

## 3상 조류계산에 의한 대규모 배전계통의 불평형상태 평가

(An Evaluation of Large Scale Distribution system Unbalance)

송 현 선

(Hyun-Seon Song)

### 요 약

대규모 배전계통 설비의 합리적인 운용과 안전성을 제고하기 위해서는 시스템의 불평형 상태를 정확하게 파악하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 전송선로와 부하의 불평형을 고려한 3상 조류계산에 의하여 시스템의 불평형상태를 평가하였다. 이를 위하여, 먼저 전송선로에서는 선로정수에 상호결합과 상배치 및 연가의 영향을 고려하여 모델링하였고, 변압기는 1,2차의 결선방식에 대하여 상호결합관계를 고려하였고 변압기 철손도 전압의 함수로 표현하여 계산하였다. 발전기모델에서는 돌극효과를 고려할 수 있도록 하였으며, 전력조류계산 알고리즘에서는 전력방정식을 상전압으로 표현하여 뉴턴-랩슨법으로 프로그램화 하였다.

### Abstract

It is necessary to calculate the system's factor for reasonable operation and security enhancement of large scale distribution system. This paper presents an effective three phase load flow calculation for distribution system unbalance evaluation. It takes into account an untransposed transmission line, the core loss as a function of voltage on the secondary side of the transformer, and a generator unbalance model which is also suitable for a salient pole machine. The load flow algorithm is used Newton-Raphson method of load flow equations in bus phase voltage.

### 1. 서 론

대규모 배전계통은 매년 증가하는 전력수요로 전송계통이 대용량 장거리화되고 부하의 지역적 편중과 각 상별 부하의 불평형 및 고전압 장거리 전송선로의 공간적인 배열 등으로 전력계통에서의 불평형 현상은 불가피하다. 또한 최근 전력설비에 전력반도

\*정회원 : 세명대 전기공학과 부교수

접수일자 : 1998. 9. 2.

체 소자의 사용이 점점 확대됨에 따라 전자계의 상호간섭으로 계통의 불평형상태는 더욱 가중되고 고조파 및 파의 왜형율이 증가하는 현상이 발생하고 있다. 이러한 전력계통의 불평형 상태를 평가하는데는 3상 전력조류계산이 필요하다[1-5].

3상 전력조류계산은 발전기, 변압기, 전송선과 부하 등이 복잡하게 결합된 전력시스템에서 전송선 상호간의 유도결합을 고려하고 상별 불평형 부하와 발전출력에 대한 전력계통 각 부분의 전압, 전류 및 선

로조류의 분포상태를 해석하는 것이다. 불평형 전력 계통의 전압, 전류는 대칭좌표법에 의하여 정상분, 역상분 및 영상분으로 나누어 해석하는데 이들 중 역상전류는 동기기의 회전자를 과열시키는 원인이 된다. 영상전류는 인근 통신선로에 전압이 유기되어 통신장애 현상이 발생하고 있다. 또한 전송선로 보호용 가공지선에 흐르는 유도전류에 의한 손실발생과 일부 보호계전기의 오동작을 유발하는 등 계통설비 운용의 장애요소가 되고 있다.[6] 그러므로 양질의 전력을 안전하게 공급함을 목표로 하고 있는 전력설비 운용 측면에서는 계통의 불평형 정도를 정확하게 평가할 필요가 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 계통설비의 구성요소 중 발전기는 대칭분 임피던스 행렬로 등가화 하고, 회전자의 내부구조에 대한 단자전압 및 내부유기전압의 관계로부터 돌극효과의 영향도 고려할 수 있도록 하였다.[7] 변압기의 등가모델에서는  $\Delta$ -Y결선 및 Y-Y결선 등의 변압기 결선방식에 대하여 상호결합 관계를 고려하였으며 변압기 철손도 전압의 함수로 표현하여 계산할 수 있도록 하였다. 전송선의 등가모델에서는 직렬저항, 각 상간의 상호결합을 고려한 인덕턴스, 각 선간과 대지간의 정전용량을 정확하게 모델링하였으며 대지 및 가공지선의 영향도 고려할 수 있도록 하였다.[8] 3상 전력조류계산의 알고리즘은 뉴턴-랩슨법으로 프로그래밍화 하였고, 이를 전송선의 종류와 배치상태 및 각 상별로 부하가 불균등하게 분포된 모델계통에 적용하여 모선 전압의 영상분·역상분 불평형을, 각 대칭분 선로손실 및 변압기의 철손을 평가하였다.

