

# 充電電流遮断について (I)

技術部電力器具課 水 谷 明 蔵

## On the Problem of Interruption of Charging Current (I)

By Haruzō Mizutani

(Electric Power Apparatus Div., Eng'g. Dep't.)

### Synopsis

The problem of interruption of charging current is an important problem for the circuit breaker. Generally, this problem has been explained on the single-phase circuit, but there are many cases on the three-phase circuit, where the simple explanation cannot be applied, because the current of each phase will be interrupted one after another at the current zero condition.

The superposition theorem of the circuit can be applied for the solution of these phenomena, taking zero phase sequence impedance, positive phase sequence impedance and negative phase sequence impedance at both source side and line in series circuit.

In this article, in order to solve the problem, the subject will be divided and discussed in the 4 following chapters;

- I. Introduction.
- II. Interruption of charging current, neglecting the impedance at power source side.
- III. Some example of calculation for re-striking of arc.
- IV. Some example of calculation for interruption through ohmic resistance.

In the present Number, Chapter I to Chapter II, Item 5 will be described and the sequence will be given in the next Number. Synopsis of contents will be stated at the head of each chapter.

## I. 序 論

### Introduction

This chapter, the general equation for interruption of circuit is solved, assuming positive phase sequence impedance and negative phase sequence impedance to be equal.

### I. 緒 言

充電電流の遮断の問題については、自力型小油量遮断器が出現して以来小電流の遮断が難しいとされ、また長距離超高压送電線の発達にともない充電電流遮断時に生ずる再点弧のために発生する異常電圧が問題とされたりして、すでに久しく実験されかつ討議されてきている。

しかしその解決方法として他力型遮断器を採用して、再点弧無しあるいは再点弧1回以下とするようにしたり抵抗遮断を採用して再点弧時の異常電圧を抑制するようにはしたり、種々の工夫がおこなわれている。更に再点弧時の異常電圧の問題は単に遮断器の特性のみに帰因するのではなく、同時にその遮断器の設置してある個所における接地方式、すなわち直接接地、高抵抗接地、消弧リアクトル接地、あるいは非接地という条件により著しく影響されることも次第に明らかになってきた。

遮断の問題を取扱う上において遮断器にとって最も必

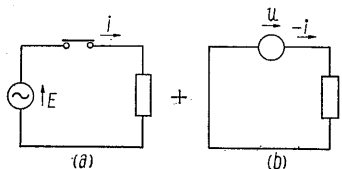
要なことは、電流消失後の極間電圧の時間的変化であり、更に極間電圧が判っていれば再点弧後の電流および線路電圧等の計算もできる。通常の説明では単相回路についてだけであって3相回路についてはあまり論じられていない。ある程度までは単相回路の結論を3相回路に適用できるが、3相回路では零相回路の影響が著しく効いてくるので相当に複雑な現象となる。更に3相回路における充電電流遮断を論ずる場合は、短絡電流遮断の場合と異なって、遮断のおこなわれる第1相の極間電圧を取扱ったのでは不充分であり、残りの第2相、続いて第3相までも考えなければならないのである。

いずれにせよ一般的に考えるには対称座標法を応用した過渡現象の計算によるのが最も便利であり、これによって遮断点における極間電圧を求めるのが最も近道である。しかし遮断点における極間電圧の計算の1例としては消弧リアクトル系における1相断線時の計算が後藤博士により発表されているが、その方法を借用させて載

くのが便利なので、表示記号もなるべくその文献にしたがって計算を進めてみたい。ただし今回の目的は1相遮断に引続いて、2相、3相の遮断までいくのであるから数式はそれに便利ようにならじめ考慮して置かねばならない。なおさしあたっては抵抗遮断は考えないで、自力型あるいは他力型で電流の自然零値で消弧されるものとして計算をする。

## II. 遮断の現象の一般的解析

最初に遮断現象とはどんなものであるかということを知り切ったことであるが理論的に考えてみよう。簡単に単相回路を取ってみると、第1図(a)の回路に電流*i*が

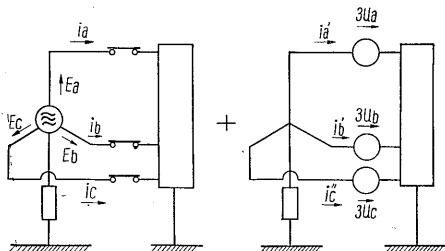


第1図 単相回路における遮断の等価回路  
Fig. 1. Equivalent circuit of interruption on single phase circuit

流れているとして、 $t=0$ 以後に第1図(b)の回路に電流 $-i$ が流れ始めたとするれば、(a)および(b)を重畳した状態が $t=0$ 以後における遮断現象を表わすことになる。(b)において遮断点に与えるべき起電力*u*が遮断器の極間電圧に相当するもので、これは元の電流ならびに回路条件により定まるもので、少しでも所定の値と異なれば電流は $-i$ とならず、(a)と(b)との電流の和は零とならないから、遮断はおこなわれぬこととなる。

上記の考え方を3相回路に拡張すれば遮断現象とは第2図(a)と(b)との重畳したものであることになる。この意味において今後は(b)の回路を補足回路と呼ぶこととする。

$3u_a, 3u_b, 3u_c$  はそれぞれ各相の極間電圧を表わし、 $i_a+i_a'=0, i_b+i_b'=0, i_c+i_c'=0$  とする。



第2図 3相回路における遮断の等価回路  
Fig. 2. Equivalent circuit of interruption on three phase circuit

