

# 三相不平衡電流平衡化のベクトル図解法

實成 義孝・池田 稔  
(受理 昭和61年 5月31日)

## VECTOR GRAPHICS FOR BALANCING THREE-PHASE UNBALANCED CURRENTS

Yoshitaka MINARI and Minoru IKEDA

There are several methods for connecting additional elements in order to balance the line currents in three-phase unbalanced circuits. Two additional elements are connected in parallel with arbitrary lines at the load. This paper describes how to determine them by means of graphics.

The unbalanced loads are usually classified into the following three kinds: delta connection, V-connection, and single-phase connection. All the connections of the additional elements are illustrated. The balancing conditions and current vectors are given here in convenient form for drawing under the restriction of the symmetrical line voltages. The three conditioned equations for balance are obtained from the manner of connection. The additional elements are a capacitor, a reactor and a resistor. They are represented in admittance.

The general compositions and determination of admittances are shown for three cases. Concrete examples of several compositions are drawn. The graphical solutions of the admittance and current vectors are studied. Several compositions for balance are generally possible. It is necessary to choose the most suitable composition among them in practice.

A numerical example in the experiment is shown with the vector graphics. This solution is useful in studying the balance of line currents.

### 1. ま え が き

三相不平衡負荷に平衡用付加素子としてコンデンサあるいはリアクトルを接続した線電流平衡化方式に関する図式解法について、単相負荷のとき二個の素子を接続した解法<sup>1)</sup>、三相負荷のとき二個又は三個の素子を接続した解法が報告されている<sup>2)</sup>。さらに三相負荷に二個の素子を接続する解法において、平衡条件式と電流ベクトルを作図に便利な形で表わし、具体的な構成例を示し、平衡不平衡電流のベクトル図解について一部報告してある<sup>3)</sup>。本文は不平衡負荷が△形、V形及び単相形の場合に、二個の付加素子を接続するときの並列型平衡装置の全図式解法である。各場合について素子の全接続法を示し、平衡条件の全ベクトル式を求め、素子の各種構成法とその決定法を図解した。そ

してそれらの構成に基づいた電流ベクトル図解例を示した。最後にV型負荷のときのベクトル図解法の数値例をその実測結果を示した。

### 2. 平衡条件と電流ベクトル

2-1 線間に三個の負荷がある場合(△形接続)  
三個の異なるアドミタンス  $\dot{Y}_{ab}$ ,  $\dot{Y}_{bc}$ ,  $\dot{Y}_{ca}$  が△形に接続された図1(a)の不平衡回路において、アドミタンスが  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  の素子を図のように接続する。電源は対称三相電圧で相回転は  $\dot{V}_{ab} = V$ ,  $\dot{V}_{bc} = a^2V$ ,  $\dot{V}_{ca} = aV$  の順とする。電圧電流の正方向を図のように定める。線電流  $\dot{I}_a$ ,  $\dot{I}_b$ ,  $\dot{I}_c$  は次のように表わされる。これは作図に便利な形である。ここに  $a = \epsilon^{j120^\circ}$ 。

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \{\dot{Y}_{ab} - a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)\} V \quad \dots\dots(1) \\ \dot{I}_b &= |a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B) - \dot{Y}_{ab}| V \end{aligned}$$

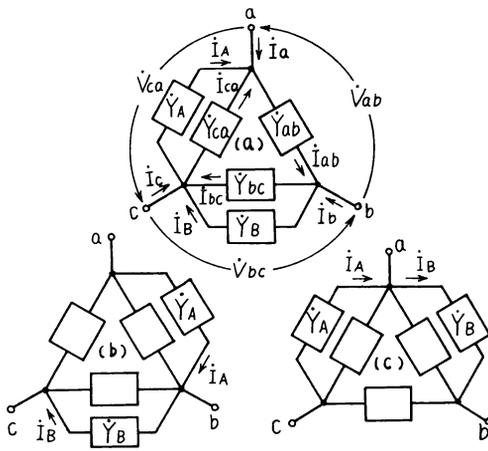


図1 △形接続と付加素子

$$\dot{I}_c = |a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A) - a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B)| V = -\dot{I}_a - \dot{I}_b$$

これより逆相分  $\dot{I}_n$  を求めると次のようになる。

$$\dot{I}_n = |(1-a^2)\dot{Y}_{ab} + (a-1)\dot{Y}_{bc} + (a^2-a)\dot{Y}_{ca} + (a^2-a)\dot{Y}_A + (a-1)\dot{Y}_B| V/3 \quad \dots\dots(2)$$

これより  $\dot{I}_n = 0$  として平衡条件を求めると

$$\dot{Y}_{ab} - (\dot{Y}_{bc} \epsilon^{-j60^\circ} + \dot{Y}_{ca} \epsilon^{j60^\circ}) = \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ} \quad \dots\dots(3)$$

$\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  を接続しない場合の不平衡線電流  $\dot{I}'_a, \dot{I}'_b, \dot{I}'_c$  は (1) 式で  $\dot{Y}_A = 0, \dot{Y}_B = 0$  として求められる。

つぎに  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  を図1 (b), (c) のように接続した場合について同様に平衡条件を求めると、それぞれ

$$\dot{Y}_{ab} - (\dot{Y}_{bc} \epsilon^{-j60^\circ} + \dot{Y}_{ca} \epsilon^{j60^\circ}) = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ} \quad \dots\dots(4)$$

$$\dot{Y}_{ab} - (\dot{Y}_{bc} \epsilon^{-j60^\circ} + \dot{Y}_{ca} \epsilon^{j60^\circ}) = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} \quad \dots\dots(5)$$

となる。(3) 式とくらべると右辺が異なっている。以上のように  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  の接続法により三つの平衡条件式がある。線電流  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  は (b), (c) により、それぞれ次のように表わされる。

$$\dot{I}_a = |(\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_A) - a\dot{Y}_{ca}| V \quad \dots\dots(6)$$

$$\dot{I}_b = |a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B) - (\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_A)| V = -\dot{I}_c - \dot{I}_a$$

$$\dot{I}_c = |a\dot{Y}_{ca} - a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B)| V$$

$$\dot{I}_a = |(\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_B) - a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)| V = -\dot{I}_b - \dot{I}_c \quad \dots\dots(7)$$

$$\dot{I}_b = |a^{-1}\dot{Y}_{bc} - (\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_B)| V$$

$$\dot{I}_c = |a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A) - a^{-1}\dot{Y}_{bc}| V$$

なお (a) 図で電圧の基準を bc 間にとれば (b) 図の接続と同じ形となり、ca 間にとれば (c) 図の接続と同じ形となる。この場合の平衡条件式は (4), (5) 式でアドミタンスの順序を入れかえて求められる。