## 2. 불평형 3상 전력계통의 모델링

전송선, 변압기 및 발전기로 구성된 불평형 전력 계통에서 이들 계통요소의 등가회로로부터 어드미턴스 및 임피던스로 정식화하였다.

### 2.1 전송선 모델링

3상 전송선을 선로저항 및 각 상간의 상호결합을 고려한 직렬인덕턴스와 병렬커패시턴스로 모델링하고 이를 등가  $\pi$ 형 회로로 나타낸다.

### 2.1.1 직렬임피던스

가공지선 g와 중성선을 포함한 그림 1과 같이 상호결합된 3상 전송선에서 a상의 전압방정식은

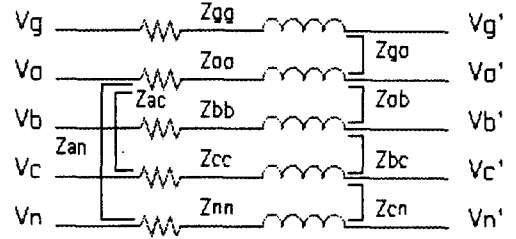


그림 1. 3상 전송선의 직렬임피던스 등가회로  
Fig. 1. Three phase transmission series impedance equivalent

$$V_a - V'_a = (r_a + j\omega L_a)I_a + j\omega L_{ab}I_b + j\omega L_{ac}I_c + j\omega L_{ag}I_g - j\omega L_{an}I_n \quad (1)$$

로 되고, 중성선 n의 전압, 전류관계식은 다음과 같이 된다.

$$I_n = I_a + I_b + I_c + I_g \quad (2)$$

$$V_n = (R_n + j\omega L_n)I_n - j\omega L_{an}I_a - j\omega L_{bn}I_b - j\omega L_{cn}I_c - j\omega L_{ng}I_g \quad (3)$$

식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하면

$$V_a - V'_a = Z_{aa-n}I_a + Z_{ab-n}I_b + Z_{ac-n}I_c + Z_{ag-n}I_g \quad (4)$$

단  $Z_{aa-n} = R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n$

$$Z_{ab-n} = j\omega L_{ab} - j\omega L_{an} - j\omega L_{bn} + R_n + j\omega L_n$$

$$Z_{ac-n} = j\omega L_{ac} - j\omega L_{an} - j\omega L_{cn} + R_n + j\omega L_n$$

로 되고, 식 (4)로부터 가공지선을 포함한 3상 전송선로의 전압·전류관계식을 행렬로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{abc} - V'_{a'b'c} \\ V_g - V_g' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B \\ Z_C & Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 가공지선의 전압이 0이므로 식 (5)에 Kron의 reduction을 적용하면 즉, 식 (5)의 2번째행에서

$$I_g = -Z_D^{-1} Z_C I_{abc}$$

를 1번째행

$$V_{abc} - V'_{a'b'c} = Z_A I_{abc} + Z_D I_g$$

에 대입하면

$V_{abc} - V_{a'b'c'} = (Z_A - Z_B Z_D^{-1} Z_C) I_{abc}$   
로 된다. 그러므로 3상 전송선의 직렬임피던스행렬  $Z_s$ 는 다음과 같이 된다.

$$Z_s = Z_A - Z_B Z_D^{-1} Z_C$$

$$= \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.1.2 병렬어드미턴스

가공지선  $g$ 를 포함한 3상 전송선의 정전용량 관계를 나타낸 그림 2에서 병렬어드미턴스행렬  $Y_p$ 를 구하면 다음 식과 같이 된다.