### II-1 遮断の種類

#### (1) 3相同時遮断(強制消弧)

第2図の  $i_a+i_a'=0, i_b+i_b'=0, i_c+i_c'=0$  が同時に成立する場合である。

#### (2) 1相遮断

a相が遮断されたとするれば第2図に対して、

$$u_b = u_c = 0$$

$$i_a + i_a' = 0 \text{ が成立する。}$$

電流の自然零点で遮断されたとするれば、

$$i_a = \sqrt{2} I \sin \omega t \text{ であるから } i_a' = -\sqrt{2} I \sin \omega t$$

また強制遮断でa相だけが遮断されたとするれば、

$$i_a = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi) \text{ であるから}$$

$$i_a' = -\sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi) \text{ である。}$$

#### (3) 1相遮断に引続いての1相遮断

a相遮断に引続いてb相が遮断されたとするれば、補足回路においては初めから  $i_a=0$  であり

$$\text{さらに } u_c = 0$$

$$i_b + i_b' = 0 \text{ が成立する。}$$

#### (4) 1相遮断に引続いての2相同時遮断

a相遮断に引続いて、b、c相が同時に遮断される場合で、非接地系統の遮断は必ずこの現象がみられる。また強制消弧の強い場合もかようなことはおこなわれ得る。

この場合も初めから  $i_a=0$  であって

$$\text{さらに } i_b + i_b' = 0$$

$$i_c + i_c' = 0 \text{ が成立する。}$$

#### (5) 2相遮断に引続いての1相遮断

いわゆる第3相遮断であり、この場合は補足回路においては  $i_a=0, i_b=0$  になっていて、

$$\text{さらに } i_c + i_c' = 0 \text{ が成立する。}$$

### II-2 3相対称回路の遮断に対する補足回路

前節において述べたように遮断時の極間電圧を求めるには、II-1の種々の場合について順次に補足回路を解いて重畳していけばよいのであるが、これを解くには電流および電圧の瞬時値に対して対称座標法を適用するのが最も便利である。すなわち  $3u_a, 3u_b, 3u_c$  を極間電圧の瞬時値、 $i_a', i_b', i_c'$  を補足回路の電流の瞬時値として、それぞれの対称分の瞬時値を求めれば次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} 3u_{a0} &= 3u_a + 3u_b + 3u_c \\ 3u_{a1} &= 3u_a + 3a u_b + 3a^2 u_c \\ 3u_{a2} &= 3u_a + 3a^2 u_b + 3a u_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ただし } a = \varepsilon^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = \varepsilon^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\left. \begin{aligned} i_{a'0} &= \frac{u_{a0}}{Z_0} = \frac{1}{Z_0}(u_a + u_b + u_c) \\ i_{a'1} &= \frac{u_{a1}}{Z_1} = \frac{1}{Z_1}(u_a + au_b + a^2u_c) \\ i_{a'2} &= \frac{u_{a2}}{Z_2} = \frac{1}{Z_2}(u_a + a^2u_b + au_c) \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

ここに  $Z_0, Z_1, Z_2$  はいずれもヘビサイド演算子  $p$  を含むインピーダンスである。

多くの場合  $Z_1=Z_2$  としてさしつかえなく、また計算も簡単になるので本文においては全部  $Z_1=Z_2$  としておく。

したがって

$$\left. \begin{aligned} i_a' &= i_{a'0} + i_{a'1} + i_{a'2} \\ &= \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1}\right)u_a + \left(\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}\right)u_b \\ &\quad + \left(\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}\right)u_c \\ i_b' &= i_{a'0} + a^2i_{a'1} + ai_{a'2} \\ &= \left(\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}\right)u_a + \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1}\right)u_b \\ &\quad + \left(\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}\right)u_c \\ i_c' &= i_{a'0} + ai_{a'1} + a^2i_{a'2} \\ &= \left(\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}\right)u_a + \left(\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}\right)u_b \\ &\quad + \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1}\right)u_c \end{aligned} \right\} \dots(3)$$

以下紙面の節約のためマトリックスに取まとめて計算をおこなう。

$$\begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

ただし  $A = \frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_1}$   
 $B = \frac{1}{Z_0} - \frac{1}{Z_1}$

ここにおいて注目すべきことは、 $Z_0, Z_1$  は遮断点において電源側、および線路側をみた零相ならびに正相インピーダンスをそれぞれ直列に接続した総インピーダンスである、ということであって、(4)式は充電電流遮断のみならず 3 相短絡遮断にも適用し得ることも説明を要しないであろう。

II-3 3 相同時遮断時の補足回路

この場合は II-2 の(4)式から次の計算により各相極間電圧が求められる。

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix}$$

ただし  $\Delta = \begin{vmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{vmatrix} = (A-B)^2(A+2B)$

したがって

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \frac{1}{(A-B)^2(A+2B)} \begin{pmatrix} A^2-B^2 & -(A-B)-B(A-B) & B(A-B) \\ -B(A-B) & A^2-B^2 & -B(A-B) \\ -B(A-B) & -B(A-B) & A^2-B^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{(A-B)(A+2B)} \begin{pmatrix} A+B & -B & -B \\ -B & A+B & -B \\ -B & -B & A+B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix}$$