2-2 線間に二個の負荷がある場合 (V形接続)

図1において  $\dot{Y}_{ab}, \dot{Y}_{bc}, \dot{Y}_{ca}$  のうちいずれか二個だけ接続されている場合を考えると V 形負荷に素子  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  を接続した回路が得られる。これらを図2に示す。図の

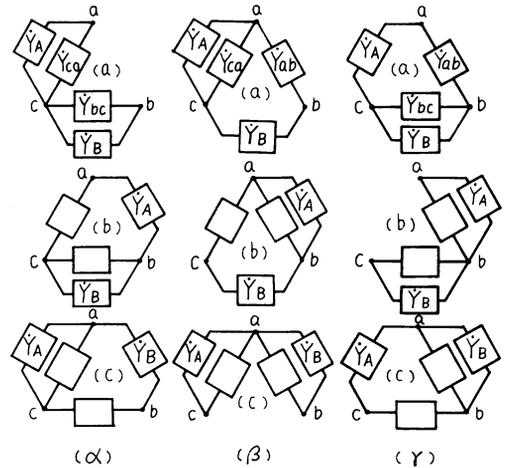


図2 V形接続と付加素子

表1 V形接続の平衡条件式

	(α) $\dot{Y}_{ab} = 0$	(β) $\dot{Y}_{bc} = 0$	(γ) $\dot{Y}_{ca} = 0$
(a)	$\dot{Y}_{bc} - \dot{Y}_{ca} \epsilon^{-j60^\circ} = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{-j60^\circ} \quad (11)$	$\dot{Y}_{ca} - \dot{Y}_{ab} \epsilon^{-j60^\circ} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ} \quad (14)$	$\dot{Y}_{ab} - \dot{Y}_{bc} \epsilon^{-j60^\circ} = \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ} \quad (17)$
(b)	$\dot{Y}_{bc} - \dot{Y}_{ca} \epsilon^{-j60^\circ} = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} \quad (12)$	$\dot{Y}_{ca} - \dot{Y}_{ab} \epsilon^{-j60^\circ} = \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_A \epsilon^{-j60^\circ} \quad (15)$	$\dot{Y}_{ab} - \dot{Y}_{bc} \epsilon^{-j60^\circ} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ} \quad (18)$
(c)	$\dot{Y}_{bc} - \dot{Y}_{ca} \epsilon^{-j60^\circ} = \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_A \epsilon^{-j60^\circ} \quad (13)$	$\dot{Y}_{ca} - \dot{Y}_{ab} \epsilon^{-j60^\circ} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ} \quad (16)$	$\dot{Y}_{ab} - \dot{Y}_{bc} \epsilon^{-j60^\circ} = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} \quad (19)$

表2 V形接続の電流ベクトル

	(α) $\dot{Y}_{ab} = 0$	(β) $\dot{Y}_{bc} = 0$	(γ) $\dot{Y}_{ca} = 0$
(a)	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= -a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B)V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots(20)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \{\dot{Y}_{ab} - a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)\}V \\ \dot{I}_b &= (a^{-1}\dot{Y}_B - \dot{Y}_{ab})V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} (23)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_{ab} - a\dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= \{a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B) - \dot{Y}_{ab}\}V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} (26)$
(b)	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_A - a\dot{Y}_{ca})V \\ \dot{I}_b &= \{a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B) - \dot{Y}_A\}V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} (21)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_A - a\dot{Y}_{ca})V \\ \dot{I}_b &= -\dot{I}_c - \dot{I}_a \\ \dot{I}_c &= (a\dot{Y}_{ca} - a^{-1}\dot{Y}_B)V \end{aligned} \right\} \dots(24)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= -\dot{I}_c - \dot{I}_a \\ \dot{I}_c &= -a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B)V \end{aligned} \right\} \dots(27)$
(c)	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \{\dot{Y}_B - a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)\}V \\ \dot{I}_b &= (a^{-1}\dot{Y}_{bc} - \dot{Y}_B)V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} (22)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= -\dot{I}_b - \dot{I}_c \\ \dot{I}_b &= -(\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_B)V \\ \dot{I}_c &= a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)V \end{aligned} \right\} \dots(25)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_B - a\dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= -\dot{I}_c - \dot{I}_a \\ \dot{I}_c &= (a\dot{Y}_A - a^{-1}\dot{Y}_{bc})V \end{aligned} \right\} \dots(28)$

(α) は図1で  $\dot{Y}_{ab} = 0$  .....(8)

(β) は  $\dot{Y}_{bc} = 0$  .....(9)

(γ) は  $\dot{Y}_{ca} = 0$  .....(10)

としたものである。したがって (3) ~ (5) においてそれぞれの回路に応じて (8) ~ (10) 式を適用すると、この場合の平衡条件式が得られる。式の左辺を同じ形にして整理した式を図2に対応して表1に示す。図2で (a) の三回路は、他の回路にくらべて相回転に対する  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  の位置が逆になっている。ゆえに (11), (14), (17) 式の右辺でそれぞれ  $\dot{Y}_A$  と  $\dot{Y}_B$  を入れかえると、(11) 式は (16), (18) 式と同じであることがわかる。同様に (12), (14), (19) 式および (13), (15), (17) 式がそれぞれ同じである。したがって平衡条件式は (α), (β), (γ) のうちどれか一つを考えればよいが、相回転と回路の形によって式の形が異なってくるので注意する必要がある。線電流  $\dot{I}_a$ ,  $\dot{I}_b$ ,  $\dot{I}_c$  についても (1), (6), (7) 式より同様に求められる。それらを図2に対応して表2に示す。不平衡線電流  $\dot{I}'_a$ ,  $\dot{I}'_b$ ,  $\dot{I}'_c$  は (20) ~ (28) 式において  $\dot{Y}_A = 0$ ,  $\dot{Y}_B = 0$  としてそれぞれ求められる。

2-3 線間に一個の負荷がある場合(単相接続)

図1において  $\dot{Y}_{ab}$ ,  $\dot{Y}_{bc}$ ,  $\dot{Y}_{ca}$  のうち一個だけ接続されている単相負荷に素子  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  を接続した回路をすべてあげると図3のようになる。図の (α) は図1において、

$$\dot{Y}_{bc} = 0, \dot{Y}_{ca} = 0 \dots\dots(29)$$

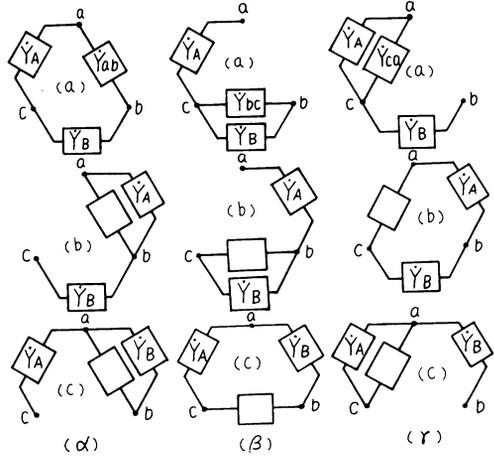


図3 単相接続と付加素子

(β) は  $\dot{Y}_{ab} = 0, \dot{Y}_{ca} = 0$  .....(30)