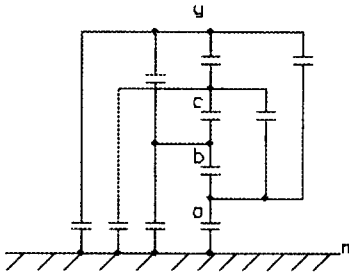


그림 2. 3상 전송선의 병렬어드미턴스 동가회로  
Fig. 2. Three phase transmission shunt admittance equivalent

$$Y_p = j\omega \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

이상의 직렬임피던스와 병렬어드미턴스 행렬을  $\pi$ 형 동가회로로 표현하고, 장거리 전송선의 경우에는  $\pi$ 형 동가회로를 중속 접속하여 다단으로 모델링할 수 있도록 하였다.

## 2.2 변압기 모델링

2권선 3상 변압기 1차 2차 코일의 자기어드미턴스 행렬을 각각  $Y_{pp}$ ,  $Y_{ss}$ , 상호어드미턴스 행렬을  $Y_{ps}$ 라 하면 3상 변압기는 다음식과 같이 등가화된다.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

변압기의 어드미턴스 행렬은 1차 2차 코일의 결선 방식에 따라 표현식이 달라지므로 이를 일반화하면 표 1과 같이 된다.

표 1. 변압기의 결선방식에 따른 어드미턴스행렬  
Table 1. Node Admittance Matrix of Three Phase transformer connections

변압기 결선방식	자기 어드미턴스		상호 어드미턴스	
	$Y_{pp}$	$Y_{ss}$	$Y_{ps}$	$Y_{sp}$
Wye-G Wye-G	$Y_1$	$Y_1$	$-Y_1$	$-Y_1$
Wye-G Wye	$Y_{\Pi}$	$Y_{\Pi}$	$-Y_{\Pi}$	$-Y_{\Pi}$
Wye-G $\Delta$	$Y_1$	$Y_{\Pi}$	$Y_{\text{III}}$	$Y_{\text{III}}^t$
Wye Wye-G	$Y_{\Pi}$	$Y_{\Pi}$	$-Y_{\text{III}}$	$-Y_{\text{III}}^t$
Wye Wye	$Y_{\Pi}$	$Y_{\Pi}$	$-Y_{\Pi}$	$-Y_{\Pi}$
Wye $\Delta$	$Y_{\Pi}$	$Y_{\Pi}$	$Y_{\text{III}}$	$Y_{\text{III}}^t$
$\Delta$ Wye-G	$Y_{\Pi}$	$Y_1$	$Y_{\text{III}}^t$	$Y_{\text{III}}$
$\Delta$ Wye	$Y_{\Pi}$	$Y_{\Pi}$	$Y_{\text{III}}^t$	$Y_{\text{III}}$
$\Delta$ $\Delta$	$Y_{\Pi}$	$Y_{\Pi}$	$-Y_{\Pi}$	$-Y_{\Pi}$

여기서

$$Y_1 = \begin{bmatrix} Y_t & & \\ & Y_t & \\ & & Y_t \end{bmatrix}$$

$$Y_{\Pi} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 Y_t & -Y_t & -Y_t \\ -Y_t & 2 Y_t & -Y_t \\ -Y_t & -Y_t & 2 Y_t \end{bmatrix}$$

$$Y_{\text{III}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -Y_t & Y_t & \\ & -Y_t & Y_t \\ Y_t & & -Y_t \end{bmatrix}$$

변압기의 철심에서 발생하는 유효 및 무효손실을 변압기 2차측의 전압으로 표현하면[8]

$$P_{TL} = S_T / S_B (A V^2 + B e^C V^2) \quad (9)$$

$$Q_{TL} = S_T / S_B (D V^2 + E e^F V^2) \quad (10)$$

로 된다. 여기서  $S_B$ ,  $S_T$ 는 시스템 및 변압기의 기준용량이고, A, B, C, D, E 및 F는 변압기의 특성에 따라 결정되는 상수이다.

