UDC 621.316.13.015.3:621.3.015.1

論文

59-B 6

不平衡三相回路 1 線地絡時における各電圧 のベクトル軌跡作図法

正員 岩谷 高四郎 (東北電力)

1. まえがき

一般に、配電系統はその構成要素が多様多様であり、各相の対地アドミタンスは不平衡で、常に零相回路に残留電圧があるのが普通である。このため実際の配電系統について、1 線地絡時の零相電圧や各相対地電圧のベクトル軌跡を円線図法により作図するのは難しかった。

筆者らは、先に実系統について、3 線一括対地アドミタンスや各相対地アドミタンスの不平衡分を正確に求める手法および新しい零相電圧計算式を導いた⁽⁴⁾。このたび、この手法の計算式をもとにして、各相対地アドミタンスの不平衡を考慮した配電系統について、1 線地絡時の零相電圧や各相対地電圧のベクトル軌跡作図法を導いた。そして、このベクトル軌跡図を用いることにより、地絡インピーダンスの変化に対応する零相電圧や各相対地電圧を定性的および定量的に解明することを容易にし、デジタル計算とは異なる有利な故障解析を可能にした。例えば、配電線が変圧器の励磁リアクタンスを通して地絡した場合、鉄共振が発生することがある。このときの基本波異常電圧がどのように現れるかは、この図式解法により容易にその大きさを、位相を定量的に図示することができる。

なお、この手法は配電系統のみに限らず、1 線地絡故障に関して、零相インピーダンスのみを考慮すればよいような小規模系統であれば、送電系統にもそのまま適用できるものである。

2. 1 線地絡時の配電系統回路定数と故障計算式

図 1 は、三相 3 線式中性点非接地系統の 1 線地絡時

の回路図である。

ここで、各記号の定義は、次のとおりとする。

$\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ ……対称三相起電力

$\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c$ ……各相対地電圧

$\dot{V}_N$ ……中性点 N の対地電圧(零相電圧)

$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ ……各相電流(負荷電流は無視)

$\dot{Y}_a, \dot{Y}_b, \dot{Y}_c$ ……各相対地アドミタンス

$\dot{Z}_g$ ……地絡インピーダンス

更にまた、次の (1), (2), (3) 式に示す定数 $\dot{Y}_{00}$, $\dot{Y}_{00}'$, $\dot{A}$ を定める。

$$\dot{Y}_{00} = \dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c = Y_{00} \angle \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{00}' &= \dot{Y}_a + \dot{Y}_b \angle -120^\circ + \dot{Y}_c \angle 120^\circ \\ &= Y_{00}' \angle \theta' \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\dot{A} = \angle \alpha = p + jq \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\dot{Y}_{00}$ は 3 線一括対地アドミタンスであり、 $\dot{Y}_{00}'$ はその不平衡分である。

また、 $\dot{A}$ は地絡相によって定まる定数で、

$$\left. \begin{aligned} a \text{ 相地絡で } \dot{A} &= \angle 0^\circ \\ b \text{ 相地絡で } \dot{A} &= \angle -120^\circ \\ c \text{ 相地絡で } \dot{A} &= \angle 120^\circ \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3')$$

である。

以上より、いま $\dot{E}_a = E$ として、 a 相が $\dot{Z}_g$ を通して 1 線地絡したときの電圧、電流分布を求める。

図 1 1 線地絡時の電圧電流分布図
(中性点非接地)

Fig. 1. Voltage and current distribution at the single-phase grounding.

A Method of the Vector Loci of Phase Voltages During IL-G Fault in Unbalanced 3-Phase Circuit. By Koshiro Iwaya, Member (Tohoku Electric Power Co).
岩谷高四郎: 正員, 東北電力株式会社

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= (\dot{E}_a + \dot{V}_N) / \dot{Z}_0 + \dot{Y}_a (\dot{E}_a + \dot{V}_N) \\ \dot{I}_b &= \dot{Y}_b (\dot{E}_b + \dot{V}_N) \\ \dot{I}_c &= \dot{Y}_c (\dot{E}_c + \dot{V}_N) \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

(1), (2)式と(4)式を用いて

$$\begin{aligned} \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \\ = (E + \dot{V}_N) / \dot{Z}_0 + \dot{Y}_{00}' E + \dot{Y}_{00} \dot{V}_N \\ = 0 \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

