

相座標界를 利用한 大平衡 電力系統의 解析方法

申明澈 · 金武雄
(成均館大 教授) (大林工專 教授)

차

레

1. 序 論
2. 相座標界 理論
 - 2.1 同期機의 相座標界 表現
 - 2.2 送電線路의 相座標界 表現
 - 2.3 變壓器의 相座標界 表現
 - 2.4 電力系統의 相座標界 表現
3. 故障解析에의 適用
 - 3.1 一線地絡 故障
 - 3.2 線間短絡 故障
4. 結 論

參考文獻

1. 序 論

電力系統은 平常運轉時에 一般적으로 平衡三相回路이며, 이때 各相의 電壓과 電流를 구하는 方法은 3 相交流理論을 적용하여 單相回路로 계산하는 方法을 利用하고 있다.

그러나 不平衡인 故障등의 異常現狀에서는 3 相交流理論을 적용하여 單相回路로 풀기에는 매우 곤란하며 복잡하다. 이에 대하여 1918年 C. L. Fortescue가 提案한 對稱座標法을 利用하여 不平衡電力系統을 零相, 正相 逆相의 對稱分으로 分解하고 그 各 성분마다 平衡시킨 後에 計算하는 方法을 채택하여 많은 도움이 되었다. 이 對稱座標法을 利用하는 方法은 不平衡三相回路의 電壓과 電流를 零相, 正相, 逆相分으로 完全히 分離하여 이들의 各 等價回路에서 未知의 電壓, 電流를 구한 後 그 結果를 合算하여 실제의 電壓과 電流를 구하는 것이다. 그러나 現在의 電力系統은 多樣한 電氣器機 負荷等이 使用되므로 다음과 같은

- 1) 燃架되지 않은 線路에서의 線路임피던스, 어드미턴스가 不平衡인 경우
- 2) 變壓器의 구성이 對稱이 아닌 경우
- 3) 교류 직류 變換器가 存在하는 경우
- 4) 系統의 負荷가 不平衡인 경우
- 5) 系統內가 多重 不平衡故障이 發生하는 경우

는 對稱分이 分離되지 않고 各相 定數가 不平衡이 되므로 計算이 매우 復雜하게 된다. 그러므로 對稱座標法의 이용에 고려해야 할 點은 對稱分間의 分離와 故障點의 各相 定數가 完全히 平衡된 경우에만 可能하다는 것이다. 또한 E. Clarke가 提案한 Clarke座標法도 各相의 電壓과 電流를 $\alpha\beta\theta$ 의 3 가지 성분으로 分解하여 $\alpha\beta\theta$ 성분을 구한 후 이 성분들을 利用하여 실제의 相의 電壓과 電流를 구하였고 이 方法으로 故障點에서 本 正相임피던스 Z_1 과 逆相 임피던스 Z_2 가 동등한 경우에는 $\alpha\beta\theta$ 성분의 等價回路가

完全히 分離되어 對稱座標法의 對稱分과 同一하게 취급할 수 있다.

그러므로 위에서 열거한 5 가지 경우에서는 1968年 M. A. Laughton이 提示한 相座標界를 적용하므로 解析이 簡單하여 Digital Computer의 利用에 더욱 도움이 된다.

따라서 本 論考에서는 相座標界를 活用하여 電力系統의 各要素들을 等價化시켜 解析기법을 소개하고 不平衡電力系統解析에 相座標界를 活用하는 方法에 대해서 살펴보기로 하겠다.

2. 相座標界의 理論

相座標界의 理論은 不平衡系統의 各相의 電壓과 電流를 對稱分으로 分解하지 않고 그 값을 그대로 利用하여 직접 方法式을 作成하고 解를 구하는 方法이다. 電力系統의 故障解析에 널리 利用되는 故障計算法의 過程을 圖表形式으로 表示하면 그림 1과 같다.

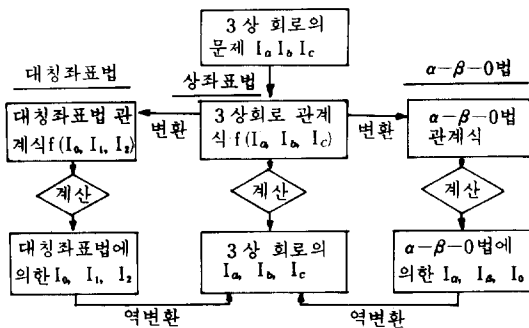


그림 1. 고장계산법들의 변환과정

相座標界에서 電力系統을 構成하는 同期機, 送電線, 變壓器 및 各負荷에 對한 모든 要素의 電壓, 電流의 關係式을 相座標界로 表現해 보자.