## 2.3 발전기 모델링

그림 3의 발전기모델에서 각 상의 등가어드미턴스는 대칭분 임피던스  $[Zg]_{012}$ 와 변환행렬  $[T]$ 를 이용

하면 다음과 같이 된다.

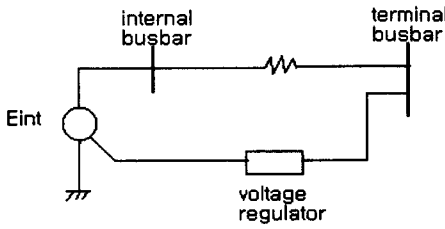


그림 4. 발전기 모델  
Fig. 4. Generator model

$$[Y_g] = [T][T_g]_{012}[T]^{-1} \quad (11)$$

$$= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} y_0 + y_1 + y_2 & y_0 + ay_1 + a^2y_2 & y_0 + a^2y_1 + ay_2 \\ y_0 + a^2y_1 + ay_2 & y_0 + y_1 + y_2 & y_0 + ay_1 + a^2y_2 \\ y_0 + ay_1 + a^2y_2 & y_0 + a^2y_1 + ay_2 & y_0 + y_1 + y_2 \end{bmatrix}$$

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

$$[Y_g]_{012} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix}^{-1}$$

여기서,  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  이고,  $Z_0, Z_1, Z_2$ 는 영상, 정상 및 역상 임피던스이다. 돌극발전기의 대칭분 임피던스를 발전기 내부유기전압과 단자전압관계로부터 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Z_0 &= r + j\omega L_1 \\ Z_1 &= |Z_1| \exp(j\theta_1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$Z_2 = r + j\omega(L_d' + L_q')/2$$

- 단,  $r$  : 권선저항
- $L_1$  : 누설인덕턴스
- $L_d', L_q'$  : 회전자 계동회로의 직축 및 횡축 차과도 인덕턴스
- $|Z_1| = \{(\omega L_d \sin \varphi - R \cos \varphi)^2 + (\omega L_q \cos \varphi + R \sin \varphi)^2\}^{1/2}$
- $\theta_1 = \tan^{-1} \{(\omega L_d \sin^2 \varphi + \omega L_q \cos^2 \varphi) / (R + \omega(L_d - L_q) \cos \varphi \sin \varphi)\}$
- $L_d, L_q$  : 직축 및 횡축인덕턴스
- $\varphi$  : 정상전류의 위상각

식 (12)의 대칭분 임피던스에서, 원통형발전기인 경우는 직축과 횡축인덕턴스를 같게 놓으면 된다. 특히 주목할 사항은 식 (12)의 정상분 임피던스는 정상

분 전류의 위상각함수로 표현되어 있으므로 불평형 조류계산의 해를 구하는 과정에서 매 반복시 마다 전류위상각의 변화분을 고려하여 수정하여야 한다. 조류계산 알고리즘에서 발전기의 과도리액턴스  $X_d'$  배후전압 즉 내부모선전압은 선로에 흐르는 전류가 불평형일 때도 평형상태로 유지되도록 설계되어 있으므로 먼저 발전기의 단자전압과 출력으로부터 상 전류  $I_1^{abc}$  구하면

$$I_1^{abc} = (P_C - jQ_C + [V_a^* \ V_b^* \ V_c^*] Y_G^{abc} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}) / (V_a^* + a^2 V_b^* + a V_c^*) \quad (13)$$

이것으로부터 발전기 내부모선전압  $E_1^{abc}$ 를 유도하면

$$E_1^{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} (I_1 * Z_1) \quad (14)$$

로 되어 크기 및 위상각이 모두 평형상태로 된다.