となる。同様にして次の(6)式, (7)式を得る。

$$\begin{aligned} b \text{ 相地絡で,} \\ (E \angle -120^\circ + \dot{V}_N) / \dot{Z}_0 + \dot{Y}_{00}' E + \dot{Y}_{00} \dot{V}_N \\ = 0 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c \text{ 相地絡で} \\ (E \angle 120^\circ + \dot{V}_N) / \dot{Z}_0 + \dot{Y}_{00}' E + \dot{Y}_{00} \dot{V}_N \\ = 0 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

(5), (6), (7)式より(8)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \dot{A} E / \dot{Z}_0 + \dot{V}_N / \dot{Z}_0 + \dot{Y}_{00}' E + \dot{Y}_{00} \dot{V}_N \\ = 0 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

(8)式を変形して零相電圧 $\dot{V}_N$ を求めると

$$\dot{V}_N = -E \frac{\dot{A} + \dot{Z}_0 \dot{Y}_{00}'}{1 + \dot{Z}_0 \dot{Y}_{00}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

また, 地絡電流 $\dot{I}_0$ を求めると,

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{A} E + \dot{V}_N}{\dot{Z}_0} = E \frac{\dot{A} \dot{Y}_{00} - \dot{Y}_{00}'}{1 + \dot{Z}_0 \dot{Y}_{00}} \dots\dots\dots (10)$$

となる。

すなわち, 3線一括対地アドミタンス $\dot{Y}_{00}$ と各相対地アドミタンスの不平衡分 $\dot{Y}_{00}'$ の系統定数が定まれば, 各相が任意の地絡インピーダンス $\dot{Z}_0$ で1線地絡を生じた場合の $\dot{V}_N, \dot{I}_0$ は(9)式, (10)式で求められる。

また, 任意の地絡インピーダンス $\dot{Z}_0$ で, 任意の相を地絡させたときの零相電圧を $\dot{V}_N$, 常時の各相対地アドミタンスの不平衡によって生ずる残留電圧を $\dot{V}_{N0}$ とすると, $\dot{Y}_{00}, \dot{Y}_{00}'$ は, (11), (12)式となる。

$$\dot{Y}_{00} = \frac{E \dot{A} + \dot{V}_N}{\dot{Z}_0 (\dot{V}_N - \dot{V}_{N0})} \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{Y}_{00}' = -\frac{\dot{V}_{N0}}{E} \dot{Y}_{00} \dots\dots\dots (12)$$

もし, 中性点がインピーダンス $\dot{Z}_N$ で接地されているときは,

$$\dot{Y}_N = 1 / \dot{Z}_N, \quad \dot{Y}_{N0} = \dot{Y}_N + \dot{Y}_{00}$$

とおくと, 中性点接地系統でも $\dot{Y}_{00}$ の代りに $\dot{Y}_{N0}$ を用いることにより, (9)~(12)式がそのまま適用できる。

この(9)式より, 1線地絡時の零相電圧や各相対地

電圧のベクトル軌跡を円線図法で作図できるので, 第3章以下にこれを述べる。

3. 各相が平衡しているときのベクトル軌跡

各相の対地アドミタンスが平衡しているときは, $\dot{Y}_{00}' = 0$ であるので, $1 / \dot{Z}_0 = \dot{Y}_0$ とすると, 1線地絡時の零相電圧 $\dot{V}_N$ を表わす(9)式は, (13)式のようになる。

$$\dot{V}_N = -E \cdot \dot{A} \frac{\dot{Y}_0}{\dot{Y}_0 + \dot{Y}_{00}} = \dot{V}_{N1} \dots\dots\dots (13)$$

(13)式に示すように, このときの零相電圧を $\dot{V}_{N1}$ として, 以下, $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡作図法について述べる。

〈3・1〉 $\dot{V}_{N1}$ の軌跡が円になる証明 $\dot{Y}_0 = Y_0 \angle \theta_0$ とすれば, (13)式は

$$\dot{V}_{N1} = -E \cdot \dot{A} \frac{Y_0 \angle \theta_0}{Y_0 \angle \theta_0 + g_{00} + j b_{00}} \dots\dots\dots (14)$$

となる(ここで, $\dot{Y}_{00} = g_{00} + j b_{00}$ とする)。

配電系統においては, 1線地絡時の地絡インピーダンスは, 樹木, 動物, 金属または汚損・破損絶縁物のような純抵抗が大部分である。稀なケースとして, 変圧器やコンデンサを通したリアクタンス地絡も考えられるが, これらも本論文の中では純リアクタンスとして考えてよいので, θ_0 は 0 か $\pi/2$ か $-\pi/2$ である。