2.1 同期機의 相座標界 表現

同期機의 電壓, 電流의 關係式을 유도해 보자. 同期機의 基本式을 對稱座標界로 表現하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

지금 電壓, 電流의 對稱分에서 相座標로 變換하면 變換行列[T]를

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$a = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = -0.5 - j0.866$$

$$[T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} [T]^* \quad (2)$$

(단 [T]*는 [T]의 공액行列이다)

이라하고

이 變換行列 [T]를 (1)式의 양변에 곱하면 다음과 같은 式이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_f \\ a^2 E_f \\ a E_f \end{bmatrix} - [\dot{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 임피던스 行列 [Z_{abc}]은

$$[\dot{Z}_{abc}] = [T] \begin{bmatrix} \dot{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2 \end{bmatrix} [T]^{-1}$$

$$= \frac{1}{3} [T] \begin{bmatrix} \dot{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_2 \end{bmatrix} [T]^* \quad (4)$$

와 같이 된다. 임피던스 行列 [Z_{abc}]에서는 各相間의 결합임피던스가 存在한다. 지금 a, b, c, 相卷線의 兩端子 電壓을 各各 V'_a, V'_b, V'_c, V''_a, V''_b, V''_c 라고 하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}'_a - \dot{V}''_a \\ \dot{V}_b &= \dot{V}'_b - \dot{V}''_b \\ \dot{V}_c &= \dot{V}'_c - \dot{V}''_c \end{aligned} \quad (5)$$

로 되고 起電力 $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 는

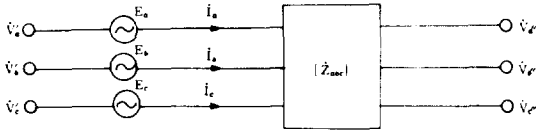


그림 2. 三相同期機의 等價回路

$$\dot{E}_a = E_f, \dot{E}_b = a^2 E_f, \dot{E}_c = a E_f \quad (6)$$

에서 各相에 平衡한 三相起電力이다. (3)式에서 同期機의 等價回路를 表現하면 그림 2 와 같다.

2.2 送電線路의 相座標界 表現

그림 3 과 같은 燃架되지 않은 三相 1 회선 送電線路에 對한 相座標界 表現은 (7)式으로 表現된다.

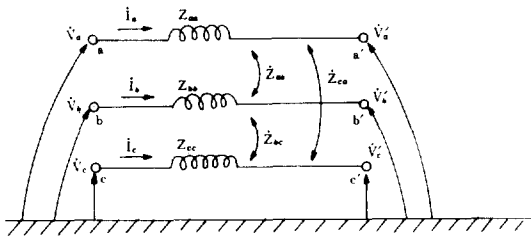


그림 3. 연가(燃架)되지 않은 三相送電線路

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}'_a \\ \dot{V}'_b \\ \dot{V}'_c \end{bmatrix} + [\dot{Z}_{abc}] \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 임피던스行列 $[\dot{Z}_{abc}]$ 은

$$[\dot{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 주어진다. 이 임피던스行列은 對稱行列이며 여기서 行列의 要素

$$\dot{Z}_{ji} = \dot{Z}_{ij}$$

로 되고 一般的으로

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{aa} &= \dot{Z}_{bb} = \dot{Z}_{cc} = \dot{Z}_{aa} \\ \dot{Z}_{ab} &= \dot{Z}_{bc} = \dot{Z}_{ca} = \dot{Z}_{ab} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

이다.

a-b-c 相座標와 0-1-2 對稱座標 사이의 變換行列 $\frac{1}{3} [T]^*$ 을 (7) 式에 곱하면

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}'_0 \\ \dot{V}'_1 \\ \dot{V}'_2 \end{bmatrix} + [\dot{Z}_{012}] \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이고

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} [T]^* \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} [T]^* \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} [\dot{Z}_{012}] &= \begin{bmatrix} \dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02} \\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} [T]^* [\dot{Z}_{abc}] [T] \end{aligned} \quad (12)$$

이다.

(10) 式에서 알 수 있는 바와 같이 \dot{V}_0 는

$$\dot{V}_0 = \dot{V}'_0 + \dot{Z}_{00} \dot{I}_0 + \dot{Z}_{01} \dot{I}_1 + \dot{Z}_{02} \dot{I}_2 \quad (13)$$

와 같이 되므로 '零相回路의 電壓分은 零相回路의 電流뿐만 아니라 正相回路, 逆相回路의 電流 \dot{I}_1, \dot{I}_2 의 영향을 받게 된다.

따라서 零相, 正相, 逆相回路는 서로 分離되지 않고 서로 연관되어 있다.

對稱分 回路가 서로 分離되어지기 위해서는 $[\dot{Z}_{012}]$ 의 非對角線 要素가 모두 0 으로 되어야만 線路定數가 平衡되고

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_{aa} &= \dot{Z}_{bb} = \dot{Z}_{cc} \\ \dot{Z}_{ab} &= \dot{Z}_{bc} = \dot{Z}_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

의 관계가 成立된다.

그러므로 (14) 式은 送電線路가 完全히 연가되어 있는 경우에 成立된다.

이상은 線路의 直列임피던스에 관해서 既述했지만 竝列어드미턴스 $[\dot{Y}_{abc}]$

$$[\dot{Y}_{abc}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac} \\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc} \\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

에 대해서도

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} = \dot{Y}_{bb} = \dot{Y}_{cc} \\ \dot{Y}_{ab} = \dot{Y}_{bc} = \dot{Y}_{ca} \end{bmatrix} \quad (16)$$

로 되는 조건만 完全히 對稱分回路가 分離되고 이 外에는 相사이에 相互結合이 發生하여 對稱分回路가 分離되지 않는다. 이와 같이 撚架되지 않은 送電線路의 兩端의 電壓이 平衡三相電壓이라도 흐르는 電流에 零相分, 逆相分이 있으면 線路兩端의 電壓은 零相, 逆相分을 포함하여 電壓은 不平衡이 된다.

