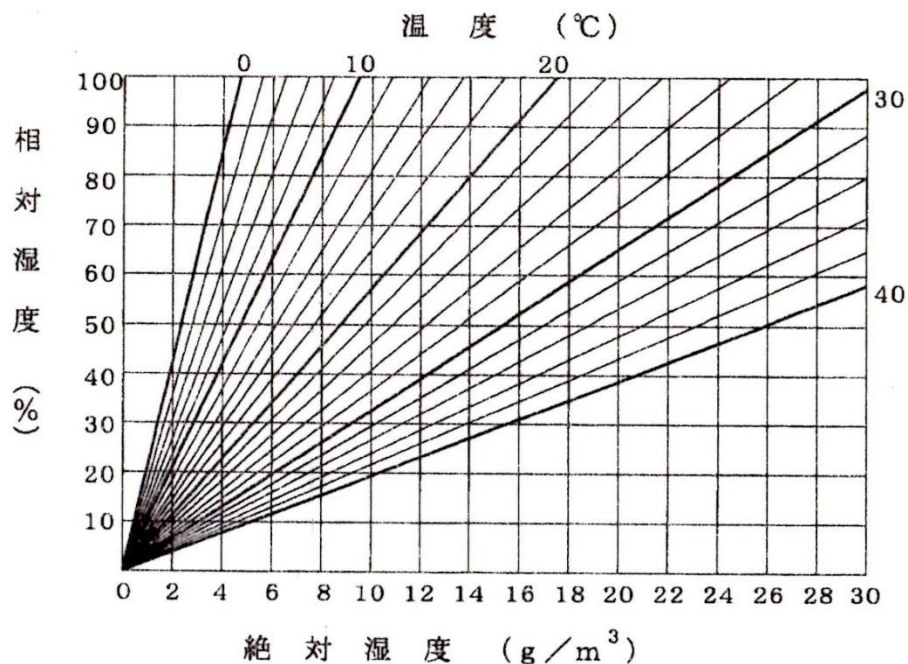
規約実効値とはフラッシュオーバ電圧が生じるときの電圧の実効値をいう。

$$\text{規約実効値} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} \quad \dots (式 4)$$

なお、湿度補正係数は電気工学実験ⅡA・ⅡBの1-8の図1と1-9の図2から参照したものを以下の図(a)、(b)としこれを求める。



図(a) 湿度補正曲線



図(b) 絶対湿度と相対湿度の関係

(3) 全体を通して注意すること

本実験では高電圧を使用するため万全の安全策をとってある。その中でも球ギャップと懸垂がいしの接地棒を取り外すとき、体が接地棒より測定物に近いと体に放電を行う危険性があるため、重々注意することが必要である。

3. 使用機器

実験で使用した機器を以下の表 1 に示す

表 1 使用機器

名称	メーカー名	型番	規格
オシロスコープ	YOKOGAWA	7107110	200MHz
電流計 ( $\mu A$ )	TAKEMOTO	1558	可動コイル型
電流計 (mA)	YOKOGAWA	2142	交流、CLASS1.5
電圧計	YOKOGAWA	1102	45~65Hz、交流
コンサレータ	_____	_____	_____
コンデンサ	_____	_____	2 $\mu F$
抵抗	_____	_____	375M $\Omega$ 、8 $\Omega$
コイル	_____	_____	10 $\mu H$

品名	規格
標準球ギャップ	球直径 125mm
標準懸垂がいし	25cm 1 個 18cm 2 個
接地棒	_____
遮断器	_____
スライダック	_____
試験用変圧器	_____
保護抵抗	50k $\Omega$
突入電流抑制装置	_____
電圧計	_____
気圧計	_____
温度・湿度計	_____

