

# 電力回路

第13回目

故障計算

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス

- 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YY結線)

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{pa} \\ \dot{V}_{sa} \\ \dot{V}_{pb} \\ \dot{V}_{sb} \\ \dot{V}_{pc} \\ \dot{V}_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_{pn} \\ \dot{V}_{sn} \\ \dot{V}_{pn} \\ \dot{V}_{sn} \\ \dot{V}_{pn} \\ \dot{V}_{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{pp} & \dot{Z}_{ps} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dot{Z}_{sp} & \dot{Z}_{ss} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{pp} & \dot{Z}_{ps} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{sp} & \dot{Z}_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_{pp} & \dot{Z}_{ps} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Z}_{sp} & \dot{Z}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{pa} \\ \dot{I}_{sa} \\ \dot{I}_{pb} \\ \dot{I}_{sb} \\ \dot{I}_{pc} \\ \dot{I}_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{pa}n_p + \dot{I}_{sa}n_s = 0 \\ \dot{I}_{pb}n_p + \dot{I}_{sb}n_s = 0 \\ \dot{I}_{pc}n_p + \dot{I}_{sc}n_s = 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \dot{Z}_{pp}, \dot{Z}_{ss} \\ \dot{Z}_{ps}, \dot{Z}_{sp} \\ \dot{Z}_{ps} = \dot{Z}_{sp} \end{matrix}$$

$$\dot{V}_{pn} = \dot{Z}_{pn} \dot{I}_{pn} = \dot{Z}_{pn} (\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc})$$

$$\dot{V}_{sn} = \dot{Z}_{sn} \dot{I}_{sn} = \dot{Z}_{sn} (\dot{I}_{sa} + \dot{I}_{sb} + \dot{I}_{sc})$$

1次, 2次巻線の自己インピーダンス

1次, 2次巻線間の相互インピーダンス

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YY結線)
    - 単位法で表す

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{ps} \\ \bar{Z}_{sp} & \bar{Z}_{ss} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \dot{Z}_{pp} \frac{VA_{1\phi Base}}{V_{pPhBase}^2} & \dot{Z}_{ps} \frac{VA_{1\phi Base}}{V_{pPhBase}V_{sPhBase}} \\ \dot{Z}_{sp} \frac{VA_{1\phi Base}}{V_{pPhBase}V_{sPhBase}} & \dot{Z}_{ss} \frac{VA_{1\phi Base}}{V_{sPhBase}^2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{pa} + \bar{I}_{sa} = 0 \\ \bar{I}_{pb} + \bar{I}_{sb} = 0 \\ \bar{I}_{pc} + \bar{I}_{sc} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{V}_{pn} = \bar{Z}_{pn} \bar{I}_{pn} = \bar{Z}_{pn} (\bar{I}_{pa} + \bar{I}_{pb} + \bar{I}_{pc}) \\ \bar{V}_{sn} = \bar{Z}_{sn} \bar{I}_{sn} = \bar{Z}_{sn} (\bar{I}_{sa} + \bar{I}_{sb} + \bar{I}_{sc}) \end{cases}$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YY結線)
    - 対称座標変換

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{p0} \\ \bar{V}_{p1} \\ \bar{V}_{p2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{pn} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{Z}_{pp} \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{bmatrix} + \bar{Z}_{ps} \begin{bmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{V}_{s0} \\ \bar{V}_{s1} \\ \bar{V}_{s2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{sn} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{Z}_{sp} \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{bmatrix} + \bar{Z}_{ss} \begin{bmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{pn} = \bar{Z}_{pn} (\bar{I}_{pa} + \bar{I}_{pb} + \bar{I}_{pc}) = 3\bar{Z}_{pn} \bar{I}_{p0}$$

$$\bar{V}_{sn} = \bar{Z}_{sn} (\bar{I}_{sa} + \bar{I}_{sb} + \bar{I}_{sc}) = 3\bar{Z}_{sn} \bar{I}_{s0}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{pa} \\ \bar{I}_{pb} \\ \bar{I}_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_{sa} \\ \bar{I}_{sb} \\ \bar{I}_{sc} \end{bmatrix} = 0 \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix} = 0$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YY結線)
    - 対称座標表示