仮定により  $i_a' + i_b' + i_c' = 0$  であるから

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \frac{1}{(A-B)(A+2B)} \begin{pmatrix} (A+2B)i_a' - B(i_a' + i_b' + i_c') \\ (A+2B)i_b' - B(i_a' + i_b' + i_c') \\ (A+2B)i_c' - B(i_a' + i_b' + i_c') \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{A-B} \begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \frac{Z_1}{3} \begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

したがって極間電圧は次のようになる。

$$3u_a = \sqrt{2} I Z_1 \sin(\omega t + \varphi) A$$

$$3u_b = \sqrt{2} I Z_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \varphi) A$$

$$3u_c = \sqrt{2} I Z_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \varphi) A$$

ただし記号  $A$  は  $t < 0$  において 0  
 $t > 0$  において 1

となるものである。

II-4 1 相遮断の補足回路

この場合は II-1 の(2)項の条件を II-2 の(4)式に適用して、 $u_a, i_b', i_c'$  を求めることができる。

$$\begin{pmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

したがって

$$\begin{pmatrix} i_a' \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ B \end{pmatrix} u - \begin{pmatrix} 0 \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A u_a \\ B u_a - i_b' \\ B u_a - i_c' \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ B & -1 & 0 \\ B & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix}$$

ゆえに

$$\begin{pmatrix} u_a \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ B & -1 & 0 \\ B & 0 & -1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} i_a' \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} 1 \\ B \\ B \end{pmatrix} i_a'$$

ただし

$$\Delta = \begin{vmatrix} A & 0 & 0 \\ B & -1 & 0 \\ B & 0 & -1 \end{vmatrix} = A$$

したがって

$$\begin{pmatrix} u_a \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Z_1 Z_0}{Z_1 + 2Z_0} \\ \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + 2Z_0} \\ \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + 2Z_0} \end{pmatrix} i_a' \dots\dots\dots(6)$$

II-5 1相遮断に引続いての1相遮断に対する補足回路

この場合は II-1 の (3) 項の条件を II-2 の (4) 式に適用して,  $u_a, u_b$ , および  $i_c'$  を求めることができる。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ 0 \end{pmatrix}$$

したがって

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 0 \\ i_b' \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Au_a + Bu_b \\ Bu_a + Au_b \\ Bu_a + Bu_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ i_c' \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} Au_a + Bu_b \\ Bu_a + Au_b \\ Bu_a + Bu_b - i_c' \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} A & B & 0 \\ B & A & 0 \\ B & B & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ i_c' \end{pmatrix} \end{aligned}$$

したがって

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ i_c' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A & B & 0 \\ B & A & 0 \\ B & B & -1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ i_b' \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -\frac{B}{B-1} & 0 \\ A & 0 \\ -\frac{A}{B} & \frac{B}{B} \end{pmatrix} i_b' \end{aligned}$$

ただし

$$\Delta = \begin{vmatrix} A & B & 0 \\ B & A & 0 \\ B & B & -1 \end{vmatrix} = -(A^2 - B^2)$$

ゆえに

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ i_c' \end{pmatrix} = \frac{1}{A^2 - B^2} \begin{pmatrix} -B \\ A \\ B(A-B) \end{pmatrix} i_b'$$

$$= \frac{Z_1}{3} \frac{1}{Z_0 + 2Z_1} \begin{pmatrix} -(Z_1 - Z_0) \\ Z_1 + 2Z_0 \\ (Z_1 - Z_0) \frac{3}{Z_1} \end{pmatrix} i_b' \dots\dots(7)$$

II-6 1相遮断に引続き同時に2相遮断のおこなわれる場合の補足回路

この場合は II-1 の (4) 項の条件を II-2 の (4) 式に適用するのであるが II-3 と同様の計算により

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} &= \frac{1}{(A-B)(A+2B)} \begin{pmatrix} A+B & -B & -B \\ -B & A+B & -B \\ -B & -B & A+B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ i_b' \\ i_c' \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{(A-B)(A+2B)} \begin{pmatrix} -B(i_b' + i_c') \\ (A+B)(i_b' + i_c') - Bi_b' \\ (A+B)(i_b' + i_c') - Bi_c' \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{9} \begin{pmatrix} (Z_0 - Z_1)(i_b' + i_c') \\ (Z_0 - Z_1)(i_b' + i_c') + 3i_b' Z_1 \\ (Z_0 - Z_1)(i_b' + i_c') + 3i_c' Z_1 \end{pmatrix} \dots\dots(8) \end{aligned}$$

この場合は  $i_b' + i_c' = 0$  必ずしも成立しないことを付言しておきたい。

II-7 2相遮断に引続いて1相遮断のおこなわれる場合の補足回路

この場合は II-1 の (5) 項の条件を II-2 項の (4) 式に適用すれば,  $u_a, u_b, u_c$  を求めることができる。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ i_c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix}$$

したがって

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ i_c' \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \frac{B}{A} & \frac{B}{A} \\ \frac{A}{B} & \frac{A}{B} \\ \frac{A}{B} & \frac{A}{B} \end{pmatrix} i_c' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{(A-B)^2(A+2B)} \begin{pmatrix} -(A-B)B \\ -(A-B)B \\ A^2 - B^2 \end{pmatrix} i_c' \\ &= \frac{1}{(A-B)(A+2B)} \begin{pmatrix} -B \\ -B \\ A+B \end{pmatrix} i_c' \end{aligned}$$