### 3. 3상 전력조류계산 알고리즘

3상 전력조류계산은 각 모선별로 주어진 변수들의 제약조건으로부터 전력계통의 불평형상태를 파악하기 위한 것으로 비선형으로 표현된 전력편차 방정식의 해를 구하는 것이다. 모선 i에 대한 전력편차방정식은

$$\Delta S_i = S_{G,i} - S_{D,i} - S_i(V, \theta) \quad (15)$$

여기서 i 발전기 출력  $S_{G,i}$ 는 경제급전 계획에 의해 사전에 계획된 값이고, 부하  $S_{D,i}$ 는 수요상정에 의해 지정된 값이다. 식 (19)에서, 모선 i의 3상 p에 대한 전력방정식을 유효분과 무효분으로 나누어 표현하면

$$\begin{aligned} \Delta P_i^p &= P_{G,i}^{SP} - P_{D,i}^{SP} \\ &- V_i^p \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 V_k^m (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i^p &= Q_{G,i}^{SP} - Q_{D,i}^{SP} \\ &- V_i^p \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 V_k^m (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서

$V_i^p, V_k^m$  : 모선 i의 P상과

모선 k의 m상의 전압크기

$\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m$  : 모선 i의 p상 위상과

모선 k의 m상 위상과의 차

$G_{ik}^{pm}, B_{ik}^{pm}$  : 모선 i의 p상 위상과 모선 k의 m상에

관련된 어드미턴스 행렬의 유효분과 무효분

뉴턴-랩슨 전력조류계산 알고리  $V, \theta$  증은 식 (15)의 전력편차방정식으로부터 상태변수 에 대한 테일러 급수전개하여 1차항만으로 표현하면

$$\Delta S(V + \Delta V, \theta + \Delta \theta) \approx \frac{\partial \Delta S}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial \Delta S}{\partial V} \Delta V \quad (18)$$

식 (18)를 유효전력과 무효전력으로 나누어 표현하고

$$\Delta P_i^p = \frac{\partial \Delta P_i^p}{\partial \theta_k^m} \Delta \theta_k^m + \frac{\partial \Delta P_i^p}{\partial V_k^m} \Delta V_k^m \quad (19)$$

$$\Delta Q_i^p = \frac{\partial \Delta Q_i^p}{\partial \theta_k^m} \Delta \theta_k^m + \frac{\partial \Delta Q_i^p}{\partial V_k^m} \Delta V_k^m \quad (20)$$

식 (16), (17) 및 식 (19), (20)으로부터 감도를 유도하면 다음식과 같다.

$$\Delta P_i^p = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 (H_{ik}^{pm} \Delta \theta_k^m - N_{ik}^{pm} \Delta V_k^m) \quad (21)$$

$$\Delta Q_i^p = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 (M_{ik}^{pm} \Delta \theta_k^m - L_{ik}^{pm} \Delta V_k^m) \quad (22)$$

여기서

$$H_{ik}^{pm} = \frac{\partial \Delta P_i^p}{\partial \theta_k^m} = V_i^p V_k^m (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm})$$

$$N_{ik}^{pm} = \frac{\partial \Delta P_i^p}{\partial V_k^m} = V_i^p (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm})$$

$$M_{ik}^{pm} = \frac{\partial \Delta Q_i^p}{\partial \theta_k^m} = -V_i^p V_k^m (G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm})$$

$$L_{ik}^{pm} = \frac{\partial \Delta Q_i^p}{\partial V_k^m} = -V_i^p (G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm})$$

뉴턴-랩슨 전력조류계산은 반복법에 의하여 비선형 전력방정식의 해를 구하는 것이다. 식 (21), (22)의 k번째 반복계산시의 전력편차 방정식은

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{k-1} \\ \Delta Q^{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{k-1} & N^{k-1} \\ M^{k-1} & L^{k-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} \quad (23)$$