従って, (14)式を変形すると

$$\dot{V}_{N1} = V_{N1} \angle \alpha \angle \pi + \theta_0 - \beta \dots\dots\dots (15)$$

となる。

ここで,

(a) 抵抗地絡では,

$$\theta_0 = 0, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{b_{00}}{Y_0 + g_{00}} \dots\dots\dots (16)$$

(b) リアクタンス地絡では,

$$\theta_0 = \pm \pi/2, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{Y_0 + b_{00}}{g_{00}} \dots\dots\dots (17)$$

($\dot{Y}_0$ がコンデンサであれば $\theta_0 = \pi/2, 0 < Y_0$, $\dot{Y}_0$ がインダクタンスであれば $\theta_0 = -\pi/2, Y_0 < 0$) である。

また, 各相の対地電圧は図1に示すように, 中性点電圧 $\dot{V}_N$ に各相の起電力 $\dot{E}_a (=E), \dot{E}_b, \dot{E}_c$ を加えたものであるので, 地絡相の対地電圧を $\dot{V}_P$ とすると,

$$\dot{V}_P = \dot{V}_{N1} + E \cdot \dot{A} \quad \therefore \dot{V}_{N1} = -E \cdot \dot{A} + \dot{V}_P \dots\dots\dots (18)$$

となる。

(15)~(18)式より $\dot{V}_{N1}$ のベクトルの頂点は, 図2のように $\dot{A} = \angle \alpha$ において, α を基準にすると,

図 2 $\dot{V}_{N1}, \dot{V}_P, -E \cdot \dot{A}$ の関係ベクトル図Fig. 2. Phasor diagram of $\dot{V}_{N1}, \dot{V}_P, -E \cdot \dot{A}$.

$-E \cdot \dot{A}$ を底辺として、 $\dot{V}_{N1}, \dot{V}_P$ を他の二辺とする三角形の頂点になる。

この三角形の頂角をそれぞれ $\varphi_R, \varphi_C, \varphi_L$ として、(13), (18)式および図2より求めると、次の(19)式のとおりになる。

$$\frac{V_{N1}}{V_P} \angle \varphi = \frac{\dot{V}_{N1}}{\dot{V}_P} = \frac{-E \dot{A} \{ \dot{Y}_g / (\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}) \}}{E \dot{A} \{ 1 - \dot{Y}_g / (\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}) \}} = \frac{-\dot{Y}_g}{\dot{Y}_{00}} = \frac{Y_g}{Y_{00}} \angle \pi + \theta_g - \theta \quad \dots (19)$$

すなわち、

(a) 抵抗地絡では

$$\theta_g = 0 \quad \therefore \varphi_R = \pi - \theta \quad \dots (20)$$

(b) コンデンサ地絡では

$$\left. \begin{aligned} \theta_g &= \frac{\pi}{2} \\ \varphi &= \pi + \frac{\pi}{2} - \theta \geq \pi \quad \therefore \varphi_C = 2\pi - \varphi = \frac{\pi}{2} + \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots (21)$$

(c) インダクタンス地絡では

$$\theta_g = -\frac{\pi}{2} \quad \therefore \varphi_L = \frac{\pi}{2} - \theta \quad \dots (22)$$

$\varphi_R, \varphi_C, \varphi_L$ は、いずれも系統条件が定まれば一定の値であり、 $-E \cdot \dot{A}$ を底辺とする三角形の頂角である。従って、 $\dot{Y}_g$ が変化して $\dot{V}_{N1}, \dot{V}_P$ が変化しても、 $\varphi_R, \varphi_C, \varphi_L$ は変わらず、図3に示すように $-E \cdot \dot{A}$ を弦とす

図 3 $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡図Fig. 3. Vector locus of $\dot{V}_{N1}$.

る円に内接する円周角になる。

すなわち、 $\dot{V}_{N1}$ の頂点は円の軌跡を描く。

〈3.2〉 $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡図の半径と中心 $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡が円になることを述べたが、次にこの円の半径と中心を求める。

(19)式より $\varphi = \pi + \theta_g - \theta$

正弦定理より

$$R = E / (2 \sin \varphi) \quad \dots (23)$$

従って、中心 O' は、

$$O', (-E/2, \pm \sqrt{R^2 - (E/2)^2}) \quad \dots (24)$$

となる。

(a) 抵抗地絡では、

$$R = \frac{E}{2 \sin \theta} \quad O', \left(-\frac{E}{2}, -\frac{E}{2} \cot \theta \right)$$