したがって

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \frac{Z_1 Z_0}{9} \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_0} \\ \frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_0} \\ \frac{2}{Z_0} + \frac{1}{Z_1} \end{pmatrix} i_c' \dots\dots\dots(9)$$

III. 楕円数, 双曲数とヘビサイド演算子

過渡現象の研究にはヘビサイド演算子を利用して, そ

の公式集と対照していけばよい訳であるが、一々公式集を見るのは面倒である。これに対して楕円数および双曲数を応用すると非常に便利である。これは後藤博士の創意にもとづくものですでにかなり広くおこなわれているが、未知の人も多いと思うのでここには以後の計算に必要な範囲において簡単に紹介しておくことも無駄ではないと考える。

$$\text{まず } (A+jB)_{\omega t} = A \cos \omega t - B \sin \omega t$$

$$(A+kB)_{\beta t} = A \cosh \beta t + B \sinh \beta t$$

$$\text{ただし } j^2 = -1 \quad k^2 = 1$$

で表わされる ( ) をそれぞれ楕円数および双曲数と名付けている。これらに対しては次の算法が成立する。

$$\begin{aligned} (A+jB)_{\omega t} + (C+jD)_{\omega t} &= (A+C) \cos \omega t \\ &\quad - (B+D) \sin \omega t \\ &= ((A+C) + j(B+D))_{\omega t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (A+kB)_{\beta t} + (C+kD)_{\beta t} &= (A+C) \cosh \beta t \\ &\quad + (B+D) \sinh \beta t \\ &= ((A+C) + k(B+D))_{\beta t} \end{aligned}$$

複素数  $a+jb$  に対して  $a-jb$  をたがいに共役であるというのと同じに、 $a+kb$  に対して  $a-kb$  をともに共役であるという。

一般に  $f(Z)$ ,  $g(Z)$  を  $Z$  の整式とすれば、次式はたがいに共役である。

$$f(a+jb) \quad \text{と} \quad f(a-jb)$$

$$f(a+kb) \quad \text{と} \quad f(a-kb)$$

$$\frac{g(a+jb)}{f(a+jb)} \quad \text{と} \quad \frac{g(a-jb)}{f(a-jb)}$$

$$\frac{g(a+kb)}{f(a+kb)} \quad \text{と} \quad \frac{g(a-kb)}{f(a-kb)}$$

さてここにおいてヘビサイドの公式を考えてみよう。

一般に  $F(p)$  を  $p$  の 1 次整式とすれば、

$$\begin{aligned} \frac{pF(p)}{(p+\alpha)^2 + \omega^2} A &= \frac{1}{2j\omega} \{ \varepsilon^{-(\alpha+j\omega)t} F(-\alpha+j\omega) \\ &\quad - \varepsilon^{-(\alpha-j\omega)t} F(-\alpha-j\omega) \} A \\ &= -\frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\omega^2} \times \frac{j\omega}{2} \{ \varepsilon^{j\omega t} F(-\alpha+j\omega) \\ &\quad - \varepsilon^{-j\omega t} F(-\alpha-j\omega) \} A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{pF(p)}{(p+\alpha)^2 - \beta^2} A &= \frac{1}{2\beta} \{ \varepsilon^{-(\alpha+\beta)t} F(-\alpha+\beta) \\ &\quad - \varepsilon^{-(\alpha-\beta)t} F(-\alpha-\beta) \} A \\ &= \frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\beta^2} \times \frac{\beta}{2} \{ \varepsilon^{\beta t} F(-\alpha+\beta) \\ &\quad - \varepsilon^{-\beta t} F(-\alpha-\beta) \} A \end{aligned}$$

さらに  $F(-\alpha+j\omega) = A+jB$  とすれば

$$F(-\alpha-j\omega) = A-jB$$

また  $F(-\alpha+k\beta) = A+kB$  とすれば

$$F(-\alpha-k\beta) = A-kB$$

$$F(-\alpha+\beta) = A+B$$

$$F(-\alpha-\beta) = A-B$$

となるから

$$\begin{aligned} &\frac{j}{2} \{ \varepsilon^{j\omega t} F(-\alpha+j\omega) - \varepsilon^{-j\omega t} F(-\alpha-j\omega) \} \\ &= \frac{j}{2} \{ A(\varepsilon^{j\omega t} - \varepsilon^{-j\omega t}) + jB(\varepsilon^{j\omega t} + \varepsilon^{-j\omega t}) \} \\ &= -A \sin \omega t - B \cos \omega t = (-B+jA)_{\omega t} = (j(A+jB))_{\omega t} \end{aligned}$$

$$= (jF(-\alpha+j\omega))_{\omega t}$$

$$\text{また } \frac{1}{2} \{ \varepsilon^{\beta t} F(-\alpha+\beta) - \varepsilon^{-\beta t} F(-\alpha-\beta) \}$$

$$= \frac{1}{2} \{ A(\varepsilon^{\beta t} - \varepsilon^{-\beta t}) + B(\varepsilon^{\beta t} + \varepsilon^{-\beta t}) \}$$

$$= A \sinh \beta t + B \cosh \beta t = (B+kA)_{\beta t}$$

$$= (k(A+kB))_{\beta t} = (kF(-\alpha+\beta))_{\beta t}$$

上記の結果を取まとめれば

$$\frac{pF(p)}{(p+\alpha)^2 + \omega^2} A = -\frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\omega^2} (j\omega F(-\alpha+j\omega))_{\omega t} A$$

$$\frac{pF(p)}{(p+\alpha)^2 - \beta^2} A = \frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\beta^2} (k\beta F(-\alpha+k\beta))_{\beta t} A$$