로 표현되며, 이를 그림 4와 같은 계산 절차에 따라 Jacobian행렬을 전진 및 후진 대입법[9]에 의하여 구하고 수렴 여부를 판정한다. 여기서 부하모선의 경우는 종래 평형상태의 단상 조류계산과 동일하게 각 상 유효전력과 무효전력을 기지값으로 하고 전압의

크기와 위상각을 미지변수로 하여 전력편차방정식으로부터 구한다. 발전기 모선인 경우는 발전기 단자모선으로부터 유출하는 전류와 단자모선에서의 출력을 각각 다음식과 같이 구한 다음

$$I_G^{abc} = (V^{abc} - E_I^{abc}) * Y_G^{abc} \quad (24)$$

$$P_G + jQ_G = V_{abc} * I_G^{abc*} \quad (25)$$

$P_G$ 는  $P_{spec}$ 으로,  $Q_G$ 는 발전기 코일의 열적상태를 고려하여 상한( $Q_{Gmax}$ ) 및 하한( $Q_{Gmin}$ )으로 치환하고 부하모선과 같이 처리한다. 또한 발전기 모선의 전압은 정상분 전압  $V_1$ 을 정해진 전압 크기  $V_{spec}$ 으로 치환하여 일정하게 유지한 후 상전압  $V_{abc}$ 와 출력  $P_G$ 와  $Q_G$ 를 식 (25)에 대입하여  $I_1$ 를 구하고, 이를 다시 식 (24)에 대입하여  $E_1^{abc}$ 를 구한다. 기준

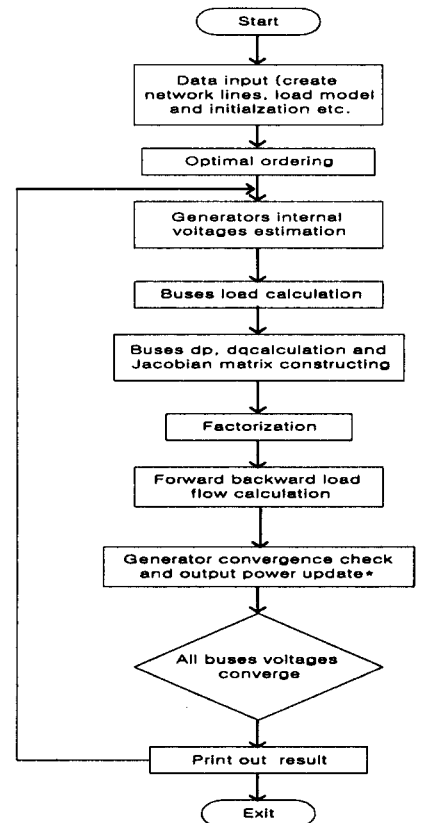


그림 4. Newton-Raphson 3상 조류계산 알고리즘  
Fig. 4. Newton-Raphson Three-Phase Load Flow Algorithm.

모선의 경우는 1상에 대한 전압위상각과 정상분 전압 크기를 기지값으로 하여 모선전압의 기준벡터로 지정하여 발전기모선에서 기지로 처리한 유효전력을 미지값으로 하여 선로손실을 담당하게 한다.

#### 4. 24모선 모델계통의 사례연구

본 연구의 3상 조류계산에 의한 전력계통의 불평형 정도를 평가하기 위하여 그림 5와 같은 24모선 모델계통과 참고문헌 [8]의 모선 및 선로 데이터로부터 전송선의 연가여부에 따라 다음과 같은 2가지 경우로 나누어 모선전압의 분포상태, 계통의 불평형 정도 및 손실을 비교 검토하였다.