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{p0} \\ \bar{V}_{s0} \\ \bar{V}_{p1} \\ \bar{V}_{s1} \\ \bar{V}_{p2} \\ \bar{V}_{s2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{pn} \\ \bar{V}_{sn} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{ps} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{Z}_{sp} & \bar{Z}_{ss} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{ps} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{sp} & \bar{Z}_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{ps} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Z}_{sp} & \bar{Z}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{p2} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{pn} = 3\bar{Z}_{pn}\bar{I}_{p0}$$

$$\bar{V}_{sn} = 3\bar{Z}_{sn}\bar{I}_{s0}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{p0} + \bar{I}_{s0} = 0 \\ \bar{I}_{p1} + \bar{I}_{s1} = 0 \\ \bar{I}_{p2} + \bar{I}_{s2} = 0 \end{cases}$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YΔ結線)
  - 単位法で表す

- 単相の場合

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_p \\ \bar{V}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{ps} \\ \bar{Z}_{sp} & \bar{Z}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_p \\ \bar{I}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{ps} \\ \bar{Z}_{sp} & \bar{Z}_{ss} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \dot{Z}_{pp} \frac{VA_{Base}}{V_{pBase}^2} & \dot{Z}_{ps} \frac{VA_{Base}}{V_{pBase}V_{sBase}} \\ \dot{Z}_{sp} \frac{VA_{Base}}{V_{pBase}V_{sBase}} & \dot{Z}_{ss} \frac{VA_{Base}}{V_{sBase}^2} \end{bmatrix} \bar{I}_p + \bar{I}_s = 0$$

- 三相の場合も同様に

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{pa} \\ \bar{V}_{\Delta a} \\ \bar{V}_{pb} \\ \bar{V}_{\Delta b} \\ \bar{V}_{pc} \\ \bar{V}_{\Delta c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{pn} \\ 0 \\ \bar{V}_{pn} \\ 0 \\ \bar{V}_{pn} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{p\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{Z}_{s\Delta} & \bar{Z}_{\Delta\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{p\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{\Delta p} & \bar{Z}_{\Delta\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{p\Delta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Z}_{\Delta p} & \bar{Z}_{\Delta\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{pa} \\ \bar{I}_{\Delta a} \\ \bar{I}_{pb} \\ \bar{I}_{\Delta b} \\ \bar{I}_{pc} \\ \bar{I}_{\Delta c} \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YΔ結線)
  - 単位法で表す

$$\begin{cases} \bar{I}_{pa} + \bar{I}_{\Delta a} = 0 \\ \bar{I}_{pb} + \bar{I}_{\Delta b} = 0 \\ \bar{I}_{pc} + \bar{I}_{\Delta c} = 0 \end{cases} \quad \bar{V}_{pn} = \bar{Z}_{pn} \bar{I}_{pn} = \bar{Z}_{pn} (\bar{I}_{pa} + \bar{I}_{pb} + \bar{I}_{pc})$$

Δベース

$$\begin{cases} \sqrt{3} \bar{I}_{sa} = \bar{I}_{\Delta c} - \bar{I}_{\Delta b} \\ \sqrt{3} \bar{I}_{sb} = \bar{I}_{\Delta a} - \bar{I}_{\Delta c} \\ \sqrt{3} \bar{I}_{sc} = \bar{I}_{\Delta b} - \bar{I}_{\Delta a} \end{cases} \quad \sqrt{3} \begin{bmatrix} \bar{I}_{sa} \\ \bar{I}_{sb} \\ \bar{I}_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta c} \\ \bar{I}_{\Delta a} \\ \bar{I}_{\Delta b} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta b} \\ \bar{I}_{\Delta c} \\ \bar{I}_{\Delta a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta a} \\ \bar{I}_{\Delta b} \\ \bar{I}_{\Delta c} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{V}_{\Delta a} = \frac{\bar{V}_{sb}}{\sqrt{3}} - \frac{\bar{V}_{sc}}{\sqrt{3}} \\ \bar{V}_{\Delta b} = \frac{\bar{V}_{sc}}{\sqrt{3}} - \frac{\bar{V}_{sa}}{\sqrt{3}} \\ \bar{V}_{\Delta c} = \frac{\bar{V}_{sa}}{\sqrt{3}} - \frac{\bar{V}_{sb}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad \begin{bmatrix} \bar{V}_{\Delta a} \\ \bar{V}_{\Delta b} \\ \bar{V}_{\Delta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \bar{V}_{sb} \\ \bar{V}_{sc} \\ \bar{V}_{sa} \end{bmatrix} - \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \bar{V}_{sc} \\ \bar{V}_{sa} \\ \bar{V}_{sb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{sa} \\ \bar{V}_{sb} \\ \bar{V}_{sc} \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YΔ結線)
    - 対称座標変換