(b) リアクタンス地絡では、

$$R = \frac{E}{2 \cos \theta} \quad O', \left(-\frac{E}{2}, \frac{E}{2} \tan \theta \right)$$

〈3.3〉 $\dot{V}_{N1}$ のベクトルの位置 図3に $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡を表わしたが、次に $\dot{Y}_g$ に応じた $\dot{V}_{N1}$ の値を図上に求める。

(15)式より $\dot{V}_{N1}$ の位置は θ_g と、 β 、すなわち $\dot{Y}_g$ によって定まる。

従って、地絡相によって定まる α を基準として、

(a) 抵抗地絡では $\pi - \beta$

(b) コンデンサ地絡では $(3/2)\pi - \beta$

(c) インダクタンス地絡では $(\pi/2) - \beta$

の各位置のベクトルが $\dot{V}_{N1}$ である。

4. 不平衡分のベクトル軌跡

1線地絡時の零相電圧を表わす(9)式は(25)式のように表わすことができる。

$$\dot{V}_N = -E \cdot \dot{A} \frac{\dot{Y}_g}{\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}} - E \frac{\dot{Y}_{00}'}{\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}} \quad \dots (25)$$

(25)式において、右辺の第1項は(13)式に表わす $\dot{V}_{N1}$ であり、不平衡のないときの零相電圧である。そして第2項を $\dot{V}_{N2}$ とすると、 $\dot{V}_{N2}$ は不平衡分アドミタンス $\dot{Y}_{00}'$ があることによって生ずる分であり、零相電圧 $\dot{V}_N$ は、 $\dot{V}_{N1}$ と $\dot{V}_{N2}$ とを合成したものである。

以下、 $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡の作図法について述べる。

〈4.1〉 $\dot{V}_{N2}$ の軌跡が円になる証明 (25)式より(26)式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{N2} &= -\frac{E \cdot \dot{Y}_{00}'}{\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}} \\ &= E \cdot Y_{00}' \angle \pi + \theta' \left(\frac{1}{Y_g + Y_{00}} \right) \quad \dots (26) \end{aligned}$$

すなわち、 $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡は $1/(\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00})$ のベクトル軌跡を $E \cdot Y_{00}'$ 倍して $\pi + \theta'$ だけ進めたものである。そして $\dot{V}_{N2}$ は $\dot{A}$ 、すなわち、地絡相の相別とは関係しない。そして

$$Y_g = 0 \text{ で } 1/(\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}) = (1/Y_{00}) \angle -\theta$$

$$Y_g = \infty \text{ で } 1/(\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}) = 0$$

であるので、 $1/(\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00})$ は $\dot{Y}_g$ によって $(1/Y_{00}) \angle -\theta$ から 0 まで軌跡を描いて変化する。

(a) 抵抗地絡 ($\dot{Y}_g = Y_g$) のとき

$$\frac{1}{\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}} = \frac{1}{(g_{00} + Y_g) + j b_{00}} \dots (27)$$

従って、このベクトル軌跡は、図4のように半径 $R = 1/2 b_{00}$ 、中心、 O'' 、 $(0, -1/2 b_{00})$ の半円のうち、 $(1/Y_{00}) \angle -\theta$ を弦とする弧になる。

(b) リアクタンス地絡 ($\dot{Y}_g = j Y_g$) のとき

$$\frac{1}{\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}} = \frac{1}{g_{00} + j(b_{00} + Y_g)} \dots (28)$$

従って、このベクトル軌跡は、図5のように半径 $R = 1/2 g_{00}$ 、中心 O'' 、 $(1/2 g_{00}, 0)$ の円になる。そして、 $(1/Y_{00}) \angle -\theta$ を境に、 $0 < Y_g$ (コンデンサの部分) と、 $Y_g < 0$ (インダクタンス) の部分に分かれる。

〈4.2〉 $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡 (26)式に示すように、 $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡は、図4、図5のベクトル軌跡を $E \cdot Y_{00}'$ 倍して、 $(\pi + \theta')$ だけ進めたものである。

(a) 抵抗地絡 ($\dot{Y}_g = Y_g$) のとき

図4のベクトル軌跡を $(\pi + \theta')$ だけ進めて $E \cdot Y_{00}'$ 倍すると、 $(\pi/2) + \theta'$ の直線上に中心があり、半径 R

図4 $1/(\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00})$ のベクトル軌跡図

Fig. 4. Vector locus of $1/(\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00})$.