同様に計算して

$$\frac{F(p)}{(p+\alpha)^2 + \omega^2} A = -\frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\omega^2} \left( \frac{j\omega F(-\alpha+j\omega)}{-\alpha+j\omega} \right)_{\omega t} A$$

$$\frac{F(p)}{(p+\alpha)^2 - \beta^2} A = \frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\beta^2} \left( \frac{k\beta F(-\alpha+k\beta)}{-\alpha+k\beta} \right)_{\beta t} A$$

すなわち右辺の ( ) の内部で  $p$  を  $j\omega$  または  $k\beta$  に置き換え、残りの  $F(p)$  あるいは  $F(p)/p$  の中の  $p$  を  $-\alpha+j\omega$  または  $-\alpha+k\beta$  に置き換えたものである。

さらに  $F(p)$  を  $p$  の 3 次整式とすれば

$$\begin{aligned} &\frac{pF(p)}{\{(p+\alpha)^2 + \omega^2\} \{(p+\mu)^2 - \nu^2\}} A \\ &= \left\{ -\frac{\varepsilon^{-\alpha t}}{\omega^2} \left( \frac{j\omega F(-\alpha+j\omega)}{(\mu-\alpha+j\omega)^2 + \omega^2} \right)_{\omega t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\varepsilon^{-\mu t}}{\nu^2} \left( \frac{k\nu F(-\mu+k\nu)}{(\alpha-\mu+k\nu)^2 + \omega^2} \right)_{\nu t} \right\} A \end{aligned}$$

となることも上と同様の計算により求められる。

上式を利用すれば例えば

$$\begin{aligned} \frac{p}{(p^2 + \omega^2)(p^2 - \nu^2)} A &= \left\{ -\frac{1}{\omega^2} \left( \frac{j\omega}{-(\omega^2 + \nu^2)} \right)_{\omega t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\nu^2} \left( \frac{k\nu}{\omega^2 + \nu^2} \right)_{\nu t} \right\} A \\ &= \frac{1}{\omega^2 + \nu^2} \left( -\frac{1}{\omega} \sin \omega t \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\nu} \sinh \nu t \Big) A \\
 \frac{p}{(p^2 + \omega^2)(p^2 + \nu^2)} A &= \left\{ -\frac{1}{\omega^2} \left( \frac{j\omega}{\nu^2 - \omega^2} \right)_{\omega t} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{1}{\nu^2} \left( \frac{j\nu}{\omega^2 - \nu^2} \right)_{\nu t} \right\} A \\
 &= \frac{1}{\nu^2 - \omega^2} \left( \frac{1}{\omega} \sin \omega t \right. \\
 & \quad \left. - \frac{1}{\nu} \sin \nu t \right) A
 \end{aligned}$$

等が簡単に計算できる。

なおヘビサイド演算子を利用する場合には、 $t=0$ の直前および直後の磁束ならびに電荷が連続的に変化することを念頭に入れておかないと誤った結果を得るようになるから注意を要する。電流零値において遮断をおこなう場合の極間電圧計算ではかような特異条件にはあまり出遇わぬようであるが、何かの場合には一応の吟味をしないてはならない。

## II. 電源インピーダンスを無視した場合の充電電流遮断

### Interruption of Charging Current, Neglecting the Impedance at Power Source Side

In this chapter, the problem of interruption of charging current is treated by calculation of superposition theorem under such condition, where the impedance of power source side is so small as to be neglected and only the static capacity of line is taken into account. The earthing device of neutral point are considered as following three cases: direct earthed, nonearthed, and earthed by Petersen reactor.

#### IV. 線路の静電容量

まず前章第2図(a)において、電源電圧  $e$  と充電電流  $i$  (遮断器を通るもの) との関係は

$$e_a = \sqrt{2} E \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\sqrt{2} \cos \omega t$$

$$i_a = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

で、 $b, c$ 相はそれぞれこれに対して  $\frac{2\pi}{3}$  だけ遅れおよび進みとなっているものとする。

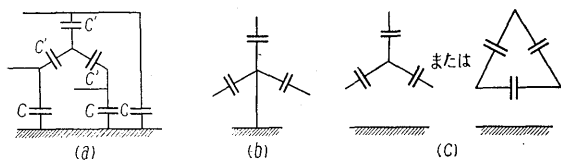
$K_1$  および  $K_0$  に対しては第3図(b)および(c)の場合も考えられる。