(γ) は  $\dot{Y}_{ab} = 0, \dot{Y}_{bc} = 0$  .....(31)としたものである。これらの平衡条件式は (3) ~ (5) 式において、それぞれの回路に応じて (29) ~ (31) 式を適用すれば表3のように得られる。いずれも式の左辺が同じ形になるように整理したものを図3に対応して示したものである。図3で (a) の三回路は他の回路にくらべて相回転に対する  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  の位置が逆になっているので、(32), (35), (38) 式の右辺で  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  を入れかえると、表3の (α), (β), (γ) とも右辺は同じ形が得られる。したがって平衡条件式は (α), (β), (γ) のうちどれか一つを考えればよいが、相回転と回路の形に注意しなければならないことは2-

表3 単相接続の平衡条件式

	( $\alpha$ ) $\dot{Y}_{bc} = 0, \dot{Y}_{ca} = 0$	( $\beta$ ) $\dot{Y}_{ab} = 0, \dot{Y}_{ca} = 0$	( $\gamma$ ) $\dot{Y}_{ab} = 0, \dot{Y}_{bc} = 0$
(a)	$\dot{Y}_{ab} = \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ}$ .....(33)	$\dot{Y}_{bc} = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{-j60^\circ}$ .....(35)	$\dot{Y}_{ca} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ}$ .....(38)
(b)	$\dot{Y}_{ab} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ}$ .....(33)	$\dot{Y}_{bc} = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ}$ .....(36)	$\dot{Y}_{ca} = \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_A \epsilon^{-j60^\circ}$ .....(39)
(c)	$\dot{Y}_{ab} = -\dot{Y}_B + \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ}$ .....(34)	$\dot{Y}_{bc} = \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_A \epsilon^{-j60^\circ}$ .....(37)	$\dot{Y}_{ca} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ}$ .....(40)

表4 単相接続の電流ベクトル

	( $\alpha$ ) $\dot{Y}_{bc} = 0, \dot{Y}_{ca} = 0$	( $\beta$ ) $\dot{Y}_{ab} = 0, \dot{Y}_{ca} = 0$	( $\gamma$ ) $\dot{Y}_{ab} = 0, \dot{Y}_{bc} = 0$
(a)	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_{ab} - a\dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= (a^{-1}\dot{Y}_B - \dot{Y}_{ab})V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots(41)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= -a\dot{Y}_A V \\ \dot{I}_b &= a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B)V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots(44)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= -a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= a^{-1}\dot{Y}_B V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots(47)$
(b)	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= -\dot{I}_c - \dot{I}_a \\ \dot{I}_c &= -a^{-1}\dot{Y}_B V \end{aligned} \right\} \dots(42)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{Y}_A V \\ \dot{I}_b &= -\dot{I}_c - \dot{I}_a \\ \dot{I}_c &= -a^{-1}(\dot{Y}_{bc} + \dot{Y}_B)V \end{aligned} \right\} \dots(45)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_A - a\dot{Y}_{ca})V \\ \dot{I}_b &= (a^{-1}\dot{Y}_B - \dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots(48)$
(c)	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= -\dot{I}_b - \dot{I}_c \\ \dot{I}_b &= -(\dot{Y}_{ab} + \dot{Y}_B)V \\ \dot{I}_c &= a\dot{Y}_A V \end{aligned} \right\} \dots(43)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{Y}_B - a\dot{Y}_A)V \\ \dot{I}_b &= (a^{-1}\dot{Y}_{bc} - \dot{Y}_B)V \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots(46)$	$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= -\dot{I}_b - \dot{I}_c \\ \dot{I}_b &= -\dot{Y}_B V \\ \dot{I}_c &= a(\dot{Y}_{ca} + \dot{Y}_A)V \end{aligned} \right\} \dots(49)$

2の場合と同様である。線電流  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  は (1), (6), (7) 式により同様に求められる。それらを図3に対応して表4に示す。不平衡線電流  $\dot{I}'_a, \dot{I}'_b, \dot{I}'_c$  は (41) ~ (49) 式において  $\dot{Y}_A = 0, \dot{Y}_B = 0$  としそれぞれ求められる。

### 3. 構成法

平衡条件式の左辺は負荷によってきまる合成ベクトルであり、その右辺は  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  の接続のしかたにより形が異なる。いま合成ベクトルを  $\overline{OP}$  とすれば、一般に次の三種類に分類される。なお  $\dot{Y}_A$  と  $\dot{Y}_B$  は入れかわるときがある。

I:  $\overline{OP} = \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ} + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ}$  .....(50)

II:  $\overline{OP} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ}$  .....(51)

III:  $\overline{OP} = -\dot{Y}_A + \dot{Y}_B \epsilon^{j60^\circ}$  .....(52)

付加素子がコンデンサのときは  $\dot{Y}_A = jB_C$ , あるいは  $\dot{Y}_B = jB_C$ , リアクトルのときは  $\dot{Y}_A = -jB_L$  あるいは  $\dot{Y}_B = -jB_L$  とする。ここに容量サセプタンス  $B_C = 2\pi fC$ , 誘導サセプタンス  $B_L = 1/2\pi fL$ , ( $C$ : キャパシタンス,  $L$ : インダクタンス,  $f$ : 電源周波数) である。また抵抗のときは  $\dot{Y}_A = G$  あるいは  $\dot{Y}_B = G$  とする。ここにコンダクタンス  $G = 1/R$ , ( $R$ : 抵抗) である。つぎに  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  の構成法を示す。

#### 3-1 第I形の場合(図4)

##### I-1 コンデンサとリアクトルによる構成

この場合  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  は  $j$  軸上にとられるので、 $\dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ}$  は  $MM'$  上に、 $\dot{Y}_B \epsilon^{-j60^\circ}$  は  $NN'$  上にある。いま図のような  $\overline{OP}_1$  があるとき、これを  $MM'$  成分  $\overline{OM}_1$ ,  $NN'$  成分  $\overline{ON}_1$  に分解すると  $\overline{OM}_1 = \dot{Y}_A \epsilon^{j60^\circ}$ ,  $\overline{ON}_1 =$