図5 $1/j\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}$ のベクトル軌跡図

Fig. 5. Vector locus of $1/j\dot{Y}_g + \dot{Y}_{00}$.

図6 $\dot{Y}_g = Y_g$ のときの $\dot{V}_{N2}$ ベクトル軌跡図

Fig. 6. Vector locus of $\dot{V}_{N2}(\dot{Y}_g = Y_g)$.

図7 $\dot{Y}_g = jY_g$ のときの $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡図

Fig. 7. Vector locus of $\dot{V}_{N2}(\dot{Y}_g = jY_g)$.

$= (E/2) \cdot (Y_{00}'/Y_{00} \sin \theta)$ で原点 O を通る円の一部になる。そして、 $\dot{V}_{N2}$ は図6のように

$$\dot{V}_{N2} = V_{N2} \angle \pi + \theta' - \beta \quad \left(\beta = \tan^{-1} \frac{b_{00}}{Y_g + b_{00}} \right) \dots (29)$$

となる。

(b) リアクタンス地絡 ($\dot{Y}_g = jY_g$) のとき

図5のベクトル軌跡を $(\pi + \theta')$ だけ進めて $E \cdot Y_{00}'$ 倍すると、 $(\pi + \theta')$ の直線上に中心があり、半径 $R = (E/2) \cdot (Y_{00}'/Y_{00} \cos \theta)$ で、原点 O を通る円になる。そして $\dot{V}_{N2}$ は図7のように

$$\dot{V}_{N2} = V_{N2} \angle \pi + \theta' - \beta \quad \left(\beta = \tan^{-1} \frac{Y_g + b_{00}}{g_{00}} \right) \dots (30)$$

となる。

5. 零相電圧 $\dot{V}_N$ のベクトル軌跡

1線地絡時の零相電圧 $\dot{V}_N$ のベクトル軌跡は $\dot{V}_{N1}$ 、 $\dot{V}_{N2}$ それぞれのベクトル軌跡を合成すればよい。 $\dot{V}_{N1}$ 、 $\dot{V}_{N2}$ は、いずれも $\dot{Y}_g$ すなわち、 β によって定まる。

従って、 $\dot{V}_{N1}$ および $\dot{V}_{N2}$ の円線図上、それぞれ β に対応するベクトルを求めて合成したものが零相電圧 $\dot{V}_N$ のベクトルである。

一例として、 $Y_{00}'/Y_{00} = 1/5$ 、 $\theta = 75^\circ$ 、 $\theta' = 120^\circ$ の系統で、1線抵抗地絡を生じた場合について、零相電圧のベクトル軌跡を求める。

〈5.1〉 $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡 中心 O' , $(-E/2 \cos 75^\circ)$ で原点 O を通る円を描くと、横軸より上部の弧が a 相地絡時の $\dot{V}_{N1}$ のベクトル軌跡である。そして、この軌跡を 120° 遅らせたものが、 b 相地絡時の $\dot{V}_{N1}$ であり、 120° 進めたものが c 相地絡時の $\dot{V}_{N1}$ である。

〈5.2〉 $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡 中心 O'' は、 $(\pi/2) + \theta' = 210^\circ$ の直線上にあり、この円も原点 O を通り、半径 R は

$$R = \frac{E}{2} \frac{Y_{00}'}{Y_{00} \sin \theta} = \frac{E}{10 \sin 75^\circ} \dots\dots\dots (31)$$

である。そして、 $\pi + \theta' - \theta = 225^\circ$ から $\pi + \theta' = 300^\circ$ までの間の弧が $\dot{V}_{N2}$ のベクトル軌跡である。

〈5.3〉 $\dot{V}_N$ のベクトル軌跡 任意の β を選び、 $\dot{V}_{N1}$ の軌跡上 $(\pi - \beta)$ のベクトルと、 $\dot{V}_{N2}$ の軌跡上 $(300^\circ - \beta)$ のベクトルを求め、これらを合成したベクトルが抵抗を通した 1 線地絡時の零相電圧 $\dot{V}_N$ のベクトル軌跡である。

図 8、図 9 に上記 $\dot{V}_{N1}$, $\dot{V}_{N2}$, $\dot{V}_N$ のベクトル軌跡を示した。

図 8 a 相地絡時の $\dot{V}_N$ 軌跡図

Fig. 8. Vector locus of $\dot{V}_N$ during a -phase grounding.

図 9 各相地絡時の $\dot{V}_N$ 軌跡図

Fig. 9. Vector locus of $\dot{V}_N$ during each phase grounding.