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{p0} \\ \bar{V}_{p1} \\ \bar{V}_{p2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{pn} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{Z}_{pp} \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{bmatrix} + \bar{Z}_{p\Delta} \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta 0} \\ \bar{I}_{\Delta 1} \\ \bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{V}_{\Delta 0} \\ \bar{V}_{\Delta 1} \\ \bar{V}_{\Delta 2} \end{bmatrix} = \bar{Z}_{\Delta p} \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{bmatrix} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta 0} \\ \bar{I}_{\Delta 1} \\ \bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{pn} = \bar{Z}_{pn} (\bar{I}_{pa} + \bar{I}_{pb} + \bar{I}_{pc}) = 3\bar{Z}_{pn} \bar{I}_{p0}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{pa} \\ \bar{I}_{pb} \\ \bar{I}_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta a} \\ \bar{I}_{\Delta b} \\ \bar{I}_{\Delta c} \end{bmatrix} = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{p2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta 0} \\ \bar{I}_{\Delta 1} \\ \bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix} = 0$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YΔ結線)
    - 対称座標変換

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{\Delta 0} \\ \bar{I}_{\Delta 1} \\ \bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ j\bar{I}_{\Delta 1} \\ -j\bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{\Delta 0} \\ \bar{V}_{\Delta 1} \\ \bar{V}_{\Delta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ j\bar{V}_{s1} \\ -j\bar{V}_{s2} \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YΔ結線)
    - 対称座標表示

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{p0} \\ \bar{V}_{\Delta 0} \\ \bar{V}_{p1} \\ \bar{V}_{\Delta 1} \\ \bar{V}_{p2} \\ \bar{V}_{\Delta 2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_{pn} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{p\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{Z}_{s\Delta} & \bar{Z}_{\Delta\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{p\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{\Delta p} & \bar{Z}_{\Delta\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Z}_{pp} & \bar{Z}_{p\Delta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Z}_{\Delta p} & \bar{Z}_{\Delta\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{p0} \\ \bar{I}_{\Delta 0} \\ \bar{I}_{p1} \\ \bar{I}_{\Delta 1} \\ \bar{I}_{p2} \\ \bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{pn} = 3\bar{Z}_{pn}\bar{I}_{p0}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{p0} + \bar{I}_{\Delta 0} = 0 \\ \bar{I}_{p1} + \bar{I}_{\Delta 1} = 0 \\ \bar{I}_{p2} + \bar{I}_{\Delta 2} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{\Delta 0} \\ \bar{V}_{\Delta 1} \\ \bar{V}_{\Delta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ j\bar{V}_{s1} \\ -j\bar{V}_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s0} \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ j\bar{I}_{\Delta 1} \\ -j\bar{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 機器(設備)のインピーダンス
  - 三相変圧器(単相2巻線変圧器×3 YΔ結線)
    - 対称座標表示

$$\begin{aligned}\bar{V}_{p0} - \bar{V}_{pn} - \bar{V}_{\Delta 0} &= \bar{V}_{p0} - 3\bar{Z}_{pn}\bar{I}_{p0} - \bar{V}_{\Delta 0} = \bar{V}_{p0} - 3\bar{Z}_{pn}\bar{I}_{p0} - \bar{V}_{\Delta 0} \\ &= (\bar{Z}_{pp} - \bar{Z}_{p\Delta} - \bar{Z}_{\Delta p} + \bar{Z}_{\Delta\Delta})\bar{I}_{p0} = (\bar{Z}_{pp} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p0}\end{aligned}$$

$$\bar{V}_{p0} - \bar{V}_{\Delta 0} = (\bar{Z}_{pp} + 3\bar{Z}_{pn} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p0}$$

$$\bar{V}_{p1} - \bar{V}_{\Delta 1} = (\bar{Z}_{pp} - \bar{Z}_{p\Delta} - \bar{Z}_{\Delta p} + \bar{Z}_{\Delta\Delta})\bar{I}_{p1} = (\bar{Z}_{pp} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p1}$$

