電力回路

（舟木担当分）

第3回　対称座標法

平成17年6月13日月曜日　5限目

電力回路授業構成

- 電力システムにおける回路の取り扱い（二回）
  - 電力回路の位置づけ
  - 回路解析の基礎
  - 交流回路解析
  - 多相回路
- 対称座標法（二回）
  - 三相回路と対称回路
- 故障計算（1.5回）
  - 故障の種類
  - 故障回路の対称座標変換
- クラーク座標法（0.5回）

本日の予定　演習課題（引原先生分）の回収

対称座標法

- 三相交流電圧・電流の対称座標変換
  - 相座標系(a,b,c)→対称座標系(0,1,2)

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

但し $\boldsymbol{a} = \exp\left(j\,\tfrac{2}{3}p\right)$

  - 対称座標系(0,1,2) →相座標系(a,b,c)

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

電流も同様

対称座標法

- 電圧・電流以外の諸量の取り扱い
  - インピーダンス
    - 相座標表現

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_a\\\dot{V}_b\\\dot{V}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa}&\dot{Z}_{ab}&\dot{Z}_{ac}\\\dot{Z}_{ba}&\dot{Z}_{bb}&\dot{Z}_{bc}\\\dot{Z}_{ca}&\dot{Z}_{cb}&\dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\\dot{I}_b\\\dot{I}_c\end{bmatrix}$$

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

より

$$\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa}&\dot{Z}_{ab}&\dot{Z}_{ac}\\\dot{Z}_{ba}&\dot{Z}_{bb}&\dot{Z}_{bc}\\\dot{Z}_{ca}&\dot{Z}_{cb}&\dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\\dot{I}_1\\\dot{I}_2\end{bmatrix}$$

対称座標法

- 電圧・電流以外の諸量の取り扱い
  - インピーダンス
    - 相座標形式

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac}\\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc}\\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix}$$

    - 対称座標形式

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02}\\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12}\\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

どないして変換する?

対称座標法

- 電圧・電流以外の諸量の取り扱い
  - インピーダンス

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

より

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

は

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

と表せる

対称座標法

- 電圧・電流以外の諸量の取り扱い
  - インピーダンス

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac}\\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc}\\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac}\\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc}\\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

$$=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac}\\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc}\\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

対称座標法

- インピーダンス行列の扱い

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02}\\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12}\\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02}\\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12}\\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac}\\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc}\\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}$$

  - アドミタンス

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac}\\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc}\\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{bmatrix}\quad\Rightarrow\quad\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Y}_{00} & \dot{Y}_{01} & \dot{Y}_{02}\\ \dot{Y}_{10} & \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12}\\ \dot{Y}_{20} & \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}$$

対称座標法

- 電圧・電流以外の諸量の取り扱い
  - アドミタンス

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac} \\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc} \\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac} \\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc} \\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{00} & \dot{Y}_{01} & \dot{Y}_{02} \\ \dot{Y}_{10} & \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{20} & \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac} \\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc} \\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

対称座標法

- インピーダンス行列の扱い

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02} \\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

- アドミタンス行列の扱い

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{00} & \dot{Y}_{01} & \dot{Y}_{02} \\ \dot{Y}_{10} & \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{20} & \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac} \\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc} \\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

  – ここまででは，対称座標法のメリットが見えん

対称座標法

- 対称座標の利点
  - インピーダンス行列の扱い
    - 送電線路の場合
      - 自己インダクタクス $L_{aa} \cong L_{bb} \cong L_{cc}$
      - 相互インダクタンス $L_{ab} \cong L_{ba} \cong L_{bc} \cong L_{cb} \cong L_{ca} \cong L_{ac}$