6. $\dot{V}_N$ の軌跡を直接求める方法

〈6.1〉 $\dot{V}_N$ の軌跡が円になる証明 いままで三相平衡分の $\dot{V}_{N1}$, および不平衡分による $\dot{V}_{N2}$ の各円線図を合成して、不平衡三相回路 1 線地絡時の零相電圧 $\dot{V}_N$ の軌跡を作図する方法について説明した。次にこの $\dot{V}_N$ もまた円であり、その半径と中心を求め、直接 $\dot{V}_N$ の円線図を描くことができることについて述べる。

文献(3)によれば、『 λ を定数として、

$$\dot{P} = (\dot{Q} + \dot{R}\lambda) / (\dot{S} + \dot{T}\lambda) \dots\dots\dots (32)$$

の形で示されるベクトル $\dot{P}$ は円を表わす。

そして、この円の中心を $\dot{M}$, 半径を r とすると、次式で求められる。

$$\dot{M} = (\dot{Q}\bar{\dot{T}} - \dot{S}\bar{\dot{R}}) / (\dot{S}\bar{\dot{T}} - \dot{S}\bar{\dot{T}}) \dots\dots\dots (33)$$

$$r = |(\dot{R}\dot{S} - \dot{Q}\dot{T}) / (\dot{S}\bar{\dot{T}} - \dot{S}\bar{\dot{T}})| \dots\dots\dots (34)$$

』である。また、一方、(9)式を変形すると(35)式を得る ($1/\dot{Z}_g = \dot{Y}_g = Y_g \angle \theta_g$ より)。

$$\dot{V}_N = -E \frac{\dot{Y}_{00}' + \angle \alpha + \theta_g \cdot Y_g}{Y_{00} + \angle \theta_g \cdot Y_g} \dots\dots\dots (35)$$

すなわち、 Y_g は実変数 (θ_g は地絡インピーダンスの種別が定まれば定数となる) となるので、ベクトル $\dot{V}_N$ は円を表わす。(35)式を(32)~(34)式に代入して

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= Y_{00}' \angle \theta' = g_{00}' + jb_{00}' & \dot{R} &= \angle \alpha + \theta_g \\ \dot{S} &= Y_{00} \angle \theta' = g_{00} + jb_{00} & \dot{T} &= \angle \theta_g \quad \lambda = Y_g \end{aligned}$$

とすると

$$\begin{aligned} \dot{M} &= -E \frac{Y_{00}' \angle \theta' \angle -\theta_g}{Y_{00} \angle \theta \angle -\theta_g} * \\ & \quad * \frac{-Y_{00} \angle -\theta \angle \alpha + \theta_g}{-Y_{00} \angle -\theta \angle \theta_g} \\ &= -E \frac{(g_{00}' + jb_{00}') \angle -\theta_g}{(g_{00} + jb_{00}) \angle -\theta_g} * \\ & \quad * \frac{-(g_{00} - jb_{00}) \angle \alpha + \theta_g}{-(g_{00} - jb_{00}) \angle \theta_g} \dots\dots\dots (36) \\ r &= \left| -E \frac{\angle \alpha + \theta_g Y_{00}' \angle \theta' - Y_{00}' \angle \theta' \angle \theta_g}{Y_{00} \angle \theta \angle -\theta_g - Y_{00}' \angle -\theta \angle \theta_g} \right| \\ &= E \left| \frac{(g_{00} + jb_{00}) \angle \alpha + \theta_g}{(g_{00} + jb_{00}) \angle -\theta_g} * \right. \\ & \quad \left. * \frac{-(g_{00}' + jb_{00}') \angle \theta_g}{-(g_{00} - jb_{00}) \angle \theta_g} \right| \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

となり、 $\dot{V}_N$ の軌跡は中心(36)式、半径(37)式の円の中、 $Y_g = 0$ で $\dot{V}_N = (-E \cdot Y_{00}' / Y_{00}) \angle \theta' + \theta$ の点から、 $Y_g = \infty$ で $\dot{V}_N = -E \angle \alpha$ の点までの部分の弧となる。そして、 θ_g は(37')式による。

図 10 α 相地絡時の $\dot{V}_N$ 軌跡図Fig. 10. Vector locus of $\dot{V}_N$ during α -phase grounding.