#### 4. 配線図

以下に実験で配線した回路図を図 1 に示す。

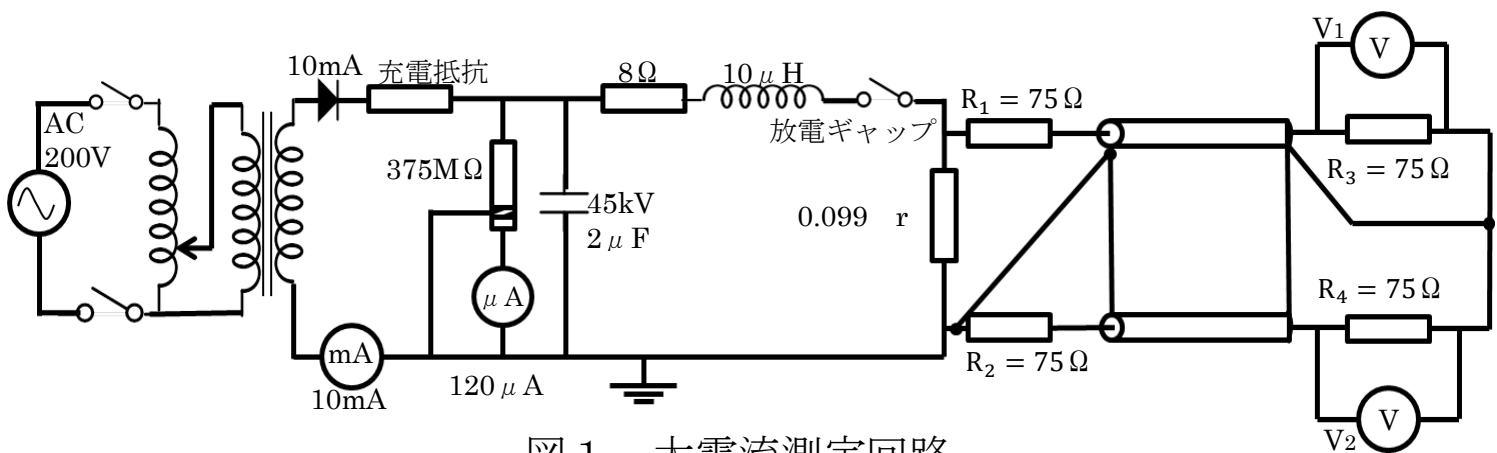
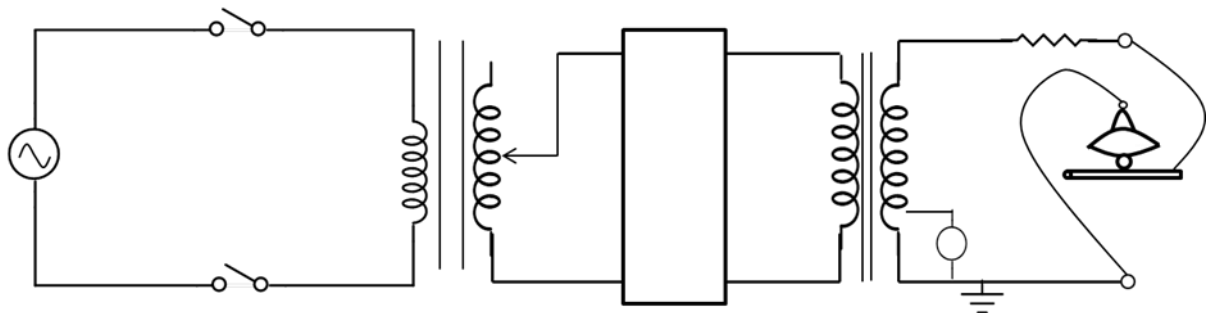


図 1 大電流測定回路



#### 5. 実験方法

- (1) コンデンサを使用するため、十分な注意を心がけること。
- (2) 図 1 のように回路を設置する。このとき、接地棒を用いて電流が体に流れないようにする。
- (3) オシロスコープに波形を測定できるように設定をする。
- (4) 二次側スイッチは 2 個の球体をくっつける事によりスイッチ（放電ギャップ）を