      - 相座標系でのインピーダンス行列

$$\dot{Z}_s \equiv \dot{Z}_{aa} \cong \dot{Z}_{bb} \cong \dot{Z}_{cc}$$

$$\dot{Z}_m \equiv \dot{Z}_{ab} \cong \dot{Z}_{ba} \cong \dot{Z}_{bc} \cong \dot{Z}_{cb} \cong \dot{Z}_{ca} \cong \dot{Z}_{ac}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_s & \dot{Z}_m & \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_s & \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_m & \dot{Z}_s \end{bmatrix} \longleftarrow \text{密}$$

対称座標法

- 対称座標の利点
  - インピーダンス行列の扱い
    - 送電線路の場合

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02} \\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{Z}_s & \dot{Z}_m & \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_s & \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_m & \dot{Z}_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m & \dot{Z}_s + \left(a^2 + a\right)\dot{Z}_m & \dot{Z}_s + \left(a + a^2\right)\dot{Z}_m \\ \dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m & a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m & a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m \\ \dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m & a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m & a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m \end{bmatrix}$$

対称座標法

- インピーダンス行列の扱い
  - 送電線路の場合

$$\dot{Z}_{00} = \tfrac{1}{3}\left[\left(\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right) + \left(\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right) + \left(\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right)\right] = \dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{01} &= \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + \left(a^2 + a\right)\dot{Z}_m\right\} + \left\{a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m\right\} + \left\{a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right\}\right] \\ &= \tfrac{1}{3}\left[\left(1 + a^2 + a\right)\dot{Z}_s + \left(a^2 + a + 1 + a + 1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right] = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{02} &= \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + \left(a + a^2\right)\dot{Z}_m\right\} + \left\{a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right\} + \left\{a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m\right\}\right] \\ &= \tfrac{1}{3}\left[\left\{1 + a + a^2\right\}\dot{Z}_s + \left\{a + a^2 + 1 + a^2 + 1 + a\right\}\dot{Z}_m\right] = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{10} &= \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right\} + a\left\{\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right\} + a^2\left\{\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right\}\right] \\ &= \tfrac{1}{3}\left(1 + a + a^2\right)\left(\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right) = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{11} &= \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + \left(a^2 + a\right)\dot{Z}_m\right\} + a\left\{a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m\right\} + a^2\left\{a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right\}\right] \\ &= \tfrac{1}{3}\left[\left(1 + a^3 + a^3\right)\dot{Z}_s + \left(a^2 + a + a + a^2 + a^2 + a^4\right)\dot{Z}_m\right] = \tfrac{1}{3}\left[3\dot{Z}_s - 3\dot{Z}_m\right] = \dot{Z}_s - \dot{Z}_m\end{aligned}$$

対称座標法

- インピーダンス行列の扱い
  - 送電線路の場合

$$\dot{Z}_{12} = \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + \left(a + a^2\right)\dot{Z}_m\right\} + a\left\{a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right\} + a^2\left\{a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m\right\}\right]$$
$$= \tfrac{1}{3}\left[\left(1 + a^2 + a^4\right)\dot{Z}_s + \left(a + a^2 + 1 + a^2 + 1 + a\right)\dot{Z}_m\right] = 0$$

$$\dot{Z}_{20} = \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right\} + a^2\left\{\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right\} + a\left\{\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right\}\right]$$
$$= \tfrac{1}{3}\left(1 + a^2 + a\right)\left(\dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m\right) = 0$$

$$\dot{Z}_{21} = \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + \left(a^2 + a\right)\dot{Z}_m\right\} + a^2\left\{a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m\right\} + a\left\{a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right\}\right]$$
$$= \tfrac{1}{3}\left[\left(1 + a^4 + a^2\right)\dot{Z}_s + \left(a^2 + a + a^2 + a^3 + a + a^3\right)\dot{Z}_m\right] = 0$$

$$\dot{Z}_{22} = \tfrac{1}{3}\left[\left\{\dot{Z}_s + \left(a + a^2\right)\dot{Z}_m\right\} + a^2\left\{a\dot{Z}_s + \left(1 + a^2\right)\dot{Z}_m\right\} + a\left\{a^2\dot{Z}_s + \left(1 + a\right)\dot{Z}_m\right\}\right]$$
$$= \tfrac{1}{3}\left[\left(1 + a^3 + a^3\right)\dot{Z}_s + \left(a + a^2 + a^2 + a^4 + a + a^2\right)\dot{Z}_m\right] = \tfrac{1}{3}\left[3\dot{Z}_s - 3\dot{Z}_m\right] = \dot{Z}_s - \dot{Z}_m$$