$$\bar{V}_{p2} - \bar{V}_{\Delta 2} = (\bar{Z}_{pp} - \bar{Z}_{p\Delta} - \bar{Z}_{\Delta p} + \bar{Z}_{\Delta\Delta})\bar{I}_{p2} = (\bar{Z}_{pp} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p2}$$

$$\begin{cases} \bar{V}_{p0} = (\bar{Z}_{pp} + 3\bar{Z}_{pn} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p0} \\ \bar{V}_{p1} - \bar{V}_{\Delta 1} = (\bar{Z}_{pp} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p1} \\ \bar{V}_{p2} - \bar{V}_{\Delta 2} = (\bar{Z}_{pp} + \bar{Z}_{\Delta\Delta} - 2\bar{Z}_{p\Delta})\bar{I}_{p2} \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{V}_{s0} = \text{不定} \\ \bar{V}_{s1} = -j\bar{V}_{\Delta 1} \\ \bar{V}_{s2} = j\bar{V}_{\Delta 2} \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{I}_{s0} = 0 \\ \bar{I}_{s1} = j\bar{I}_{\Delta 1} \\ \bar{I}_{s2} = -j\bar{I}_{\Delta 2} \end{cases}$$

# 対称座標による故障計算

- 故障の種類

- 短絡故障

- 落雷, 樹木接触等

- 一線地絡

- 二線地絡

- 三線地絡

- 二線短絡

- 三線短絡

- 断線故障

- 電線・ジャンパ線の切断, 遮断器故障による接点開放

- 一線断線

- 二線断線

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 一線地絡故障(1LG) 無負荷時

- 一相(a相)の端子を接地

- 故障条件

$$\begin{cases} \dot{V}_a = 0 \\ \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0 \quad \text{無負荷} \end{cases}$$

- 故障条件の対称座標表示

但し  $\alpha = \exp(j\frac{2}{3}\pi)$

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 0 \quad \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 = 0$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 = 0 \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 一線地絡故障(1LG) 無負荷時

- 発電機端子電圧電流の対称座標表示

$$\begin{cases} \dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 \\ \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \\ \dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

- 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 + \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 - \dot{Z}_2 \dot{I}_2 = 0$$

$$\begin{cases} \dot{Z}_0 \dot{I}_0 + \dot{Z}_1 \dot{I}_1 + \dot{Z}_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \text{解く}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 一線地絡故障(1LG) 無負荷時

- 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\begin{aligned}\dot{V}_0 &= -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 = \frac{-\dot{Z}_0 \dot{E}_1}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \\ \dot{V}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2) \dot{E}_1}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \\ \dot{V}_2 &= -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 = \frac{-\dot{Z}_2 \dot{E}_1}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}\end{aligned}$$

- 相座標表示

- 故障電流  $\dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{3\dot{E}_1}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$

- 健全相電圧

$$\dot{V}_b = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = \frac{(\alpha^2 - 1)\dot{Z}_0 + (\alpha^2 - \alpha)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 = \frac{(\alpha - 1)\dot{Z}_0 + (\alpha - \alpha^2)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 二線地絡故障(2LG) 無負荷時

- 二相(bc相)の端子が接地

- 故障条件

$$\begin{cases} \dot{V}_b = \dot{V}_c = 0 \\ \dot{I}_a = 0 \end{cases} \quad \text{無負荷}$$

- 故障条件の対称座標表示

但し  $\alpha = \exp(j\frac{2}{3}\pi)$

$$\begin{cases} \dot{V}_b = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = 0 \\ \dot{V}_c = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 = 0 \\ \dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

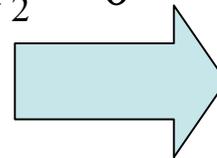
- 二線地絡故障(2LG) 無負荷時

- 発電機端子電圧電流の対称座標表示

$$\begin{cases} \dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 \\ \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \\ \dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

- 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\begin{cases} \dot{V}_b = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 + \alpha^2 (\dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1) - \alpha \dot{Z}_2 \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{V}_c = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 + \alpha (\dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1) - \alpha^2 \dot{Z}_2 \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0 \end{cases}$$



解く

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障
  - 二線地絡故障(2LG) 無負荷時
    - 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 = \frac{\dot{Z}_0 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 \dot{Z}_1 + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_0} \dot{E}_1$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \frac{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 \dot{Z}_1 + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_0} \dot{E}_1 = \frac{\dot{Z}_0 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 \dot{Z}_1 + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_0} \dot{E}_1$$

$$\dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 = \frac{\dot{Z}_0 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 \dot{Z}_1 + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_0} \dot{E}_1$$