2.3 變壓器의 相座標界 表現

變壓器에 관해서는 간단하게 하기 위하여 勵磁임피던스를 무한대로 하고 그림 4에 表示한 바와 같이 單相變壓器의 相座標공간에 있어서 一般等價回路를 誘導 할 수 있다.

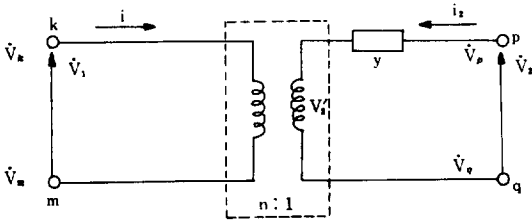


그림 4. 단위法으로 表示한 單相理想變壓器

理想變壓器에 대한 關係式으로부터

$$\dot{V}_1 = n\dot{V}'_2 \quad (17)$$

$$i_2 = -ni_1 \quad (18)$$

$$i_2 = \dot{y}(\dot{V}_2 - \dot{V}'_2) \quad (19)$$

여기서 k, m, p, q는 變壓器의 마디(node)로 表示하고 對地接續은 없는 것으로 가정한다.

지금 어느 基準電位에서 測定한 1次側, 2次側의 各端子의 電位를 $\dot{V}_k, \dot{V}_m, \dot{V}_p, \dot{V}_q$ 이라고 하면,

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_k - \dot{V}_m \\ \dot{V}_2 &= \dot{V}_p - \dot{V}_q \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

로 되며 (17)~(19) 式에서

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= \dot{y} \left(\dot{V}_2 - \frac{\dot{V}_1}{n} \right) \\ I_k = i_1 &= -\frac{1}{n} i_2 = -\frac{\dot{y}}{n} \left(\dot{V}_2 - \frac{\dot{V}_1}{n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

로 되고

(21)式에서 各端子로 흘러 들어가는 電流 $\dot{I}_k, \dot{I}_m, \dot{I}_p$ 및 \dot{I}_q 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_k &= -\dot{y} \left[\frac{1}{n} \dot{V}_2 - \frac{1}{n^2} \dot{V}_1 \right] \\ &= -\dot{y} \left[\frac{1}{n} (\dot{V}_p - \dot{V}_q) - \frac{1}{n^2} (\dot{V}_k - \dot{V}_m) \right] \\ &= +\frac{\dot{y}}{n^2} \dot{V}_k - \frac{\dot{y}}{n^2} \dot{V}_m - \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_p + \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_q \\ \dot{I}_m &= -\dot{I}_k = \frac{-\dot{y}}{n^2} \dot{V}_k + \frac{\dot{y}}{n^2} \dot{V}_m + \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_p - \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_q \\ \dot{I}_p &= \dot{y} (\dot{V}_2 - \dot{V}'_2) \\ &= \dot{y} (\dot{V}_2 - \frac{1}{n} \dot{V}_1) \\ &= \dot{y} \left[\dot{V}_p - \dot{V}_q - \frac{1}{n} (\dot{V}_k - \dot{V}_m) \right] \\ &= -\frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_k + \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_m + \dot{y} \dot{V}_p - \dot{y} \dot{V}_q \\ \dot{I}_q &= -\dot{I}_p = \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_k - \frac{\dot{y}}{n} \dot{V}_m - \dot{y} \dot{V}_p + \dot{y} \dot{V}_q \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

(22)式을 行列로 表示하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_k \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_p \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{y}}{n} & -\frac{\dot{y}}{n^2} & -\frac{\dot{y}}{n} & \frac{\dot{y}}{n} \\ -\frac{\dot{y}}{n^2} & \frac{\dot{y}}{n^2} & \frac{\dot{y}}{n} & -\frac{\dot{y}}{n} \\ -\frac{\dot{y}}{n} & \frac{\dot{y}}{n} & \dot{y} & -\dot{y} \\ \frac{\dot{y}}{n} & -\frac{\dot{y}}{n} & -\dot{y} & \dot{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_k \\ \dot{V}_m \\ \dot{V}_p \\ \dot{V}_q \end{bmatrix} \quad (23)$$

윗式의 어드미턴스行列은 對稱行列이다.