対称座標法

- インピーダンス行列の扱い
  - 送電線路の場合
    - 送電線インピーダンスの対称座標表示

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02} \\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_s - \dot{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_s - \dot{Z}_m \end{bmatrix}$$

    - インピーダンスの対称座標成分は対角項のみ
    - 零相, 正相, 逆相が互いに干渉しない
    - アドミタンスでも同様

対称座標法

- インピーダンス行列の扱い
  - 送電線路の場合

$$\begin{cases} \dot{Z}_0 = \dot{Z}_s + 2\dot{Z}_m \\ \dot{Z}_1 = \dot{Z}_s - \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_2 = \dot{Z}_s - \dot{Z}_m \end{cases} \qquad \dot{Z}_0 > \dot{Z}_1 = \dot{Z}_2$$

    - 対称分の各相を独立に表現可能　絵
      - 零相回路　$\dot{V}_0 = \dot{Z}_0 \dot{I}_0$
      - 正相回路　$\dot{V}_1 = \dot{Z}_1 \dot{I}_1$
      - 逆相回路　$\dot{V}_2 = \dot{Z}_2 \dot{I}_2$
        - » 送電線の回路が簡単に描けるようになったでぇ

対称座標法

- 電力回路で用いる機器の対称座標表示
  - 負荷
    - 三相平衡な場合

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac}\\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc}\\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_s & \dot{Z}_m & \dot{Z}_m\\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_s & \dot{Z}_m\\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_m & \dot{Z}_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix}$$

      - 対称座標表示

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02}\\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12}\\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{Z}_s+2\dot{Z}_m & 0 & 0\\ 0 & \dot{Z}_s-\dot{Z}_m & 0\\ 0 & 0 & \dot{Z}_s-\dot{Z}_m\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

不平衡な場合は→密になる

対称座標法

- 電力回路で用いる機器の対称座標表示
  - 発電機
    - 回路図
    - 三相平衡な内部電圧源を持つ
    - 三相平衡な内部インピーダンスを持つ
    - 接地インピーダンス $\dot{Z}_n$ で中性点接地されている

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_n \\ \dot{V}_n \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_s & \dot{Z}_m & \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_s & \dot{Z}_m \\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_m & \dot{Z}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

対称座標法

– 発電機

- 内部起電力

$$\begin{cases}\dot{E}_a = \dot{E} \\ \dot{E}_b = a^2\dot{E} \\ \dot{E}_c = a\dot{E}\end{cases} \qquad \begin{bmatrix}\dot{E}_0 \\ \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2\end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c\end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E} \\ a^2\dot{E} \\ a\dot{E}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 \\ \dot{E} \\ 0\end{bmatrix}$$

- 中性点電圧

$$\dot{V}_n = \dot{Z}_n\left(-\dot{I}_a - \dot{I}_b - \dot{I}_c\right) = \dot{Z}_n\left(-3\dot{I}_0\right)$$

- 出力電圧・電流

$$\left[\dot{V}_a \dot{V}_b \dot{V}_c\right] \Rightarrow \left[\dot{V}_0 \dot{V}_1 \dot{V}_2\right] \qquad \left[\dot{I}_a \dot{I}_b \dot{I}_c\right] \Rightarrow \left[\dot{I}_0 \dot{I}_1 \dot{I}_2\right]$$

$$\begin{bmatrix}0 \\ \dot{E} \\ 0\end{bmatrix} - 3\begin{bmatrix}\dot{Z}_n\dot{I}_0 \\ 0 \\ 0\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dot{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$ 零・正・逆相別の回路図