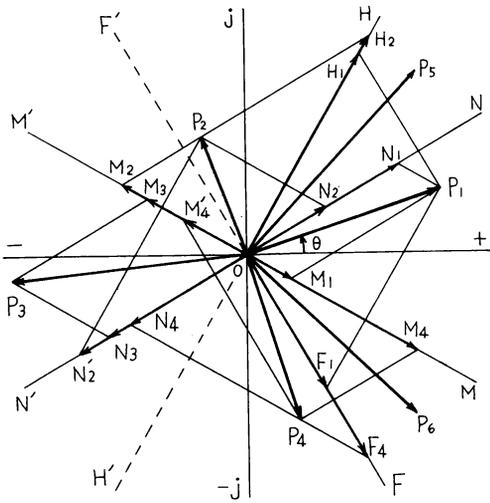


図4 第I形の構成図

$\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$ である。線分  $\overline{OM}_1$  の長さは  $\dot{Y}_A$  の大きさ  $|\dot{Y}_A|$  を表わし、線分  $\overline{ON}_1$  の長さは  $\dot{Y}_B$  の大きさ  $|\dot{Y}_B|$  を表わす。すなわち  $\overline{OM}_1 = |\dot{Y}_A| = |-jB_{L1}| = B_{L1}$ 、 $\overline{ON}_1 = |\dot{Y}_B| = |jB_{C1}| = B_{C1}$  である。ここで図を適当なアドミタンススケールにすれば、線分の長さから  $B_{L1}$ 、 $B_{C1}$  の値をきめることができる。さらに  $\overline{OP}$  は原点のまわりに各種の値をとるので、 $\overline{OP}_2$ 、 $\overline{OP}_3$ 、 $\overline{OP}_4$  をそれぞれ  $MM'$  成分、 $NN'$  成分に分解したものを図示する。これより一般に  $MM'$  成分が  $\overline{OM}_1$ 、 $\overline{OM}_4$  のように  $OM$  上にあるときは  $\dot{Y}_A = -jB_L$ 、 $\overline{OM}_2$ 、 $\overline{OM}_3$  のように  $OM'$  上にあるときは  $\dot{Y}_A = jB_C$  である。また  $NN'$  成分が  $\overline{ON}_1$ 、 $\overline{ON}_2$  のように  $ON$  上にあるときは  $\dot{Y}_B = jB_C$ 、 $\overline{ON}_3$ 、 $\overline{ON}_4$  のように  $ON'$  上にあるときは  $\dot{Y}_B = -jB_L$  である。 $\overline{OP}$  の角を  $\theta$  とすれば  $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = -150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$ 、 $\theta = -30^\circ$ 、 $\theta = 150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。

I-2 抵抗による構成

この場合  $\dot{Y}_A$ 、 $\dot{Y}_B$  は実軸 (正) 上にあるので  $\dot{Y}_A \in^{j60^\circ}$  は  $OH$  上に、 $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $OF$  上にある。したがって図のように  $\overline{OP}_1$  の  $OH$  成分  $\overline{OH}_1$ 、 $OF$  成分の  $\overline{OF}_1$  を考えると  $\overline{OH}_1 = |\dot{Y}_A| = G_1$ 、 $\overline{OF}_1 = |\dot{Y}_B| = G_2$  である。この場合の構成範囲は  $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  である。この範囲外にある  $\overline{OP}_4$ 、 $\overline{OP}_2$ 、 $\overline{OP}_3$  のときは、破線  $OH'$  成分、 $OF'$  成分を生じ、 $G_1 < 0$  または  $G_2 < 0$ 、あるいは  $G_1$ 、 $G_2 < 0$  となり一般には構成困難である。ゆえにこの場合を不能とする。なお  $\theta = 60^\circ$  のとき

$\dot{Y}_B = 0$ 、 $\theta = -60^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$  である。

I-3 抵抗とコンデンサあるいはリアクトルによる構成

まず  $\dot{Y}_A$  を抵抗にとるとき  $\dot{Y}_A \in^{j60^\circ}$  は  $OH$  上、 $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $NN'$  上にある。図のような  $\overline{OP}_2$  において  $\overline{OH}_2 = |\dot{Y}_A| = G$ 、 $\overline{ON}_2 = |\dot{Y}_B| = |-jB_L| = B_L$  である。 $\overline{OP}_5$  のときは  $NN'$  成分が  $ON$  上にあり、 $\dot{Y}_B = jB_C$  である。構成範囲は  $30^\circ \leq \theta \leq -150^\circ$  である。この範囲外にある  $\overline{OP}_1$ 、 $\overline{OP}_4$  のときは破線  $OH'$  成分を生じ  $G < 0$  で不能である。 $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = -150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$ 、 $\theta = 60^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。

つぎに  $\dot{Y}_B$  を抵抗にとるとき  $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $OF$  上、 $\dot{Y}_A \in^{j60^\circ}$  は  $MM'$  上にある。図の  $\overline{OP}_4$  において  $\overline{OF}_4 = |\dot{Y}_B| = G$ 、 $\overline{OM}_4 = |\dot{Y}_A| = |jB_C| = B_C$  である。

$\overline{OP}_6$  のときは  $MM'$  成分が  $OM$  上にあり、 $\dot{Y}_A = -jB_L$  である。構成範囲は  $150^\circ \leq \theta \leq -30^\circ$  である。この範囲外にある  $\overline{OP}_1$ 、 $\overline{OP}_2$  などのときは、破線  $OF'$  成分を生じ  $G < 0$  で不能である。 $\theta = -30^\circ$ 、 $\theta = 150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$ 、また  $\theta = -60^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$  である。

3-2 第II形の場合 (図5)

II-1 コンデンサとリアクトルによる構成

この場合  $-\dot{Y}_A$  は  $j$  軸上に、 $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $NN'$  上にある。図のような  $\overline{OP}_1$  において、 $\overline{ON}_1 = |\dot{Y}_B| = |jB_C| = B_C$  である。また  $\overline{OJ}_1 = -\dot{Y}_A$  であるから、 $\dot{Y}_A$