표 2는 전송선로가 연가되지 않은 2회선 전송선로가 수직 ABC-CBA(CASE 1), ABC-ABC(CASE 2)의 상순으로 배치되어 있는 경우에 대한 전압분포 관계를 나타낸 것으로 평형상태와 달리 전압 크기 및 위상각이 불균등하게 분포되어 있고, A상의 전압 변동폭은 CASE 1의 경우 0.1(최소 3번 모선전압 0.949, 최대 22번 모선전압 1.049), CASE 2의 경우 0.139(최소 3번 모선전압 0.908, 최대 22번 모선전압 1.047)로 CASE 2가 CASE 1보다 심각하다. 표 2와 그림 6의 불평형률에서 전압강하가 클수록 영상분 및 역상분 불평형률도 대체로 큼을 알 수 있다. CASE 1 및 CASE 2의 영상분 불평형률의 최대치는 모선 2와 3에서 각각 0.725[%], 1.995[%]이며, 계통 전체의 영상분 불평형률은 그림 6의 각 모선에 대한 영상분 불평형률을 합하여 각각 5.78[%], 14.78[%]로 되었다. CASE 1 및 2의 역상분 불평형률의 최대치는 모선 3에서 각각 1.023[%], 3.582[%]이고 계통의 역상분 불평형률은 각각 9.25[%], 32.24[%]로서 계통의 불평형이 모선전압에 미치는 영향은 영상분보다는 역상분에서 심각하게 나타난다.

표 3의 선로손실 면에서는 CASE 1 및 CASE 2의 정상분 유효전력손실이 각각 32.2[MW], 33.3[MW]이고 영상분 유효전력손실은 각각 0.0751[MW], 0.508[MW]이며, 역상분 유효전력손실은 각각 0.0075[MW], 0.0522[MW]로서 계통의 불평형이 역상분 보다 영상분에 미치는 영향이 크게 나타났다. 변압기 철심에서 발생하는 손실은 선로의 연가에 따른 영향은 거의 없었으나 전송선로의 상배치에 따라서는 ABC-ABC가 ABC-CBA보다 다소 증가하였다.

이상으로부터 계통이 평형 및 불평형인 경우에도 2회선 전송선로의 배치가 ABC-CBA 가 ABC-ABC 보다 더 유리함을 알 수 있다.

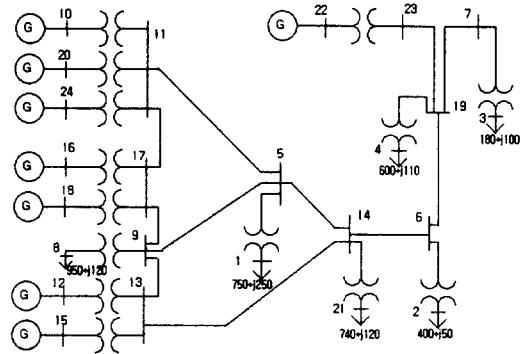
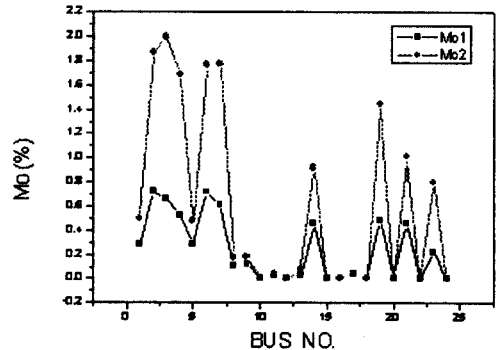
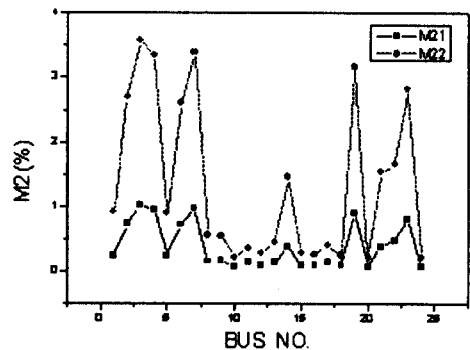