対称座標法

- 電力回路で用いる機器の対称座標表示
  - 変圧器
    - 単相変圧器
      - 等価回路図
        - » 漏れインピーダンス
        - » 励磁インピーダンス
      - 単位法により変圧器によって基準電圧が変わっても容易に取扱い可能
    - 三相変圧器
      - 結線方式
        - » YΔ
        - » ΔΔ
        - » YY（Δ）

対称座標法

- 電力回路で用いる機器の対称座標表示
  - 変圧器
    - Δ結線の扱い
      - 線間電圧の取扱い

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{ab}\\ \dot{V}_{bc}\\ \dot{V}_{ca}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{V}_{a}\\ \dot{V}_{b}\\ \dot{V}_{c}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\dot{V}_{b}\\ \dot{V}_{c}\\ \dot{V}_{a}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{a}\\ \dot{V}_{b}\\ \dot{V}_{c}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{a}\\ \dot{V}_{b}\\ \dot{V}_{c}\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}1&-1&0\\0&1&-1\\-1&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{a}\\ \dot{V}_{b}\\ \dot{V}_{c}\end{bmatrix}$$

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

なので
逆変換
は無い

対称座標法

– 変圧器
  - Δ結線の扱い
    – 線間電圧の対称座標表示

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{\Delta 0}\\ \dot{V}_{\Delta 1}\\ \dot{V}_{\Delta 2}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{ab}\\ \dot{V}_{bc}\\ \dot{V}_{ca}\end{bmatrix}$$

但し $a=\exp\left(j\frac{2}{3}p\right)$

$$=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & -1 & 0\\ 0 & 1 & -1\\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{a}\\ \dot{V}_{b}\\ \dot{V}_{c}\end{bmatrix}$$

$$=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & -1 & 0\\ 0 & 1 & -1\\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{0}\\ \dot{V}_{1}\\ \dot{V}_{2}\end{bmatrix}$$

対称座標法

– 変圧器

- Δ結線の扱い
  - 線間電圧の対称座標表示のつづき

但し $a = \exp\left(j\frac{2}{3}p\right)$

$$
\begin{bmatrix}\dot{V}_{\Delta 0}\\ \dot{V}_{\Delta 1}\\ \dot{V}_{\Delta 2}\end{bmatrix}
=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}0 & 1-a^2 & 1-a\\ 0 & a^2-a & a-a^2\\ 0 & -1+a & -1+a^2\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}
$$

$$
=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}0 & 1-a^2+a^2-a-1+a & 1-a+a-a^2-1+a^2\\ 0 & 1-a^2+a^3-a^2-a^2+a^3 & 1-a+a^2-a^3-a^2+a^4\\ 0 & 1-a^2+a^4-a^3-a+a^2 & 1-a+a^3-a^4-a+a^3\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}
$$

$$
=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 3-3a^2 & 0\\ 0 & 0 & 3-3a\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}
=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 1-a^2 & 0\\ 0 & 0 & 1-a\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}
$$

対称座標法

– 変圧器

- Δ結線の扱い
  - 線間電圧の対称座標表示のさいご

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{\Delta 0}\\ \dot{V}_{\Delta 1}\\ \dot{V}_{\Delta 2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 1-a^2 & 0\\ 0 & 0 & 1-a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{bmatrix}$$

但し $a = \exp\left(j\frac{2}{3}\pi\right)$

不可逆変換

» 零相電圧 → ０

$$\dot{V}_{\Delta 0}=\dot{V}_0$$

» 正相電圧 → 相電圧を√3倍し, 位相をπ/6進めた

$$\dot{V}_{\Delta 1}=\left(1-a^2\right)\dot{V}_1=\left(1+\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\dot{V}_1=\sqrt{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}+j\frac{1}{2}\right)\dot{V}_1=\sqrt{3}\exp\left(j\frac{\pi}{6}\right)\dot{V}_1$$