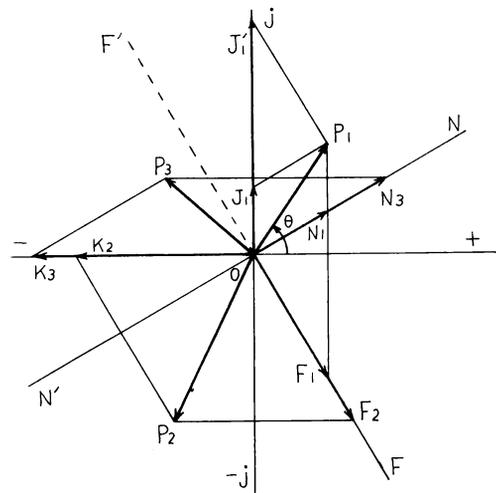


図5 第II形の構成図

$= -j$  側にあり、 $\overline{OJ}_1 = |\dot{Y}_A| = |-jB_L| = B_L$  である。一般に  $NN'$  成分が  $ON$  上にあるとき  $\dot{Y}_B = jB_c$ 、 $ON'$  上にあるとき  $\dot{Y}_B = -jB_L$  である。 $j$  軸成分が  $+j$  側にあるとき  $\dot{Y}_A = -jB_L$ 、 $-j$  側にあるとき  $\dot{Y}_A = jB_c$  である。 $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = -150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$ 、また  $\theta = \pm 90^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。

II-2 抵抗による構成

この場合  $-\dot{Y}_A$  は実軸 (負) 上に、 $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $OF$  上にある。図のような  $\overline{OP}_2$  において、 $\overline{OK}_2 = -\dot{Y}_A$  であるから  $\dot{Y}_A$  は実軸 (正) 上にあり、 $\overline{OK}_2 = |\dot{Y}_A| = G_1$  である。また  $\overline{OF}_2 = |\dot{Y}_B| = G_2$  である。構成範囲は  $-180^\circ \leq \theta \leq -60^\circ$  である。この範囲外では  $OF'$  成分、実軸 (正) 上の成分を生じ  $G_2 < 0$ 、 $G_1 < 0$  となり不能である。また  $\theta = -60^\circ$  のときは  $\dot{Y}_A = 0$  となり、 $\theta = -180^\circ$  のときは  $\dot{Y}_B = 0$  である。

II-3 抵抗とコンデンサあるいはリアクトルによる構成

まず  $\dot{Y}_A$  を抵抗にとるとき  $-\dot{Y}_A$  は実軸 (負) 上に、 $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $NN'$  上にある。図のような  $\overline{OP}_3$  において、 $\overline{ON}_3 = |\dot{Y}_B| = |jB_c| = B_c$ 、 $\overline{OK}_3 = |\dot{Y}_A| = G$  である。 $NN'$  成分が  $ON'$  上にあるとき  $\dot{Y}_B = -jB_L$  である。構成範囲は  $30^\circ \leq \theta \leq -150^\circ$  である。この範囲外では  $G < 0$  となり不能である。 $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = -150^\circ$  のときは  $\dot{Y}_A = 0$  となり、 $\theta = 180^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。つぎに  $\dot{Y}_B$  を抵抗にとるとき  $-\dot{Y}_A$  は  $j$  軸上に、 $\dot{Y}_B \in^{-j60^\circ}$  は  $OF$  上にある。図のような  $\overline{OP}_1$  において  $\overline{OJ}_1 = |\dot{Y}_A| = |-jB_L| = B_L$ 、 $\overline{OF}_1 = |\dot{Y}_B| = G$  である。 $j$  軸成分が  $-j$  側にあるとき  $\dot{Y}_A = jB_c$  である。構成範囲は  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  である。この範囲外では  $G < 0$  となり不能である。 $\theta = \pm 90^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$ 、また  $\theta = -60^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$  である。

3-3 第三形の場合 (図6)

III-1 コンデンサとリアクトルによる構成

この場合  $-\dot{Y}_A$  は  $j$  軸上に、 $\dot{Y}_B \in^{j60^\circ}$  は  $MM'$  上にある。図のような  $\overline{OP}_1$  において  $\overline{OM}_1 = |\dot{Y}_B| = |-jB_{L1}| = B_{L1}$ 、 $\overline{OJ}_1 = |\dot{Y}_A| = |-jB_{L2}| = B_{L2}$  である。一般に  $MM'$  成分が  $OM$  上にあるとき  $\dot{Y}_B = -jB_{L1}$ 、 $OM'$  上にあるとき  $\dot{Y}_B = jB_c$  である。 $j$  軸成分が  $+j$  側にあるとき  $\dot{Y}_A = -jB_L$ 、 $-j$  側にあると

き  $\dot{Y}_A = jB_c$  である。 $\theta = -30^\circ$ 、 $\theta = 150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$ 、また  $\theta = \pm 90^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。

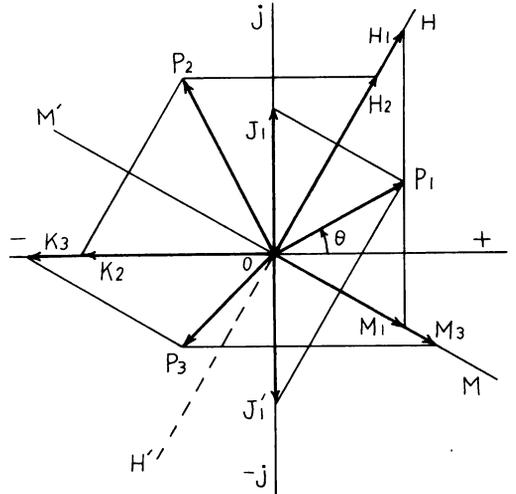


図6 第三形の構成図

III-2 抵抗による構成

この場合  $-\dot{Y}_A$  は実軸 (負) 上に、 $\dot{Y}_B \in^{j60^\circ}$  は  $OH$  上にある。図のような  $\overline{OP}_2$  において  $\overline{OK}_2 = |\dot{Y}_A| = G_1$ 、 $\overline{OH}_2 = |\dot{Y}_B| = G_2$  である。構成範囲は  $60^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  である。この範囲外では  $OH'$  成分、実軸 (正) 上の成分を生じ  $G_2 < 0$ 、 $G_1 < 0$  となり不能である。 $\theta = 60^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$ 、 $\theta = 180^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。

III-3 抵抗とコンデンサあるいはリアクトルによる構成

まず  $\dot{Y}_A$  を抵抗にとるとき  $-\dot{Y}_A$  は実軸 (負) 上に、 $\dot{Y}_B \in^{j60^\circ}$  は  $MM'$  上にある。図のような  $\overline{OP}_3$  において、 $\overline{OM}_3 = |\dot{Y}_B| = |-jB_L| = B_L$ 、 $\overline{OK}_3 = |\dot{Y}_A| = G$  である。 $MM'$  成分が  $OM'$  上にあるとき  $\dot{Y}_B = jB_c$  である。構成範囲は  $150^\circ \leq \theta \leq -30^\circ$  である。この範囲外では  $G < 0$  となり不能である。 $\theta = -30^\circ$ 、 $\theta = 150^\circ$  のとき  $\dot{Y}_A = 0$ 、 $\theta = -180^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。つぎに  $\dot{Y}_B$  を抵抗にとるとき  $-\dot{Y}_A$  は  $j$  軸上に、 $\dot{Y}_B \in^{j60^\circ}$  は  $OH$  上にある。図のような  $\overline{OP}_1$  において、 $\overline{OJ}_1 = |\dot{Y}_A| = |jB_c| = B_c$ 、 $\overline{OH}_1 = |\dot{Y}_B| = G$  である。 $j$  軸成分が  $+j$  側にあるとき  $\dot{Y}_A = -jB_L$  である。構成範囲は  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  である。この範囲外では  $G < 0$  となり不能である。 $\theta = 60^\circ$  の