(22)式을 간단하게 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$[\dot{I}_{kmpq}] = [\dot{Y}_{kmpq}] [\dot{V}_{kmpq}] \quad (24)$$

여기서

$$[\dot{i}_{km\rho q}] = \begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{i}_m \\ \dot{i}_\rho \\ \dot{i}_q \end{bmatrix}, \quad [\dot{V}_{km\rho q}] = \begin{bmatrix} \dot{V}_k \\ \dot{V}_m \\ \dot{V}_\rho \\ \dot{V}_q \end{bmatrix}$$

$$[\dot{Y}_{km\rho q}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{kk} & \dot{Y}_{km} & \dot{Y}_{k\rho} & \dot{Y}_{kq} \\ \dot{Y}_{mk} & \dot{Y}_{mm} & \dot{Y}_{m\rho} & \dot{Y}_{mq} \\ \dot{Y}_{\rho k} & \dot{Y}_{\rho m} & \dot{Y}_{\rho\rho} & \dot{Y}_{\rho q} \\ \dot{Y}_{qk} & \dot{Y}_{qm} & \dot{Y}_{q\rho} & \dot{Y}_{qq} \end{bmatrix} \quad (25)$$

(단, $\dot{Y}_{kk} = \dot{Y}_{mm}$, $\dot{Y}_{\rho\rho} = \dot{Y}_{qq}$, $\dot{Y}_{km} = \dot{Y}_{mk}$)

$$\dot{Y}_{kk} = \frac{+\dot{y}}{n^2}, \quad \dot{Y}_{km} = \dot{Y}_{mk} = \frac{-\dot{y}}{n^2}, \quad \dot{Y}_{k\rho} = \dot{Y}_{\rho k}$$

$$= \frac{-\dot{y}}{n}, \quad \dot{Y}_{kq} = \dot{Y}_{qk} = \frac{\dot{y}}{n}$$

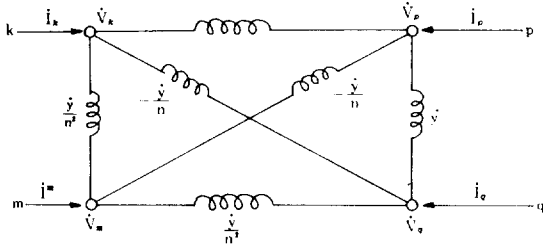


그림 5. 格子形 等價回路 (단위포시법) model

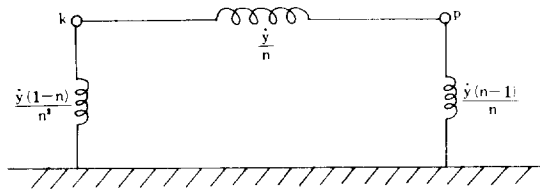


그림 6. 마디 (node) m와 q가 接地되었을때 單相等價 π 형회로

(23) 式을 等價回路로 그리면 그림 5와 같이 格子形 等價回路를 쉽게 얻을 수 있다.

그림 5에서 마디 (node) m, 과 q가 完全히 接地 되었다면 그림 6과 같이 π 형의 等價回路로 되어 진다.

따라서 그림 4와 같은 單相變壓器를 그림 5와 같이 格子形 等價回路로 간단히 誘導할 수 있다.

또한 그림 4에서 1次, 2次, 卷線比가 α, β

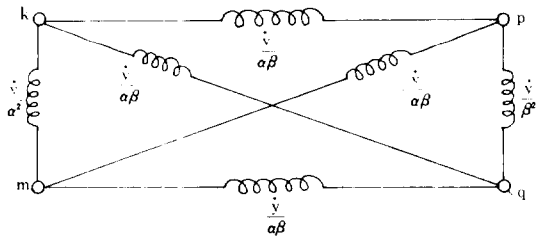
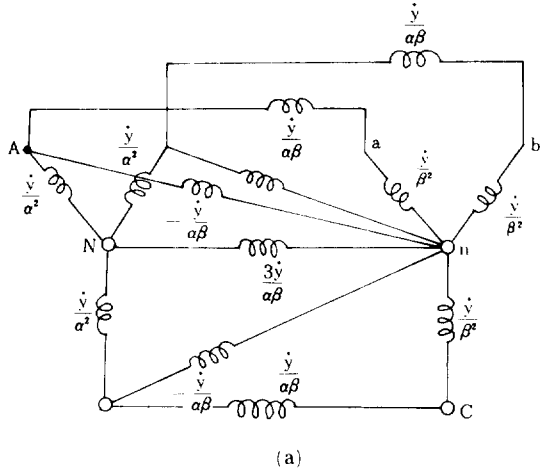
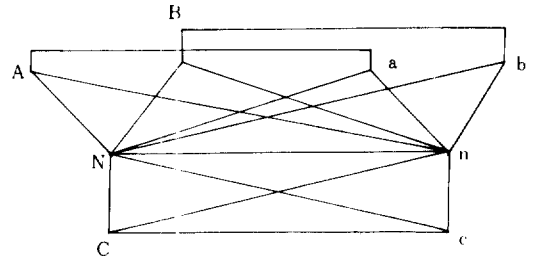


그림 7. 1次, 2次의 卷線比가 各各 α, β 인 端相變壓器 格子形 等價回路



(a)



(b)

그림 8. Y-Y 접속변압기의 等價回路

라하면 (單位法으로 表示) 그림 7과 같이 간단히 얻어진다.

以上の 결과를 使用하면 三相變壓器의 一般 等價回路를 간단하게 구할 수 있다.

單相變壓器 3臺를 \dot{Y} 결선 혹은 Δ 결선으로 接續하여 생각하면 그림 8 (a)와 같이 나타낼 수 있다. 그림 8의 (b)는 (a)를 간단하게 等價回

路로 表示할 수 있다. 이것은 各卷線의 單位가 고려되어 있고 또한 電線間의 位相差를 30° 고려해 놓고 있는 것이 특징이다.