$$\text{すなわち第3図(b)の場合は } K_1 = K_0$$

$$(c) \text{の場合は } K_0 = \infty$$

であって、普通工場試験で充電電流を遮断するのは(b)の接続によることが多い。(単相試験もこれに属する)。

ところが架空送電線の場合は  $K_0 = 2K_1$  程度になるから、工場試験の場合と現地試験の場合とでは成績がかなり異なってくる。



第3図 線路の静電容量

Fig. 3. Static capacity of lines

電源および線路の  $r, g$  および  $l$  を無視すれば残りは静電容量だけとなるが、それは第3図(a)のようになる。

$$\text{これを } K_1 = \frac{1}{C+3C'}$$

$$K_0 = \frac{1}{C}$$

で表わし、遮断器に対して電源側のものは  $K_{1s}, K_{0s}$  線路側のものは  $K_{1l}, K_{0l}$  で示すこととする。

#### V. 直接接地系統の電源端における充電電流遮断

電源側インピーダンスを無視すれば

$$K_{1s} = 0 \quad K_{0s} = 0$$

であるから、

$$K_1 = K_{1s} + K_{1l} = K_{1l}$$

$$K_0 = K_{0s} + K_{0l} = K_{0l}$$

$$\text{したがって } Z_1 = \frac{K_1}{p}$$

$$Z_0 = \frac{K_0}{p}$$

となる。

##### V-1 第1相遮断の計算

(a) 第1相遮断の補足回路

$$\frac{Z_1 Z_0}{Z_1 + 2Z_0} = \frac{K_1 K_0}{p(K_1 + 2K_0)}$$

$$\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + 2Z_0} = \frac{K_1 - K_0}{K_1 + 2K_0}$$

$$E = I \frac{K_{11}}{\omega} = I \frac{K_1}{\omega}$$

したがって

$$u_a = \frac{K_1 K_0}{p(K_1 + 2K_0)} \left( -\sqrt{2} I \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} \right) A$$

$$= -\frac{K_1 K_0}{\omega(K_1 + 2K_0)} (1 - \cos \omega t) \sqrt{2} I A$$

$$i_b' = i_c' = \frac{K_1 - K_0}{K_1 + 2K_0} \left( -\sqrt{2} I \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} \right) A$$

$$= -\frac{K_1 - K_0}{K_1 + 2K_0} \sin \omega t \sqrt{2} I A$$

(i)  $K_1 = K_0$  の場合

$$u_a = -\frac{1}{3} \frac{K_1}{\omega} (1 - \cos \omega t) \sqrt{2} I A$$

$$= -\frac{1}{3} (1 - \cos \omega t) \sqrt{2} E A$$

$$i_b' = i_c' = 0$$

(ii)  $K_0 = 2K_1$  の場合

$$u_a = -\frac{2}{5} \frac{K_1}{\omega} (1 - \cos \omega t) \sqrt{2} I A$$

$$= -\frac{2}{5} (1 - \cos \omega t) \sqrt{2} E A$$

$$i_b' = i_c' = \frac{1}{5} \sin \omega t \sqrt{2} I A$$

(b) 第 1 相遮断後の状態

(i)  $K_1 = K_0$  の場合

a 相極間電圧  $3u_a = -\sqrt{2} E (1 - \cos \omega t)$

b 相電流  $i_b = \sqrt{2} I \sin(\omega t - 120^\circ)$

c 相電流  $i_c = \sqrt{2} I \sin(\omega t + 120^\circ)$

線路側の a 相電位  $V_{a1} = -\sqrt{2} E \cos \omega t$

$$= -\sqrt{2} E (1 - \cos \omega t)$$

$$= -\sqrt{2} E$$

$\omega t = 60^\circ$  のとき  $i_c = 0$

(ii)  $K_0 = 2K_1$  の場合

a 相極間電圧  $3u_a = -\sqrt{2} E \times 1.2 (1 - \cos \omega t)$

b 相電流  $i_b = \sqrt{2} I \{ \sin(\omega t - 120^\circ) + 0.2 \sin \omega t \}$

$$= \sqrt{2} I \times 0.916 \sin(\omega t - 109^\circ 5')$$

c 相電流  $i_c = \sqrt{2} I \{ \sin(\omega t + 120^\circ) + 0.2 \sin \omega t \}$

$$= \sqrt{2} I \times 0.916 \sin(\omega t + 109^\circ 5')$$

線路側の a 相電位

$$V_{a1} = -\sqrt{2} E (1.2 - 0.2 \cos \omega t)$$

$\omega t = 70^\circ 55'$  のとき  $i_c = 0$

V-2 第 2 相遮断の計算 (第 2 相遮断時を  $t=0$ )

(a) 第 2 相遮断の補足回路

$$\frac{Z_1(Z_1 - Z_0)}{Z_0 + 2Z_1} = \frac{K_1}{p} \frac{K_1 - K_0}{K_0 + 2K_0}$$

$$\frac{Z_1(Z_1 + 2Z_0)}{Z_0 + 2Z_1} = \frac{K_1}{p} \frac{K_1 + 2K_0}{K_0 + 2K_1}$$

$$\frac{Z_1 - Z_0}{Z_0 + 2Z_1} = \frac{K_1 - K_0}{K_0 + 2K_1}$$

$$i_c' = \sqrt{2} I \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

ただし  $K_1 = K_0$  のとき  $I' = I$

$2K_1 = K_0$  のとき  $I' = 0.916 I$

(i)  $K_0 = K_1$  の場合

$$u_a = 0$$

$$u_c = \sqrt{2} I \times \frac{1}{3} \frac{K_1}{p} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= \sqrt{2} I \frac{K_1}{\omega} \times \frac{1}{3} (1 - \cos \omega t)$$

$$= \sqrt{2} E \times \frac{1}{3} (1 - \cos \omega t)$$

$i_b' = 0$

(ii)  $K_0 = 2K_1$  の場合

$$u_a = \sqrt{2} I' \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} \times \frac{K_1}{p} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= \sqrt{2} I' \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} \times \frac{K_1}{\omega} (1 - \cos \omega t)$$

$$= \sqrt{2} E \times \frac{1}{12} \times 0.916 (1 - \cos \omega t)$$

$$u_c = \sqrt{2} I' \times \frac{1}{3} \times \frac{5}{4} \frac{K_1}{p} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= \sqrt{2} E \times \frac{5}{12} \times 0.916 (1 - \cos \omega t)$$

$$i_b' = -\sqrt{2} I' \times \frac{1}{4} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= -\sqrt{2} I \times \frac{1}{4} \times 0.916 \sin \omega t$$