» 逆相電圧 → 相電圧を√3倍し, 位相をπ/6遅らせた

$$\dot{V}_{\Delta 2}=\left(1-a\right)\dot{V}_2=\left(1+\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\dot{V}_2=\sqrt{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}-j\frac{1}{2}\right)\dot{V}_2=\sqrt{3}\exp\left(-j\frac{\pi}{6}\right)\dot{V}_2$$

対称座標法

- 変圧器
  - Δ結線の扱い
    - 端子電流について
      - » 回路図

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix}$$

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

なので逆変換は無く，端子電流から巻線電流は一意に定まらない

対称座標法

– 変圧器
  - Δ結線の扱い
    – 端子電流についてつづき
      » 電圧と同様に端子電流・巻線電流を対称座標表示

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

但し $a = \exp\left(j\frac{2}{3}p\right)$

$$= \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_{\Delta 0} \\ \dot{I}_{\Delta 1} \\ \dot{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

対称座標法

– 変圧器
  - Δ結線の扱い
    – 端子電流についてつづきのつづき
      » 続電圧と同様に端子電流・巻線電流を対称座標表示

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_0\\ \dot{I}_1\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0&1-a&1-a^2\\0&-1+a^2&-1+a\\0&-a^2+a&-a+a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{\Delta 0}\\ \dot{I}_{\Delta 1}\\ \dot{I}_{\Delta 2}\end{bmatrix}$$

但し $a=\exp\left(j\frac{2}{3}p\right)$

$$=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}0&1-a-1+a^2-a^2+a&1-a^2-1+a-a+a^2\\0&1-a-a+a^3-a^4+a^3&1-a^2-a+a^2-a^3+a^4\\0&1-a-a^2+a^4-a^3+a^2&1-a^2-a^2+a^3-a^2+a^3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{\Delta 0}\\ \dot{I}_{\Delta 1}\\ \dot{I}_{\Delta 2}\end{bmatrix}$$

$$=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}0&0&0\\0&3-3a&0\\0&0&3-3a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{\Delta 0}\\ \dot{I}_{\Delta 1}\\ \dot{I}_{\Delta 2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&1-a&0\\0&0&1-a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{\Delta 0}\\ \dot{I}_{\Delta 1}\\ \dot{I}_{\Delta 2}\end{bmatrix}$$

対称座標法

– 変圧器
  - Δ結線の扱い
    – 端子電流についてのおわり
      » 端子電流の対称座標表示

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-a & 0 \\ 0 & 0 & 1-a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{\Delta 0} \\ \dot{I}_{\Delta 1} \\ \dot{I}_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

但し $a = \exp\left(j \frac{2}{3} p\right)$

不可逆変換

      » 端子電流に零相電流は流れない

対称座標法

– 変圧器
  - YΔ結線変圧器
    – 相座標系での回路方程式 絵
      » 一次巻線側 KVL

$$\begin{cases} \dot{V}_{pa} = \dot{E}_{pa} + \dot{Z}_p \dot{I}_{pa} + \dot{Z}_n\left(\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc}\right) \\ \dot{V}_{pb} = \dot{E}_{pb} + \dot{Z}_p \dot{I}_{pb} + \dot{Z}_n\left(\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc}\right) \\ \dot{V}_{pc} = \dot{E}_{pc} + \dot{Z}_p \dot{I}_{pc} + \dot{Z}_n\left(\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc}\right) \end{cases}$$