여기서 주의해야 하는 것은 1次가 \dot{Y} , 2次가 Δ 결선으로 되어 있으면 單位法으로 表示하는 경우 2次側의 卷線數를 $\sqrt{3}$ 배로 하여야 한다.

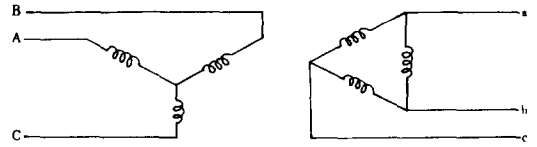
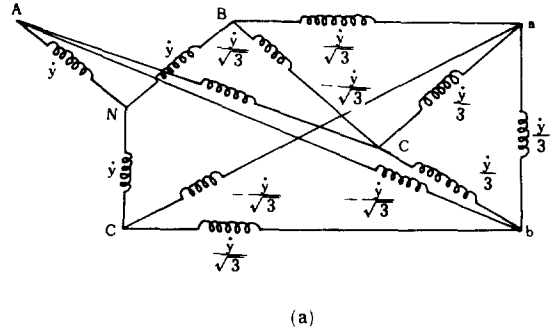


그림 9. Y-Δ접속變壓器

표 1. Y-Y접속변압기의 等價 어드미턴스

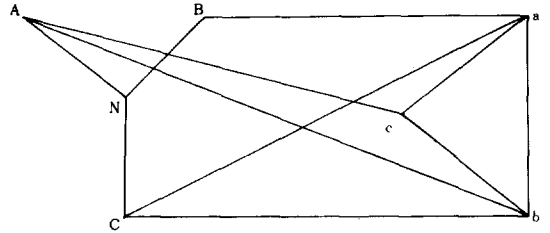
어드미턴스	마디 사이
$\frac{\dot{y}}{\alpha^2}$	A-N, B-N, C-N
$\frac{\dot{y}}{\beta^2}$	n-a, n-b, n-c
$\frac{\dot{y}}{\alpha\beta}$	A-a, B-b, C-c
$-\frac{\dot{y}}{\alpha\beta}$	A-n, B-n, C-n a-N, b-N, c-N
$\frac{3\dot{y}}{\alpha\beta}$	N-n



(a)

표 2. (a)에서 YΔ접속변압기의 등가회로의 어드미턴스

어드미턴스	마디와 마디사이
\dot{y}	A-N, B-N, C-N
$\frac{\dot{y}}{3}$	a-b, b-c, c-a
$\frac{\dot{y}}{\sqrt{3}}$	A-c, B-a, C-b
$-\frac{\dot{y}}{\sqrt{3}}$	A-b, B-c, C-a



(b)

그림 10. Y-Δ 접속변압기의 등가회로 (단위법으로 표시) Y-Δ 접속변압기의 등가회로를 단위법으로 표시하여 그리면 그림 10의 (a)와 같이 되고 이것을 더욱 간단하게 표시하고, 도표로서 표시하면 그림 10의 (b)와 표 2와 같이 표시된다.

표 3. 그림 10(a)에서 1차 2차 권선비가 단위법으로 α, β 일 때 다음과 같다.

어드미턴스	마디와 마디사이
$\frac{\dot{y}}{\alpha^2}$	A-N, B-N, C-N
$\frac{\dot{y}}{\beta^2}$	a-b, b-c, c-a
$\frac{\dot{y}}{\alpha\beta}$	A-c, B-a, C-b
$-\frac{\dot{y}}{\alpha\beta}$	A-b, B-c, C-a

2.4 電力系統의 相座標 表現

電力系統을 構成하는 여러 要素의 電壓, 電流의 關係式을 相座標로 表現하면 (3)式을 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$[\dot{V}_{abc}] = [\dot{E}_{abc}] - [\dot{Z}_{abc}][\dot{I}_{abc}] \quad (26)$$

$$\text{또는 } [\dot{V}] = [\dot{E}] - [\dot{Z}][\dot{I}]$$

$$\text{혹은 } \dot{i} = [\dot{I}] - [\dot{Y}][\dot{V}] = [\dot{Y}][\dot{E}] - [\dot{Y}][\dot{V}] \quad (27)$$

여기서 $[\dot{I}] = [\dot{Z}]^{-1} \dot{E}$, $[\dot{Y}] = [\dot{Z}]^{-1}$ 로 나타낸다.

$[\dot{I}]$ 는 同期機의 内部誘起起電力이 주어지면 자연스럽게 정해지는 既知量이다. 以外の 要素 즉 送電線路로 變壓器와 負荷에 있어서는 일반적으로,

$$[\dot{I}] = [\dot{Y}] [\dot{V}] \quad (28)$$

로 나타낼 수 있다. 만일 負荷電力이 주어질 때 도 等價어드미턴스行列을 나타낼 수 있다.

그림11과 같은 모델계통을 等價回路로 表示하면 그림12와 같이 된다.

이 等價回路에서 電源端子 1, 2, 3의 電壓, 電流 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_3; \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ 의 關係는 式(27)에 의하여,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = [\dot{Y}_s] \begin{bmatrix} \dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} - [\dot{Y}_s] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

로 된다.