(b) 第 2 相遮断後の状態

(i)  $K_0 = K_1$  の場合

a 相極間電圧  $3u_a = -\sqrt{2} E \{ 1 - \cos(\omega t + 60^\circ) \}$

c 相極間電圧  $3u_c = \sqrt{2} E (1 - \cos \omega t)$

b 相電流  $i_b = \sqrt{2} I \sin(\omega t - 60^\circ)$

線路側の a 相電位  $V_{a1} = \sqrt{2} E \{ -\cos(\omega t + 60^\circ) - 1 + \cos(\omega t + 60^\circ) \} = -\sqrt{2} E$

線路側の c 相電位

$$V_{ca} = \sqrt{2} E \{-\cos(\omega t + 180^\circ) + 1 - \cos \omega t\}$$

$$= \sqrt{2} E$$

(ii)  $K_0 = 2K_1$  の場合

a 相極間電圧

$$3u_a = \sqrt{2} E \{-1.2 + 1.2 \cos(\omega t + 70^\circ 55') + 0.229(1 - \cos \omega t)\}$$

$$= -\sqrt{2} E \{0.971 - 1.18 \cos(\omega t + 81^\circ 55')\}$$

c 相極間電圧

$$3u_c = \sqrt{2} E \times 1.14(1 - \cos \omega t)$$

b 相電流

$$i_b = \sqrt{2} I \{0.916 \sin(\omega t + 38^\circ 10') - 0.229 \sin \omega t\}$$

$$= \sqrt{2} I \times 0.752 \sin(\omega t - 49^\circ 5')$$

線路側の a 相電位

$$V_{aa} = \sqrt{2} E \{-\cos(\omega t + 70^\circ 55') - 1.2 + 1.2 \cos(\omega t + 70^\circ 55') + 0.229(1 - \cos \omega t)\}$$

$$= -\sqrt{2} E \{0.971 + 0.244 \cos(\omega t - 50^\circ 40')\}$$

線路側の c 相電位

$$V_{ca} = \sqrt{2} E \{-\cos(\omega t + 190^\circ 55') + 1.14(1 - \cos \omega t)\}$$

$$= \sqrt{2} E \{1.14 - 0.1501 \cos \omega t + 0.1894 \sin \omega t\}$$

$$\omega t = 49^\circ 5' \text{ において } i_b = 0$$

### V-3 第3相遮断の計算 (第3相遮断時を $t=0$ )

(a) 第3相遮断の補足回路

$$Z_0 - Z_1 = \frac{K_0 - K_1}{p}$$

$$2Z_1 + Z_0 = \frac{2K_1 + K_0}{p}$$

$$i_b' = \sqrt{2} I'' \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

ただし  $K_1 = K_0$  のとき  $I'' = -I$

$2K_1 = K_0$  のとき  $I'' = -0.752I$

(i)  $K_0 = K_1$  の場合

$$u_a = u_c = 0$$

$$u_b = -\sqrt{2} I'' \times \frac{1}{9} \times \frac{3K_1}{p} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= -\sqrt{2} I \frac{K_1}{\omega} \times \frac{1}{3} (1 - \cos \omega t)$$

$$= -\sqrt{2} E \times \frac{1}{3} (1 - \cos \omega t)$$

(ii)  $K_0 = 2K_1$  の場合

$$u_a = u_c$$

$$= \sqrt{2} I'' \times \frac{1}{9} \times \frac{K_1}{p} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= \sqrt{2} I'' \times \frac{1}{9} \frac{K_1}{\omega} (1 - \cos \omega t)$$

$$= -\sqrt{2} E \times 0.752 \times \frac{1}{9} (1 - \cos \omega t)$$

$$u_b = \sqrt{2} I'' \times \frac{1}{9} \times \frac{4K_1}{p} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} A$$

$$= -\sqrt{2} I \times 0.752 \times \frac{4}{9} \times \frac{K_1}{\omega} (1 - \cos \omega t)$$

$$= -\sqrt{2} E \times \frac{1}{3} (1 - \cos \omega t)$$

(b) 第3相遮断後の状態

(i)  $K_0 = K_1$  の場合

a 相極間電圧

$$3u_a = -\sqrt{2} E \{1 - \cos(\omega t + 120^\circ)\}$$

b 相極間電圧

$$3u_b = -\sqrt{2} E (1 - \cos \omega t)$$

c 相極間電圧

$$3u_c = \sqrt{2} E \{1 - \cos(\omega t + 60^\circ)\}$$

線路側の a 相電位

$$V_{aa} = -\sqrt{2} E \{\cos(\omega t + 120^\circ) + 1 - \cos(\omega t + 120^\circ)\}$$