とき  $\dot{Y}_A = 0$ ,  $\theta = \pm 90^\circ$  のとき  $\dot{Y}_B = 0$  である。

4. ベクトル図解

付加素子の構成と電圧電流ベクトルの二、三の具体例について作図し検討する。

4-1 コンデンサとリアクトルによる構成例

図1 (a) の $\Delta$ 形負荷  $\dot{Y}_{ab}$ ,  $\dot{Y}_{bc}$ ,  $\dot{Y}_{ca}$  が図7のように示されるとき, (3) 式の平衡条件により左辺の合成ベクトルを作図する。 $\dot{Y}_{bc}$  より  $OQ$ ,  $\dot{Y}_{ca}$  より

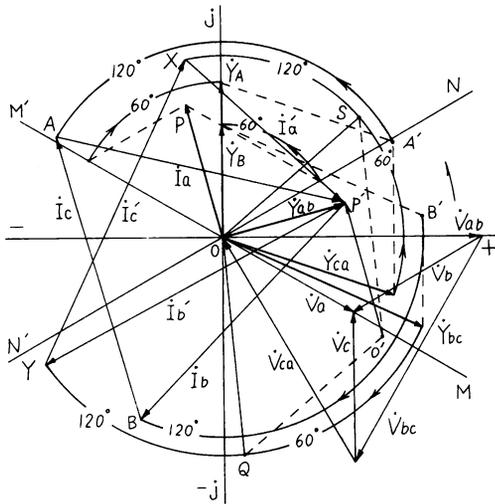


図7 コンデンサによる構成とベクトル図 (△形接続, 第I形)

$\overline{OS}$  を作り, その合成点  $O'$  より  $\dot{Y}_{ab}$  へ向うベクトル  $O'P'$  を原点へ移して合成ベクトル  $\overline{OP}$  とする。右辺は (50) 式で表わされる第I形であるから, I-1により  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  を作図すると図のように求められる。電流ベクトルについては, (1) 式において  $V=1$  とすればアドミタンスで作図できるので, 各電流の状態, 位相などを検討するのに都合がよい。(1) 式より  $\dot{Y}_{ca}$  と  $\dot{Y}_A$  の合成点  $A'$  から点  $A$  を求め,  $\dot{Y}_{bc}$  と  $\dot{Y}_B$  の合成点  $B'$  から点  $B$  を求めると,  $\Delta AP'B$  は平衡線電流  $\dot{I}_a$ ,  $\dot{I}_b$ ,  $\dot{I}_c$  を表わす。 $\dot{Y}_A=0$ ,  $\dot{Y}_B=0$  として作図される  $\Delta XP'Y$  は, 不平衡線電流  $\dot{I}'_a$ ,  $\dot{I}'_b$ ,  $\dot{I}'_c$  である。 $\dot{V}_{ab}$ ,  $\dot{V}_{bc}$ ,  $\dot{V}_{ca}$  は線間電圧,  $\dot{V}_a$ ,  $\dot{V}_b$ ,  $\dot{V}_c$  は相電圧であるから電圧電流の位相を知ることができる。

図1 (b) の場合の平衡条件は (4) 式であり, (5) 1) 式で表わされる第II形である。II-1により  $\dot{Y}_A$ ,

$\dot{Y}_B$  を作図すると図8のように求められる。電流は (6) 式より同様に作図し, 図のような平衡線電流  $\dot{I}_a$ ,  $\dot{I}_b$ ,  $\dot{I}_c$  が得られる。図1 (c) の場合の平衡条件 (5) 式は (52) 式の第III形において  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  を入れかえた形である。このことを考慮して III-1 により  $\dot{Y}_A$ ,  $\dot{Y}_B$  を作図すると図9のように求められる。電流については (7) 式より同様に作図すれば図のような平衡

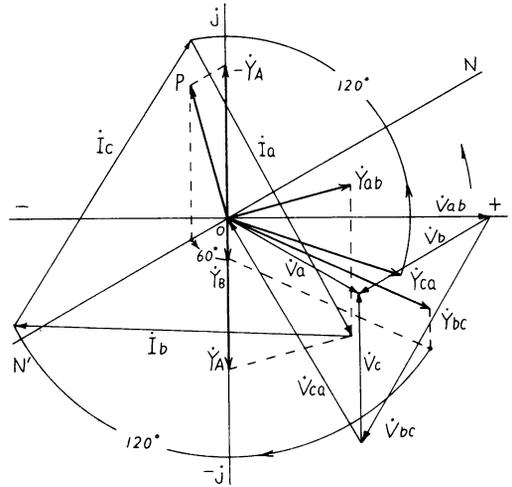


図8 リアクトルによる構成とベクトル図 (△形接続, 第II形)

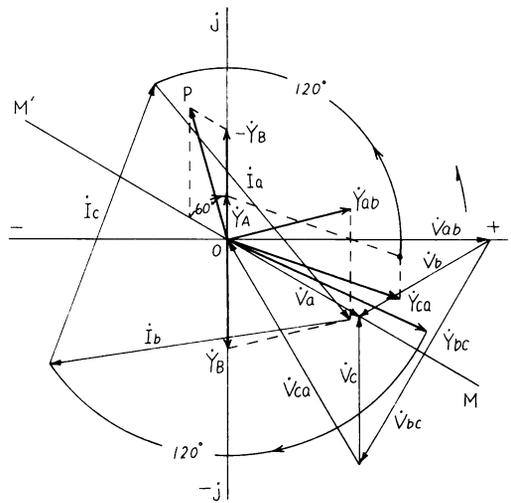


図9 コンデンサとリアクトルによる構成とベクトル図 (△形接続, 第III形)

線電流  $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$  が得られる。以上の三図について、 $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B$  は第Ⅰ形の場合はコンデンサ，第Ⅱ形の場合はリアクトル，第Ⅲ形の場合はコンデンサとリアクトルとなる。このうちでは第Ⅰ形による構成が線電流が小さく，力率が良いことがわかる。このように相順と接続法によって異なる結果が得られる。