또 送電線路에 대해서는

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \\ \dot{I}_6 \end{bmatrix} = [\dot{Y}_T] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \end{bmatrix} - [\dot{Y}_T] \begin{bmatrix} \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \end{bmatrix} \quad (30)$$

로 되고, 變壓器에 관해서는 (23)式에 의하여

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \\ \dot{I}_6 \\ \dot{I}_7 \\ \dot{I}_8 \\ \dot{I}_9 \end{bmatrix} = [\dot{Y}_T] \begin{bmatrix} \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \\ \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\dot{Y}_{456-456}] & [\dot{Y}_{456-789}] \\ \dots & \dots \\ [\dot{Y}_{789-456}] & [\dot{Y}_{789-789}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \\ \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \end{bmatrix} \quad (31)$$

로 되고 이것을 다음과 같은 式으로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \\ \dot{I}_6 \end{bmatrix} = [\dot{Y}_{456-456}] \begin{bmatrix} \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \end{bmatrix} + [\dot{Y}_{456-789}] \begin{bmatrix} \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_7 \\ \dot{I}_8 \\ \dot{I}_9 \end{bmatrix} = [\dot{Y}_{789-456}] \begin{bmatrix} \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \end{bmatrix} + [\dot{Y}_{789-789}] \begin{bmatrix} \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \end{bmatrix} \quad (33)$$

그리고 負荷電動機에 관해서는 電源側 發電機와 같은 式으로 表示된다.

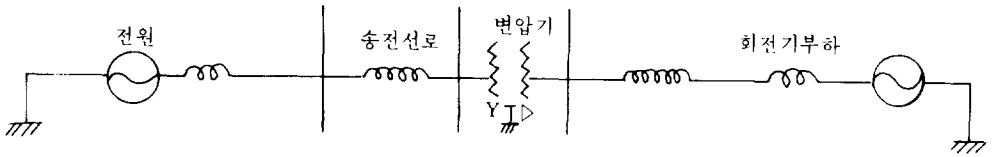


그림 11. 모델계통

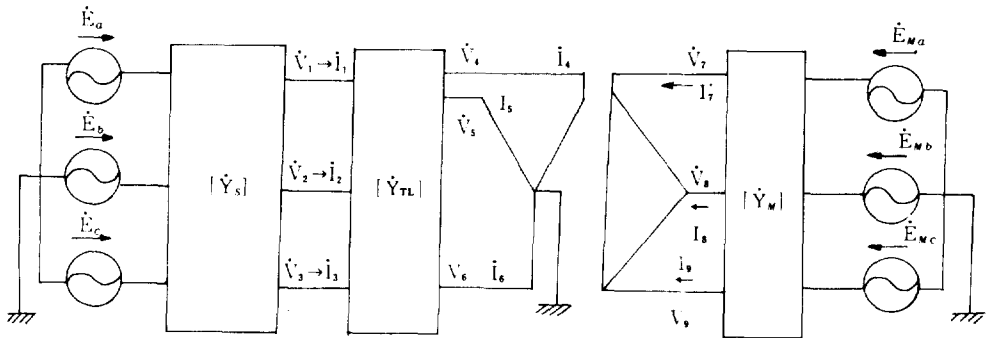


그림 12. 모델계통의 等價回路

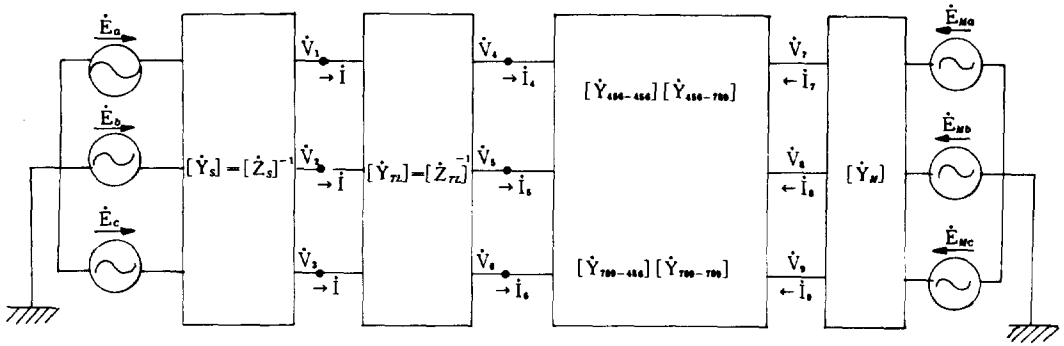


그림13. 系統모델의 相座標界의 等價回路

$$\text{즉, } \begin{bmatrix} \dot{i}_7 \\ \dot{i}_8 \\ \dot{i}_9 \end{bmatrix} = [\dot{Y}_M] \begin{bmatrix} \dot{E}_{Ma} \\ \dot{E}_{Mb} \\ \dot{E}_{Mc} \end{bmatrix} - [\dot{Y}_M] \begin{bmatrix} \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \end{bmatrix} \quad (34)$$

위의 여러 式에서 電流를 消去하면 다음과 같은 式을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} [\dot{Y}_s] \begin{bmatrix} \dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} \\ 0 \\ [\dot{Y}_M] \begin{bmatrix} \dot{E}_{Ma} \\ \dot{E}_{Mb} \\ \dot{E}_{Mc} \end{bmatrix} \end{bmatrix} =$$