抵抗地絡では

$$\theta_g = 0 \quad \angle \pm \theta_g = 1$$

コンデンサでは

$$\theta_g = \pi/2 \quad \angle \theta_g = j \quad \angle -\theta_g = -j$$

インダクタンスでは

$$\theta_g = -\pi/2 \quad \angle \theta_g = -j \quad \angle -\theta_g = j$$

.....(37')

〈6・2〉 $\dot{V}_N$ のベクトルの位置 任意の $\dot{Y}_g$ に対応する $\dot{V}_N$ のベクトルを求める。(23), (24)式および(36), (37)式より, $\dot{V}_{N1}$, $\dot{V}_{N2}$ の円線図を描く。そして, $\angle \alpha + \pi - \beta$ のベクトル $\dot{V}_{N1}$ を $\dot{V}_{N1}$ の円線図上に求める。次に(29)式により $\dot{V}_{N2}$ の位相 $\angle \pi + \theta' - \beta$ のベクトルを $\dot{V}_{N1}$ に加え, $\dot{V}_N$ の軌跡と交った点が任意の $\dot{Y}_g$ における $\dot{V}_N$ のベクトルである。

α 相抵抗地絡時の作図を, 図 10 に示すが, 図 8 と等しいものになる。

7. 各相対地電圧のベクトル軌跡

各相対地電圧のベクトル軌跡は,

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_N + E \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_N + E \angle -120^\circ \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_N + E \angle 120^\circ \end{aligned} \right\} \text{.....(38)}$$

より求める。

図 10, 図 11 の α 相地絡時の $\dot{V}_N$ より, このときの各相対地電圧をベクトル軌跡に表すと図 11 のとおりである。ここで $\dot{V}_{a0}$, $\dot{V}_{b0}$, $\dot{V}_{c0}$ は, 常時すなわち, $\dot{Y}_g = 0$ のときの各相対地電圧である。

8. 誘導性系統でのベクトル軌跡

中性点リアクトル接地方式の系統では, $\dot{Y}_{N0} = \dot{Y}_N + \dot{Y}_{00}$ が誘導性の系統になる。誘導性系統が一般の容量性系統と異なる点は, $\dot{Y}_{N0} = \dot{Y}_{N0} \angle \theta_{N0}$ において $(-\pi/2) \leq \theta_{N0} \leq 0$ であること, すなわち, $\dot{Y}_{N0} = g_{N0} + jb_{N0}$ において, $b_{N0} \leq 0$ であることのみである。この条件によって, $\dot{V}_{N1}$, $\dot{V}_{N2}$, $\dot{V}_N$ および各相対地電圧のベ

図 11 α 相地絡時の各相対地電圧Fig. 11. Vector locus of phase voltages during α -phase grounding. 図 12 誘導性系統での $\dot{V}_{N1}$ ベクトル軌跡Fig. 12. Vector locus of $\dot{V}_{N1}$ on the inductive system.

トル軌跡を求めると, 図 12~図 15 のとおりである。

9. ベクトル軌跡図を用いた故障解析の一例

図 1 の回路において, $\dot{Z}_g$ に飽和性鉄心をもつコイルを用いた場合を考える。すなわち, これは柱上変圧器を配電系統と大地間に接続し, 対地静電容量と鉄共振を発生させた場合を考えるものである。そして, この回路は地絡保護継電器の試験調整のためよく用いられる, 配電線の人工地絡試験回路である(注, 一般には, $\dot{Z}_g$ 接続時に抑制抵抗をそう入するなどして直列鉄共振を防止している)。

いま, $\theta = 80^\circ$, また, $\dot{Y}_{00}' = 0$ として, $\dot{V}_N$ および各相対地電圧の基本波鉄共振による異常電圧のベクトル軌跡を図示すると, 図 16 のとおりである。

ここで, $\dot{V}_N$, $\dot{V}_a$, $\dot{V}_b$, $\dot{V}_c$ それぞれの円線図の半径 R の大きさは, $R = E/(2 \cos 80^\circ) = 2.88E$ であり, 中心の位置は次のとおりである。

(a) $\dot{V}_N$ の円線図の中心 $O_{N'}$

図 13 誘導性系統での $\dot{V}_{N2}$ ベクトル軌跡Fig. 13. Vector locus of $\dot{V}_{N2}$ on the inductive system. 図 14 各相地絡時の $\dot{V}_N$ 軌跡図(誘導性系統)Fig. 14. Vector locus of $\dot{V}_N$ during each phase grounding (On the inductive system).