      » 二次巻線側 KCL

$$\begin{cases} \dot{I}_{sa} = \dot{I}_{sba} - \dot{I}_{sac} = \frac{1}{n}\left(\dot{I}_{pa} - \dot{I}_{pc}\right) \\ \dot{I}_{sb} = \dot{I}_{scb} - \dot{I}_{sba} = \frac{1}{n}\left(\dot{I}_{pb} - \dot{I}_{pa}\right) \\ \dot{I}_{sc} = \dot{I}_{sac} - \dot{I}_{scb} = \frac{1}{n}\left(\dot{I}_{pc} - \dot{I}_{pb}\right) \end{cases}$$

対称座標法

– 変圧器

- ＹΔ結線変圧器
  - 相座標系での回路方程式
    - » 二次巻線側　KVL

$$
\begin{cases}
\dot{V}_{sab} = \dot{E}_{sab} - \dot{Z}_s \dot{I}_{sba} = n\dot{E}_{pa} - \dot{Z}_s \frac{1}{n} \dot{I}_{pa} \\
\dot{V}_{sbc} = \dot{E}_{sbc} - \dot{Z}_s \dot{I}_{scb} = n\dot{E}_{pb} - \dot{Z}_s \frac{1}{n} \dot{I}_{pb} \\
\dot{V}_{sca} = \dot{E}_{sca} - \dot{Z}_s \dot{I}_{sac} = n\dot{E}_{pc} - \dot{Z}_s \frac{1}{n} \dot{I}_{pc}
\end{cases}
$$

$$
\Rightarrow
\begin{cases}
\dot{E}_{pa} = \frac{1}{n}\dot{V}_{sab} + \dot{Z}_s \frac{1}{n^2} \dot{I}_{pa} \\
\dot{E}_{pb} = \frac{1}{n}\dot{V}_{sbc} + \dot{Z}_s \frac{1}{n^2} \dot{I}_{pb} \\
\dot{E}_{pc} = \frac{1}{n}\dot{V}_{sca} + \dot{Z}_s \frac{1}{n^2} \dot{I}_{pc}
\end{cases}
\Rightarrow
$$

一次側に代入

対称座標法

– 変圧器
  - YΔ結線変圧器
    – 相座標系での回路方程式
      » 一次巻線側　KVL

$$\begin{cases}\dot{V}_{pa} = \frac{1}{n}\dot{V}_{sab} + \dot{Z}_s\frac{1}{n^2}\dot{I}_{pa} + \dot{Z}_p\dot{I}_{pa} + \dot{Z}_n\left(\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc}\right) \\ \dot{V}_{pb} = \frac{1}{n}\dot{V}_{sbc} + \dot{Z}_s\frac{1}{n^2}\dot{I}_{pb} + \dot{Z}_p\dot{I}_{pb} + \dot{Z}_n\left(\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc}\right) \\ \dot{V}_{pc} = \frac{1}{n}\dot{V}_{sca} + \dot{Z}_s\frac{1}{n^2}\dot{I}_{pc} + \dot{Z}_p\dot{I}_{pc} + \dot{Z}_n\left(\dot{I}_{pa} + \dot{I}_{pb} + \dot{I}_{pc}\right)\end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix}\dot{V}_{pa} \\ \dot{V}_{pb} \\ \dot{V}_{pc}\end{bmatrix} = \frac{1}{n}\begin{bmatrix}\dot{V}_{sab} \\ \dot{V}_{sbc} \\ \dot{V}_{sca}\end{bmatrix} + \left(\dot{Z}_s\frac{1}{n^2} + \dot{Z}_p\right)\begin{bmatrix}\dot{I}_{pa} \\ \dot{I}_{pb} \\ \dot{I}_{pc}\end{bmatrix} + \dot{Z}_n\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{pa} \\ \dot{I}_{pb} \\ \dot{I}_{pc}\end{bmatrix}$$

対称座標法

– 変圧器
  - YΔ結線変圧器
    – 対称座標変換する

但し $a=\exp\left(j\frac{2}{3}p\right)$　$T=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}$