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

より対称分の等価回路

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障
  - 二線地絡故障(2LG) 無負荷時
    - 相座標表示

– 健全相電圧

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \frac{\dot{Z}_0\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0\dot{Z}_1 + \dot{Z}_1\dot{Z}_2 + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_1 = \frac{3\dot{Z}_0\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0\dot{Z}_1 + \dot{Z}_1\dot{Z}_2 + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_1$$

– 故障電流

$$\dot{I}_b = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 = \frac{-\dot{Z}_2 + \alpha^2(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2) - \alpha \dot{Z}_0}{\dot{Z}_0\dot{Z}_1 + \dot{Z}_1\dot{Z}_2 + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_1 = \frac{(\alpha^2 - \alpha)\dot{Z}_0 + (\alpha^2 - 1)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0\dot{Z}_1 + \dot{Z}_1\dot{Z}_2 + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_1$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 = \frac{-\dot{Z}_2 + \alpha(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2) - \alpha^2 \dot{Z}_0}{\dot{Z}_0\dot{Z}_1 + \dot{Z}_1\dot{Z}_2 + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_1 = \frac{(\alpha - \alpha^2)\dot{Z}_0 + (\alpha - 1)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0\dot{Z}_1 + \dot{Z}_1\dot{Z}_2 + \dot{Z}_2\dot{Z}_0} \dot{E}_1$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 二線短絡故障(2LS) 無負荷時

- 二相(bc相)の端子が短絡(接地はしない)

- 故障条件

$$\begin{cases} \dot{V}_b = \dot{V}_c \\ \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_b = -\dot{I}_c \end{cases} \quad \text{無負荷}$$

但し  $\alpha = \exp(j\frac{2}{3}\pi)$

- 故障条件の対称座標表示

$$\begin{cases} \dot{V}_b = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = \dot{V}_c = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 \\ \dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0 \\ \dot{I}_b = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 = -\dot{I}_c = -\dot{I}_0 - \alpha \dot{I}_1 - \alpha^2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障
  - 二線短絡故障(2LS) 無負荷時
    - 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$$
$$\dot{I}_0 = 0$$

$$\dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_0 = 0 \quad \text{対称分の等価回路}$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1$$

$$\dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1 \quad \dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障
  - 二線短絡故障(2LS) 無負荷時

- 相座標表示

- 健全相電圧

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 2\dot{V}_1 = \frac{2\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1$$

- 故障相電圧

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = \frac{(\alpha^2 + \alpha)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1 = -\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{E}_1$$

- 故障電流

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 = \frac{(\alpha^2 - \alpha)\dot{E}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 三線短絡故障(3LS)

- 三相(abc相)の端子が短絡(接地はしない)

- 故障条件

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_b = \dot{V}_c \\ \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \quad \text{KCL} \end{cases}$$

但し  $\alpha = \exp(j\frac{2}{3}\pi)$

– 故障条件の対称座標表示

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_b = \dot{V}_c \\ = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 \\ \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \\ = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 + \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 三線短絡故障(3LS) 無負荷時

- 発電機端子電圧電流の対称座標表示

$$\begin{cases} \dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 \\ \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \\ \dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 \end{cases}$$

- 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\dot{V}_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{I}_2 = -\frac{\dot{V}_2}{\dot{Z}_2} = 0$$

$$\dot{I}_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 = 0$$

$$\dot{V}_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \quad \Rightarrow \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1}$$

# 対称座標による故障計算

- 発電機近傍の故障

- 三線短絡故障(3LS) 無負荷時

- 対称座標表示での電圧・電流解を求める

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_1 = \dot{V}_2 = 0 \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_2 = 0 \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{Z_1} \quad \text{対称分の等価回路}$$

- 相座標表示

3LSも3LGも結果は同じ

- 端子電圧

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 0 \\ \dot{V}_b = \dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2 = 0 \\ \dot{V}_c = \dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 = 0 \end{cases}$$

- 端子電流

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1}{Z_1} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 = \alpha^2 \frac{\dot{E}_1}{Z_1} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 = \alpha \frac{\dot{E}_1}{Z_1} \end{cases}$$