図 15 a相地絡時の各相対地電圧(抵抗地絡, 誘導性系統)

Fig. 15. Vector locus of phase voltages during a-phase grounding (On the inductive system).

$$O_{N'} \{-E/2, (E/2)\tan\theta\} = (-E/2, 2.836E)$$

(b) $\dot{V}_a$ の円線図の中心 $O_{a'}$

$$\dot{V}_a = \dot{V}_N + E \text{ より}$$

図 16 鉄共振時のベクトル軌跡

Fig. 16. Vector locus of each voltages during ferro-resonance.

図 17 直列鉄共振時の共振電圧

Fig. 17. Resonance voltage on the series ferro-resonance.

$$O_{a'}(E/2, 2.836E)$$

(c) $\dot{V}_b$ の円線図の中心 $O_{b'}$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_N + E \angle -120^\circ \text{ より}$$

$$O_{b'}(-E, 1.970E)$$

(d) $\dot{V}_c$ の円線図の中心 $O_{c'}$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_N + E \angle 120^\circ \text{ より}$$

$$O_{c'}(-E, 3.702E)$$

$\dot{Z}_0$ の鉄心飽和に従って, $\dot{V}_N=0$, $\dot{V}_a=E$, $\dot{V}_b=E \angle -120^\circ$, $\dot{V}_c=E \angle 120^\circ$ より, $\dot{V}_N(=\dot{V}_0)$ は図 17 のように $\dot{V}_{01}$, $\dot{V}_{02}$, $\dot{V}_{03}$, $\dot{V}_{04}$ のように移動し, $Z_0=0$ で, $\dot{V}_N=\dot{V}_{NG}=-E$, $\dot{V}_a=0$, $\dot{V}_b=\dot{V}_{bG}=\sqrt{3}E \angle -150^\circ$, $\dot{V}_c=\dot{V}_{cG}=\sqrt{3}E \angle 150^\circ$ となる。そして, $\dot{V}_N$ がどこで静止するかは, $\dot{Z}_0$ の飽和曲線と, $\dot{Y}_{00}$ の値によって定まる。

$\theta=80^\circ$ より, $\dot{Y}_{00} \approx j b_{00}$ として, $\dot{Z}_0$ と $\dot{Y}_{00}$ との直列鉄共振曲線を描くと, 図 17 のようになる。

すなわち, $\dot{Z}_0$ の端子電圧, $\dot{V}_L$ は地絡相の対地電圧 $\dot{V}_a$ である。いま, 図 16 に示したように, $\dot{V}_L=\dot{V}_{a2}$ であったとすると, 零相および各相の対地電圧は $\dot{V}_{02}$, $\dot{V}_{b2}$, $\dot{V}_{c2}$ の値になる。

10. む す び

不平衡三相回路の1線地絡時における、零相電圧や各相対地電圧をベクトル軌跡図に表わす手法を述べた。このベクトル軌跡図は、各相のアドミタンスが分っていれば、従来の計算式でも、電算機に作図させることはできる。しかし、電算機の描いた軌跡図からは、この軌跡が $\dot{V}_{N1}$, $\dot{V}_{N2}$ の二つの円線図を合成した円線図であることや、それぞれの円や半径の中心は分らない。

更に、最初に述べたように、実際の配電系統では、各相の対地アドミタンスを正確に求めることは不可能に近かった。従って、零相電圧や各相対地電圧のベクトル軌跡を作図することはできなかった。

このたび、この作図を可能にし、ベクトル軌跡図を

用いた故障解析の一例について述べたが、更に、系統運用、保護対策にこの手法を利用する研究を進めたい。従って、この点について、是非ご指導、ご意見を賜りたのと思う。

(昭和57年11月12日受付, 同58年8月23日再受付)

文 献

- (1) 大野木:「配電線における断線接地故障の検出」電学誌 74, 1483 (昭 29-12)
- (2) 京藤・鈴木:「円線図法による三相中性点電位の解析」電学誌 74, 1357 (昭 29-11)
- (3) 山田:「交流回路計算法」(昭 22-5) コロナ社
- (4) 岩谷・藤掛・久保木:「配電系統の1線地絡故障に関する新しい解析手法と試験方法の開発」電学論 B 102, 251 (昭57-4)
- (5) 岩谷:「不平衡三相回路1線地絡時における各電圧のベクトル軌跡作図法」昭 57 電気学会関係東北支部連大 No. 2 A 10
- (6) 岩谷:「同上」電力技術研究会資料 (PE-82-42) (昭 57-9)
- (7) 岩谷:「同上」昭 58 電気学会全大 No. 1017