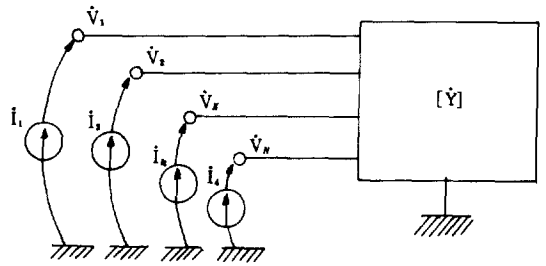


그림14. 等價電流源으로 表示한 等價回路

(35)式을 간단한 形式으로 다음式과 같이 表示할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \vdots \\ \dot{i}_k \\ \vdots \\ \dot{i}_N \end{bmatrix} = [\dot{Y}] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (36)$$

위式의 電壓, 電流의 關係는 그림14와 같이 表示된다.

$$\begin{bmatrix} [\dot{Y}_s] + [\dot{Y}_{TL}] & -[\dot{Y}_{TL}] & [0] \\ -[\dot{Y}_{TL}] & [\dot{Y}_{456-456}] + [\dot{Y}_{TL}] & [\dot{Y}_{456-789}] \\ [0] & [\dot{Y}_{789-456}] & [\dot{Y}_{789-789}] + [\dot{Y}_M] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \\ \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \end{bmatrix} \quad (35)$$

(35)式을 그림13과 같이 相座標界의 等價回路로 나타낼 수 있다.

方程式 (35)는 電力系統 故障計算의 基本式이 된다.

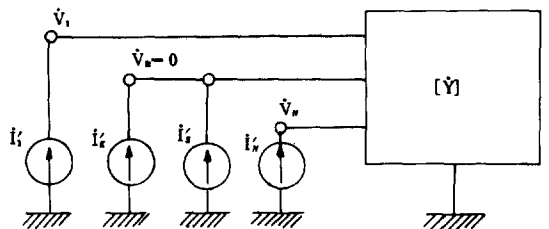


그림15. 1線地絡일때의 等價回路

(36)式的 좌변은 系統에 內在하는 電源의 内部 誘起起電力에 의하여 결정되는 電流源이다. 이 内部 誘起起電力은 故障後에도 一定하기 때문에 고장前後에도 電流源의 크기는 一定하게 유지 된다.

(36)式的 電壓, 電流에 故障前 等價回路로 表示하면 그림15와 같이 된다.

3. 故障解析에의 適用

3.1 1線地絡 故障

(1) 故障임피던스가 0인 경우

마디 K에서 1線地絡事故가 發生하였다면 $\dot{V}_k = 0$ 가 되고 \dot{I}_s 의 地絡電流가 흐른다. 이 경우 마디 K外的 마디에 연결된 電流源의 크기는 系統內的 電源의 内部 誘起起電力이 不變하는 한 고장발생前과 비교하여 변함없고, $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_{k-1}, \dot{I}_{k+1}, \dots, \dot{I}_N$ 는 그대로 유지된다. 地絡電流의 값 \dot{I}_s 는 알 수 없으나 그 값은 \dot{I}_k 外에 \dot{I}_s 의 電流源을 接續했을 경우에 V_k 가 0로 정해진 것과 같다.

고장상태의 等價回路를 그림15와 같이 表示할 수 있으며 따라서

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{k-1} \\ \dot{I}_k + \dot{I}_s \\ \dot{I}_{k+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_{k-1} \\ 0 \\ \dot{V}_{k+1} \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (37)$$

(37)式에서 $\dot{I}_k = \dot{I}_k + \dot{I}_s$ 로 하고 $\dot{V}_k = 0$ 로 되게 하고 未知數인 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_{k-1}, \dot{V}_{k+1}, \dots, \dot{V}_N$ 및 \dot{I}_s 도 어드미턴스行列 $[Y]$ 의 제k行과 제k列을 제거 해놓고 그 行列 $[Y']$ 로 하면 式(38)과 같이 되고,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [Y'] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}'_{k-1} \\ \dot{I}'_{k+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} = [Y'] \begin{bmatrix} \dot{V}_{k-1} \\ \dot{V}_{k+1} \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (38)$$

이 方程式을 풀어서 정할 수가 있고 $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_{k-1}, \dot{V}_{k+1}, \dot{V}_N$ 의 값을 알 수 있으면 \dot{I}_s 의 값은

$$\dot{I}_k + \dot{I}_s = \dot{Y}_{k1} \dot{V}_1 + \dot{Y}_{k2} \dot{V}_2 + \dots + \dot{Y}_{kk-1} \dot{V}_{k-1} - \dot{Y}_{kk-1} \dot{V}_{k+1} + \dot{Y}_{kN} \dot{V}_N \quad (39)$$

에서 計算할 수가 있다.