$$= -\sqrt{2} E$$

線路側の b 相電位

$$V_{bb} = -\sqrt{2} E (\cos \omega t + 1 - \cos \omega t)$$

$$= -\sqrt{2} E$$

線路側の c 相電位

$$V_{cc} = -\sqrt{2} E \{\cos(\omega t + 240^\circ) - 1 + \cos(\omega t + 60^\circ)\}$$

$$= \sqrt{2} E$$

(ii)  $K_0 = 2K_1$  の場合

a 相極間電圧

$$3u_a = \sqrt{2} E \{-0.971 + 1.18 \cos(\omega t + 131^\circ) - 0.25(1 - \cos \omega t)\}$$

$$= -\sqrt{2} E \{1.221 - \cos(\omega t + 120^\circ)\}$$

b 相極間電圧

$$3u_b = -\sqrt{2} E (1 - \cos \omega t)$$

c 相極間電圧

$$3u_c = \sqrt{2} E \{1.14 - 1.14 \cos(\omega t + 49^\circ 5') - 0.25(1 - \cos \omega t)\}$$

$$= \sqrt{2} E \{0.89 + \cos(\omega t - 120^\circ)\}$$

線路側の a 相電位

$$V_{aa} = \sqrt{2} E \{-\cos(\omega t + 120^\circ) - 1.221 + \cos(\omega t + 120^\circ)\}$$

$$= -\sqrt{2} E \times 1.221$$

線路側の b 相電位

$$V_{bb} = \sqrt{2} E \{-\cos \omega t - (1 - \cos \omega t)\}$$



$$= -\sqrt{2} E$$

線路側の c 相電位

$$V_{ca} = \sqrt{2} E \{-\cos(\omega t + 240^\circ) + 0.89 + \cos(\omega t - 120^\circ)\}$$

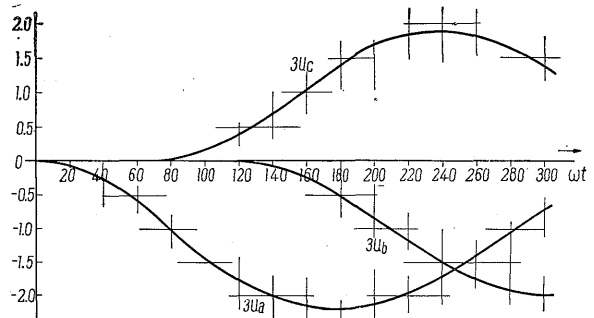
$$= \sqrt{2} E \times 0.89$$

V-4 直接接地系の電源端における充電電流遮断に対する考察

この場合は電源の中性点が常に零電位に固定されているのであって、常識的には  $K_0 = K_1$  のときの計算が判りやすい。すなわち第 1 相遮断後  $\omega t = 60^\circ$  ずつ遅れて第 2 相および第 3 相が順次に遮断され、各相の線路側電位の大きさは  $\sqrt{2} E$  となる。ところが  $K_0 \neq K_1$  のときは様子が大分変わってくる。

第 1 相遮断時の線路側電位は  $K_0 = K_1$  のときと同じに  $-\sqrt{2} E$  であるが、その後は他の相から充電されるために一定の値には保たれずに、電位が時間とともに変化する。それと同時に第 2 相は  $\sqrt{2} E$  にならないで、 $\sqrt{2} E \times 0.99$  が極大値となってそこで消弧されるようになる。第 2 相遮断後も各相線路電位は変化して、結局第 3 相遮断後は各相ともにそれぞれ一定の値に保たれるにいたる。線路電位と電源電位との差が極間電圧であるがこれまでの計算により  $K_0 = 2K_1$  に対

する極間電圧を示すと第 4 図の通りである。



第 4 図 直接接地系統における充電電流遮断各相極間電圧の変化

Fig. 4. Phase voltage variation between each poles in case of charging current interruption on direct earthing lines

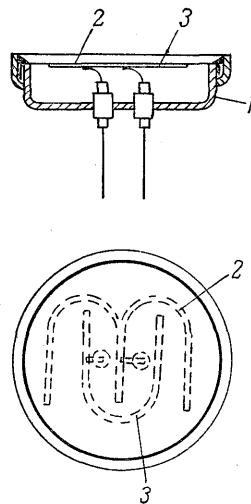
遮断器の充電電流試験を工場でおこなう場合にどんな電圧を印加したらよいかということは、非接地系その他の場合ももちろん考えねばならないが、直接接地系用だけを考えると、極間電圧を  $\sqrt{2} E(1 - \cos \omega t)$  にしたのでは不充分であり、 $\sqrt{2} E \times 1.2(1 - \cos \omega t)$  の方が幾分合理的であるといえる。(続く)

湿 度 計 (シーメンス)

(昭和 29 年 許 特 公 告 第 5496 号)

この発明は新しい湿度計に関するものである。この発明は湿度に応じて電気抵抗を変える物質を被測定個所に置きその電気抵抗を測ることにより湿度を求めることにある。この物質としては湿度に敏感な塩化リチウム等をまぜたセロファンが良くしかもこれは筐 1 の蓋として作られる。この蓋の内面に電極 2, 3 が取付けられる。この電極はもちろん電源および計器に接続されるが、その場合計器の振れは湿度に関連することとなる。湿度に応じて抵抗を変える物質としては同じく塩化リチウムを混入した陶器を使うこともできる。

(技術部 池 上)





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。