- ON にする。そのため、長い紐を利用しそれを引くことにより安全にスイッチを ON することができる。
- (5) ドアを閉め、メンバー全員が安全であることを確認し、遮断器を ON にする。
  - (6) 電源スイッチの入を押す。
  - (7) スライダックを操作し、コンデンサの充電を行う。このとき充電電流を  $10\text{mA}$  以下にする。これ以上だとダイオードが破損する恐れがある。最大充電電圧は  $45\text{kV}$  なので、 $\mu\text{A}$  計は  $120\mu\text{A}$  を超えないようにする。超えてしまうとコンデンサの寿命を縮めてしまう。
  - (8) 充電が終われば電源スイッチを切り、大声で全員に知らせた後、放電ギャップを閉じ、インパルス電流を発生させる。
  - (9) 発生した電流波形をオシロスコープのメモリーに記憶させ、波形と電流値を求める。
  - (10) スライダックの値を変えて充電電圧を変え、電流を流しその波形を測定する。
  - (11) 充電電圧、および、マイクロアンメータ指示値とインパルス電流波高値の関係を示す目盛り定め曲線を作成する。
  - (12) LCR 回路の過渡現象波形を計算して実験結果と照合し、検討を加える。

#### 実験 1：標準球ギャップのフラッシュオーバー電圧測定

- (1) 図 1 のように結線をし、試験用変圧器の 2 次巻線に標準球ギャップを接続する。(このとき、接続部分が外れないようにする。) その後、ギャップ長の長さを  $20\text{mm}$  に設定する。
- (2) 試験用変圧器の 2 次巻線と球ギャップとの間に接地棒を設ける。
- (3) 配電線から送られる  $6.6\text{kV}$  の電源スイッチを ON にする。
- (4) (2)の接地棒を外し、その先端を高電圧側に向けながら非難する。(自分が感電しないよう接地棒を電圧がかかっている側へと向ける)
- (5) 実験室内の気温、気圧、温度を読み取る。
- (6) 放電が行われる部屋のドアを閉める。(開いていると、装置が作動しない仕組みとなっている。)
- (7) スライダックの電圧を  $0\text{V}$  にして遮断器を ON にする。(0V としないと装置が作動しない)
- (8) スイッチ(高速遮断を行う)を ON に入れる。
- (9) スライダックの電圧を上昇させ、球ギャップを放電させる。なお、放電を 3 回行う。
- (10) V3 の電圧計の指示値を放電直前に読み、3 回行ったものの平均を取る。(スライダックが  $0\text{V}$  に戻ったことを確認すること。)
- (11) スライダックが  $0\text{V}$  に戻ったことを確認したら、スイッチ、遮断器を OFF にし、ドアを開く。
- (12) 接地棒を高電圧に注意しながら(2)と同様につなぐ。
- (13) 球ギャップの設定値を順次変え(4)～(12)の事項を繰り返す。
- (14) 実験時の気象に合うフラッシュオーバー電圧を求め、縦軸フラッシュオーバー電圧、横軸に V3 の電圧計の指示値をとる目盛り定め曲線を作る。

#### 実験 2：標準懸垂がいしによるフラッシュオーバー電圧試験

- (1) 実験 1 が終わった後、接地棒を(12)同様につなぐ。
- (2) 球ギャップとの接続を外す。
- (3) レバーにより懸垂がいしを天井よりおろし、図 2 のように接続する。測定は懸垂がいし(25cm)1 個、(18cm)1 個、(18cm)2 個の順で行う。

- (4) 各々を実験 1 の(4)～(12)と同様に行う。(ただし、(9)、(10)に関しては 5 回行い、その平均を求めるものとする)
- (5) 実験 1 で求めた目盛り定め曲線を利用して、実験当日の大気状態のフラッシュオーバー電圧を求める。
- (6) 標準大気状態のフラッシュオーバー電圧を求めるため、実験概要の式 3 を用いる。
- (7) 規約実効値を式 4 を用いて計算する。

## 6. 実験結果

また、LCR 回路の過渡現象を実験概要(3)を用いて算出する。

それぞれ  $L=10\mu\text{H}$ 、 $C=2\mu\text{F}$ 、 $R=8\Omega$ 、 $E$ =充電電圧である。まず、(2) 式を用いて  $\alpha$  を求めると、

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{8}{2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}}} = 1.788 = 1.79$$