그런데 그림15의 回路의 狀態를 重疊의 定理에 의하여 그림16 (a), (b)와 같이 電流源을 故障前 $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_k, \dots, \dot{I}_N$ 을 연결한 回路와 마디k만으로 \dot{I}_s 의 電流源을 연결한 回路의 2個로 分解할 수가 있다. 그림16(a)가 故障前回路이고 地絡事故에 의하여 發生하는 各마디의 電壓의 變化量을 $\dot{V}'_1, \dot{V}'_2, \dots, \dot{V}'_k (= -\dot{V}_k), \dots, \dot{V}'_N$ 라고 하면

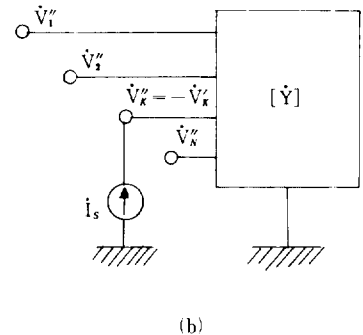
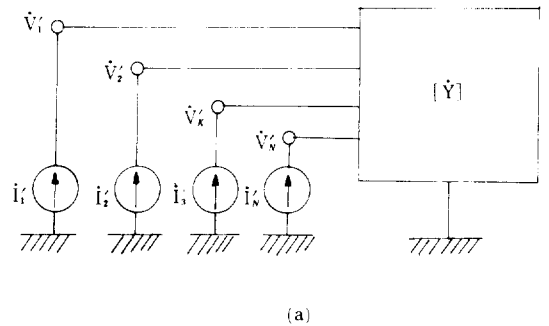


그림 16. 重疊의 定理에 의하여 分解된 回路

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{I}_s \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = [\dot{Y}] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \\ \vdots \\ \dot{V}_N'' \end{bmatrix} \quad (40)$$

을 풀어서 求하고 故障狀態에 있어서 각마디의 電壓은

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_k \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_1' \\ \dot{V}_2' \\ \vdots \\ \dot{V}_k' \\ \vdots \\ \dot{V}_N' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_1'' \\ \dot{V}_2'' \\ \vdots \\ \dot{V}_k'' \\ \vdots \\ \dot{V}_N'' \end{bmatrix} \quad (41)$$

으로 주어진다.

(2) 임피던스를 통한 地絡故障

마디 k에 임피던스 Z_f 을 통하여 地絡事故가 發生한 경우에 어드미턴스行列 $[\dot{Y}]$ 의 제k行 제k列의 要素 Y_{kk} 에 $1/Z_f$ 을 더함으로써 故障狀態의 어드미턴스 行列을 얻을 수가 있어 이것을 利用하여 (36)式을 풀면된다.

3.2 線間短絡故障

마디k와 마디j 사이에 短絡事故가 發生된 경우에는 그림17에 表示한 것과 같이 마디k와 j에 短絡電流가 흐르는 枝路를 접속하여 그 흐르는 電流 \dot{I}_{kj} 와 \dot{I}_{jk} 는

$$\dot{I}_{jk} + \dot{I}_{kj} = 0 \quad (42)$$

로 된다.

$$\text{즉 } \dot{I}_{jk} = \dot{I}_s, \quad \dot{I}_{kj} = -\dot{I}_s \quad (43)$$

로 되도록 정하고 同時에 마디k와 j의 電壓 \dot{V}_k, \dot{V}_j 을

$$\dot{V}_k = \dot{V}_j = \dot{V} \quad (44)$$

로 되도록 정하면 된다. 이것을 만족하기 위해서는 (36)式을 다음과 같이 쓸수가 있다.

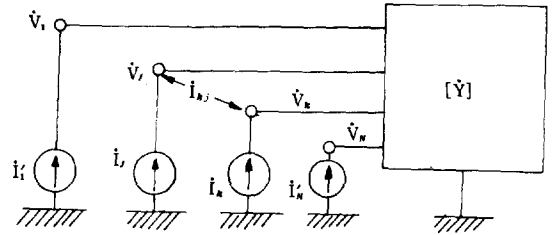


그림 17. 2 相短絡回路

$$\begin{bmatrix} \dot{I}'_1 \\ \dot{I}'_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{j+} \dot{I}_{kj} \\ \vdots \\ \dot{I}'_{k-} \dot{I}_{jk} \\ \vdots \\ \dot{I}'_n \end{bmatrix} = [\dot{Y}] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_j \\ \vdots \\ \dot{V}_k \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} \quad (45)$$

또는

$$\begin{bmatrix} \dot{I}'_1 \\ \dot{I}'_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_j - \dot{I}_s \\ \vdots \\ \dot{I}'_k + \dot{I}_s \\ \vdots \\ \dot{I}'_n \end{bmatrix} = [\dot{Y}] \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V} \\ \vdots \\ \dot{V} \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} \quad (46)$$

로 된다. (46)式에서 즉시 \dot{I}_s 의 값을 구해진다.

4. 結 論

이제까지 電力系統의 故障計算은 大部分 對稱座標法을 利用하였으나, 최근의 電力系統은 高壓化되고 大容量化됨에 따라 各相定數가 不平衡이 되어 適用에 어려움이 있다. 그러므로 詳述한 相座標界를 利用한 解析方法을 利用함으로써 이러한 難點을 解決할 수 있을 것으로 생각된다.

또한 相座標界를 利用한 解析方法은 실제적인 電力系統의 諸문제에 適用된 事例가 미미한 편이나 今後 電力系統 故障計算 분야에 相座標界

(p. 49에 계속)