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{pa}\\ \dot{V}_{pb}\\ \dot{V}_{pc}\end{bmatrix}=T\begin{bmatrix}\dot{V}_{p0}\\ \dot{V}_{p1}\\ \dot{V}_{p2}\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}\dot{V}_{sab}\\ \dot{V}_{sbc}\\ \dot{V}_{sca}\end{bmatrix}=T\begin{bmatrix}\dot{V}_{\Delta s0}\\ \dot{V}_{\Delta s1}\\ \dot{V}_{\Delta s2}\end{bmatrix}=T\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 1-a & 0\\ 0 & 0 & 1-a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{s0}\\ \dot{V}_{s1}\\ \dot{V}_{s2}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_{pa}\\ \dot{I}_{pb}\\ \dot{I}_{pc}\end{bmatrix}=T\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\ \dot{I}_{p1}\\ \dot{I}_{p2}\end{bmatrix}\quad\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{pa}\\ \dot{I}_{pb}\\ \dot{I}_{pc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}T\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\ \dot{I}_{p1}\\ \dot{I}_{p2}\end{bmatrix}=3\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\ \dot{I}_{p1}\\ \dot{I}_{p2}\end{bmatrix}$$

より

対称座標法

– 変圧器

- Y Δ 結線変圧器　　但し　$a = \exp\left(j\tfrac{2}{3}\pi\right)$
  - 対称座標変換する

$$T\begin{bmatrix}\dot{V}_{p0}\\\dot{V}_{p1}\\\dot{V}_{p2}\end{bmatrix} = \tfrac{1}{n}T\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\0 & 1-a & 0\\0 & 0 & 1-a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{s0}\\\dot{V}_{s1}\\\dot{V}_{s2}\end{bmatrix} + \left(\dot{Z}_s\tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p\right)T\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\\dot{I}_{p1}\\\dot{I}_{p2}\end{bmatrix} + \dot{Z}_n 3\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\1 & 0 & 0\\1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\\dot{I}_{p1}\\\dot{I}_{p2}\end{bmatrix}$$

» 両辺にT^{-1}を左から掛けて

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{p0}\\\dot{V}_{p1}\\\dot{V}_{p2}\end{bmatrix} = \tfrac{1}{n}\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\0 & 1-a & 0\\0 & 0 & 1-a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_{s0}\\\dot{V}_{s1}\\\dot{V}_{s2}\end{bmatrix} + \left(\dot{Z}_s\tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p\right)\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\\dot{I}_{p1}\\\dot{I}_{p2}\end{bmatrix} + \dot{Z}_n 3T^{-1}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\1 & 0 & 0\\1 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{p0}\\\dot{I}_{p1}\\\dot{I}_{p2}\end{bmatrix}$$

対称座標法

– 変圧器

- YΔ結線変圧器　　但し　$a = \exp\left(j \tfrac{2}{3} p\right)$

  – 対称座標変換する

$$T^{-1}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

より

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{p0} \\ \dot{V}_{p1} \\ \dot{V}_{p2} \end{bmatrix} = \tfrac{1}{n}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-a & 0 \\ 0 & 0 & 1-a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{V}_{s0} \\ \dot{V}_{s1} \\ \dot{V}_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Z}_s \tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p + 3\dot{Z}_n & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_s \tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_s \tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_{p0} \\ \dot{I}_{p1} \\ \dot{I}_{p2} \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}_{p0} = \left(\dot{Z}_s \tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p + 3\dot{Z}_n\right)\dot{I}_{p0}$$

$$\dot{V}_{p1} = \tfrac{1}{n}\left(1-a\right)\dot{V}_{s1} + \left(\dot{Z}_s \tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p\right)\dot{I}_{p1}$$

$$\dot{V}_{p2} = \tfrac{1}{n}\left(1-a^2\right)\dot{V}_{s2} + \left(\dot{Z}_s \tfrac{1}{n^2} + \dot{Z}_p\right)\dot{I}_{p2}$$

$\Rightarrow$ 各対称成分に分離

等価回路図