となる。これを (5) 式に代入すると

$$\begin{aligned} i_m &= E \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[ -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \right] \\ &= E \sqrt{\frac{2}{10}} \cdot \exp \left[ -\frac{1.79}{\sqrt{1.79^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[ \frac{\sqrt{1.79^2 - 1}}{1.79} \right] \right] \\ &= 0.447E \cdot \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] \quad \dots \dots (6) \end{aligned}$$

と表せる。これより充電電圧が 7.5kV のときの電流波高値は

$$\begin{aligned} i_m &= 0.447E \cdot \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] = 0.447 \times 7500 \cdot \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] \\ &= 3353 \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] = 802.9 = 0.80[\text{kA}] \end{aligned}$$

となる。以下同様にして 43.5kV まで求める。

相対空気密度とフラッシュオーバー電圧の補正

実験概要の式 2 を使用する。一例としてギャップ長 20mm のときの求め方を以下に示す。なお、40mm 以降も以下同様に行う。

$$\delta = \frac{b}{101.3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \quad \dots \text{(式 2)}$$

より、

$$\delta = \frac{99.54}{101.3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 19.6} = \frac{99.54}{101.3} \cdot \frac{293}{292.6} = 0.99$$

次にフラッシュオーバー電圧の補正を行う。

先ほど求めた  $\delta$  は  $0.95 \leq \delta \leq 1.05$  の条件を満たすため、実験概要の式 1 を適用できる。

$$V = \delta V_n \quad \dots \text{(式 1)}$$

よって、補正後のフラッシュオーバー電圧は  $V_n=59.0\text{V}$  から

$$V = \delta V_n = 0.99 \times 59.0 = 58.6(\text{kV})$$

となる。

・電圧計の指示値 V3 の平均値

測定を 3 回行い、その平均値を算出する。一例としてギャップ長 20mm のときの求め方を以下に示す。なお、40mm 以降も同様の計算を行う。

測定値がそれぞれ、45kV、44kV、44kV なので平均値は

$$\text{平均値} = \frac{45 + 44 + 44}{3} = 44.3\text{kV}$$

となる。

## 7. 考察

、理論値から求めた電流波高値と実験によって求めた電流波高値を比較すると充電電圧 7.5kV のとき、 $|V_{理}-V_{測}|=|0.80-0.93|=0.13\text{kV}$  と誤差が出ていることがわかる。充電電圧が 14.6kV の場合は 0.01kV と 7.5kV より誤差は少ないと言える。また、43.5kV の場合は 0.18kV である。これらの誤差の原因は電線内に発生する電磁誘導が発生してしまったと考えられる。これは実験概要の (5) 式

$$i_m = E \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[ -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \right]$$

より、L が大きいほど電流波高値は小さくなるため、今回の誤差もこのことが原因と思われる。更に、電圧波形からも負の方向へ電圧が出ていることからリアクタンスが発生したと考えられる。

実験 2 の結果から、懸垂がいしは、がいしの口径と個数によって耐電圧が比例していることがわかる。また、電圧計の指示値と規約実効値が 25cm の懸垂がいしの場合、81.6kV、規約実効値は 82.8kV より、1.2kV の誤差である。この誤差は、電圧計の読み取りが人為的であるため、正確ではなかったと考えることが 1 つ。2 つ目として、ギャップ長の測定点が 20mm、40mm、60mm、80mm の 4 点であり、目盛り定め曲線が正確でなかったと考えられる。また、図(a),(b)から補正係数を導き出すことも人為的なため、ここでも誤差が出たと考えられる。

以上の誤差は出たが、18cm の懸垂がいしの場合は 1 個の時 63.9kV、2 個の場合に 113.7kV であったので、 $113.7-63.9=49.8\text{kV}$  増幅している。これより約 50kV 増えと考え、この回路の出力が 150kV から個数を増やしていくと 3 個で約 163kV となり、放電を防ぐことができる。懸垂がいし 25cm では 82.8kV で放電を行うため、25cm は 18cm の 1.4 倍の大きさなので、増幅する電圧は  $50 \times 1.4=70\text{kV}$  増えと考える。そのため、懸垂がいし 2 個を取り付けることにより  $82.8+70=152.8\text{kV}$  であり、放電を防ぐことができると考えられる。

## 8. 参考文献

図解電気 k の大百科