次に単相接続の例について示す。図3(a)の(a)，(b)図において  $\dot{Y}_{ab} = \overline{OP}$  が図10に示されるとき，(a)の接続による構成と線電流は，(32)式(第Ⅰ形)と(41)式より作図して  $\dot{Y}_{A1}, \dot{Y}_{B1}, \triangle APB$  となる。(b)の接続によるときは，(33)式(第Ⅱ形)と(42)式より作図して  $\dot{Y}_{A2}, \dot{Y}_{B2}, \triangle OA'B'$  となる。したがってこの場合は(a)の接続がよいことがわかる。また  $\dot{Y}_{ab} = \overline{OP}$  が図11に示されるとき，(a)の接続による

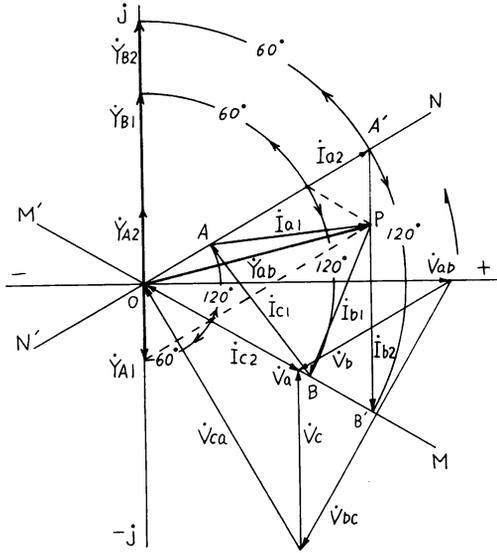


図10 コンデンサとリアクトルによる構成及び電流ベクトル(A)

構成と線電流は同様に  $\dot{Y}_{A1}, \dot{Y}_{B1}, \triangle APB$  となる。(b)の接続によるときは  $\dot{Y}_{A2}, \dot{Y}_{B2}, \triangle OA'B'$  となる。この場合は(b)の接続がよいことがわかる。このように  $\overline{OP}$  の位置によっても異なる結果が得られる。

4-2 抵抗を組合せた構成例

3で述べたように抵抗で考えるときは構成範囲が限られる。単相接続を例にとると，図3(a)の(a)図の  $\dot{Y}_{ab} = \overline{OP}$  ( $0^\circ < \theta < 30^\circ$ ) が図12のように示さ

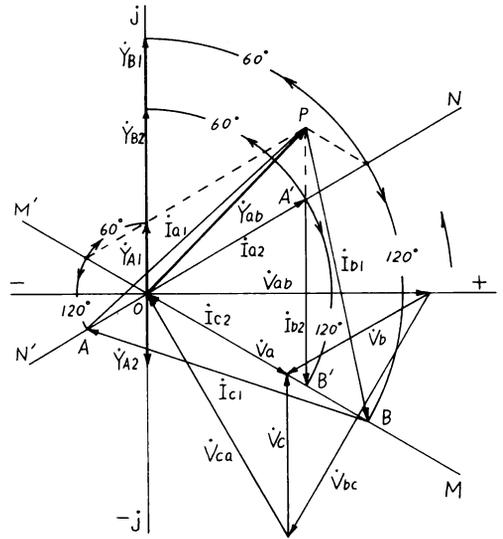


図11 コンデンサとリアクトルによる構成及び電流ベクトル(B)

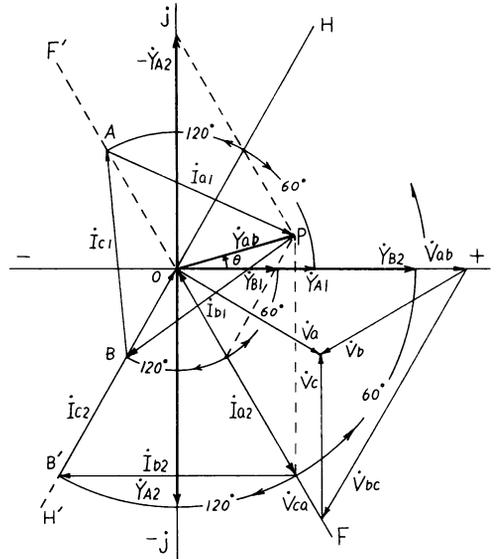


図12 抵抗を含む構成と電流ベクトル(A)

れているとき，抵抗のみによる構成のときはI-2により作図すると図のような  $\dot{Y}_{A1}, \dot{Y}_{B1}$  が得られる。線電流は  $\triangle APB$  の  $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$  で表わされる。この回路ではI-3により抵抗とコンデンサあるいはリアクトルによる構成はできないが，同(b)図の回路にすればII-3により  $\dot{Y}_B$  を抵抗にとることでこの構成が可能となる。この場合は  $\dot{Y}_{A2}$  (リアクトル)，

$\dot{Y}_{B2}$  と得られ線電流は  $\triangle OA'B'$  の  $\dot{I}_{a2}$ ,  $\dot{I}_{b2}$ ,  $\dot{I}_{c2}$  となる。この例では抵抗のみによる構成は、抵抗とリアクトルによる構成に比較して力率が良く線電流が小さい。同じく (a) 図で  $\dot{Y}_{ab} = \overline{OP}$  ( $30^\circ < \theta < 60^\circ$ ) が図13のように示されるとき、抵抗のみによる構成は図12と同様にできるが、また抵抗とコンデンサによる構成ができる。これを I-3 により作図すると  $\dot{Y}_A$  を抵抗にとることで、図のような  $\dot{Y}_{A1}$ ,  $\dot{Y}_{B1}$  が得られる。線電流は  $\triangle APB$  の  $\dot{I}_{a1}$ ,  $\dot{I}_{b1}$ ,  $\dot{I}_{c1}$  で表わされる。同 (b) 図の回路にすれば、図12と同様に  $\dot{Y}_B$  を抵抗にとる構成ができるが、 $\dot{Y}_A$  を抵抗にとる構成もできる。後者について II-3 により作図すると図のような  $\dot{Y}_{A2}$ ,  $\dot{Y}_{B2}$  が得られる。線電流は  $\triangle OA'B'$  の  $\dot{I}_{a2}$ ,  $\dot{I}_{b2}$ ,  $\dot{I}_{c2}$  となる。この例では (a) 図の回路構成が (b) 図の回路構成により良い。

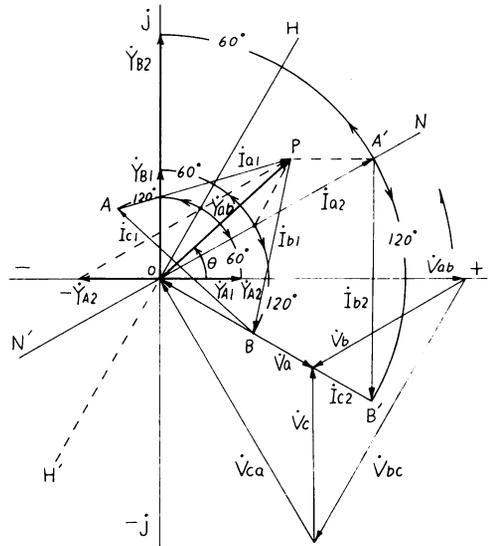


図13 抵抗を含む構成と電流ベクトル(B)

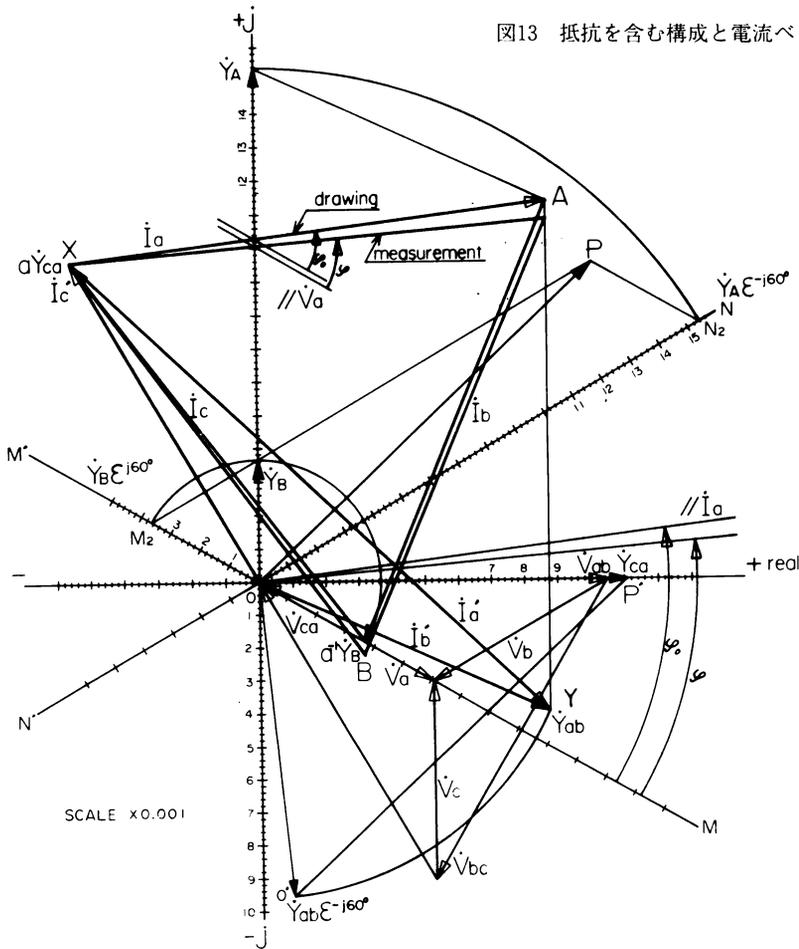


図14 V型接続の図解と実測

## 5. 数値例

図14にV形接続の実測値と図解を示す。この場合の不平衡回路は図2の(β) — (b)であり、 $\dot{Y}_{ab}$ は抵抗とリアクトル負荷、 $\dot{Y}_{ca}$ は抵抗負荷である。実測値よりアドミタンスを求めると

$$\dot{Y}_{ab} = 0.00876 - j0.00397 \quad [S]$$

$\dot{Y}_{ca} = 0.0111 - j0 \quad [S]$  であり、これを図示する。平衡条件は(15)式であり第I形の構成である。

(50)式の合成ベクトル $\overline{OP}$ を求めると図示のようになる。この場合3—1のI—1で説明してあるように、付加素子としてはコンデンサを用いる構成となる(図4参照)。図のアドミタンススケールより

$$\overline{ON}_2 = |\dot{Y}_A| = |jB_c| = B_{c1} = 15.35 \times 10^{-3} \quad [S]$$

$$\overline{OM}_2 = |\dot{Y}_B| = |jB_c| = B_{c2} = 3.68 \times 10^{-3} \quad [S]$$

と求められる。キャパシタンスは

$$C_1 = B_{c1} / 2\pi f (377) = 40.71 \times 10^{-6} \quad [F]$$

$$C_2 = B_{c2} / 2\pi f (377) = 9.76 \times 10^{-6} \quad [F]$$

となる。電流ベクトルは(24)式より作図され、正三角形ABXの $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$ となる。不平衡電流は△YOXの $\dot{I}'_a$ 、 $\dot{I}'_b$ 、 $\dot{I}'_c$ である。アドミタンススケールに線間電圧の大きさを乗ずれば電流の大きさが求められる。力率角は作図より $\varphi_0 = 37^\circ$ と求められる。 $\boxed{\dot{Y}_A}$   $\Rightarrow 40 \mu F$ ,  $\boxed{\dot{Y}_B}$   $\Rightarrow 10 \mu F$ のコンデンサを接続して実測した。△ABXで矢印の付いていない $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$ は線電流の実測値である。力率角の実測値は $\varphi = 35^\circ$ である。図解値との間に若干のずれがあるが、これは三相電圧が完全に対称ではなく線間電圧に2.5%程度の差があったことが主な原因である。

## 6. あとがき

三相不平衡電流の平衡化について、既知アドミタンス固定負荷の場合のベクトル図解法を示した。平衡用付加素子の構成例でわかるように、負荷の合成ベクトルの位置によって一般に複数個の回路構成ができる。電流の大きさ、位相角はこの解法により検討され付加素子をきめることができる。本方式に関する数式的取扱いは、三相不平衡負荷の電流平衡装置の理論として古くからなされている<sup>4)</sup>。実際上はコンデンサとリアクトルを用いた平衡装置は、低周波誘導炉等が単相負荷として商用周波電源で直接使用されるとき用いられる<sup>5)</sup>。数式的計算によって付加素子及び電流等が求められることは言うまでもないが、交流理論ではベクトル図解法が回路の特性を検討する上で簡便有効な手段である。

終わりに、本学入佐俊幸教授のご指導に対し、心から謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 入佐 電気学会九州支部論文集 No 303 (昭49)
- 2) 入佐 電気学会九州支部論文集 No 105 (昭50)
- 3) 実成・入佐 電気学会九州支部論文集 No 514 (昭54)
- 4) 漆畑 電学誌 VoL 82 No 885 (June 1962)
- 5) たとえば電気電子工学大百科辞典 No 19 (1983) 電気書院