그림 5. 24 모선 모델계통  
Fig. 5. 24 Bus Model System



A. 영상분 불평형률 비교  
(CASE 1: M01, CASE 2: M02)



B. 역상분 불평형률 비교  
(CASE 1: M21, CASE 2: M22)

그림 6. 불평형률의 그래프  
Fig. 6. Graph of System unbalance factor

표 2. 불평형상태의 모선전압 비교

Table 2. Comparison of unbalanced voltage for CASE 1, 2

BUS NO.	CASE 1						CASE 2					
	V <sub>A</sub>	θ <sub>A</sub>	V <sub>B</sub>	θ <sub>B</sub>	V <sub>C</sub>	θ <sub>C</sub>	V <sub>A</sub>	θ <sub>A</sub>	V <sub>B</sub>	θ <sub>B</sub>	V <sub>C</sub>	θ <sub>C</sub>
1	.986	19.3	.991	-100.9	.993	139.0	.973	18.8	.994	-101.0	.933	39.0
2	.974	11.4	.988	-108.7	.998	131.2	.938	9.2	.996	-109.2	1.007	131.2
3	.949	6.0	.966	-113.6	.977	126.1	.908	3.1	.973	-114.3	.991	126.1
4	.966	5.0	.981	-114.5	.990	125.2	.930	2.1	.987	-115.2	1.003	125.2
5	.998	22.1	1.003	-98.1	1.006	141.9	.985	21.7	1.006	-98.2	1.006	141.9
6	.982	14.2	.996	-106.0	1.006	133.9	.946	12.3	1.004	-106.5	1.015	133.9
7	.975	8.5	.992	-111.2	1.002	128.5	.936	5.9	.998	-111.9	1.015	128.5
8	.995	20.1	.997	-100.0	.997	139.9	.987	19.9	.999	-100.1	.995	139.9
9	1.005	23.4	1.008	-96.8	1.007	143.2	.997	23.2	1.009	-96.8	1.005	143.2
10	1.029	-2.0	1.031	-122.0	1.030	117.9	1.028	-2.0	1.032	-122.0	1.031	117.9
11	1.012	24.6	1.013	-95.5	1.011	144.5	1.009	24.7	1.015	-95.5	1.008	144.5
12	1.029	-6	1.031	-120.6	1.030	119.3	1.027	-8	1.031	-120.6	1.032	119.3
13	1.009	23.7	1.011	-96.4	1.009	143.5	1.003	23.6	1.012	-96.5	1.006	143.5
14	.990	19.8	.998	-100.4	1.004	139.5	.969	19.0	1.003	-100.7	1.006	129.5
15	1.029	-6	1.031	-120.6	1.030	119.3	1.027	-8	1.031	-120.6	1.032	119.3
16	.999	.0	1.001	-120.0	1.000	119.9	.998	.0	1.002	-119.9	1.001	119.9
17	1.011	24.7	1.012	-95.4	1.009	144.5	1.008	24.8	1.013	-95.5	1.006	144.5
18	1.029	.4	1.031	-119.6	1.030	120.3	1.028	.4	1.032	-119.6	1.030	120.3
19	.983	9.1	.998	-110.5	1.007	129.1	.948	6.6	1.003	-111.2	1.020	129.1
20	1.029	-2.0	1.031	-122.0	1.030	117.9	1.028	-2.0	1.032	-122.0	1.031	117.9
21	.970	14.6	.978	-105.5	.984	134.5	.948	13.6	.983	-105.7	.986	134.5
22	1.049	14.1	1.046	-133.6	1.055	106.3	1.047	16.3	1.037	-134.7	1.166	106.3
23	.992	9.7	1.003	-109.8	1.009	129.7	.964	7.4	1.006	-110.3	1.021	129.7
24	1.039	-2.0	1.041	-122.1	1.040	117.9	1.038	-2.1	1.042	-122.0	1.041	117.9

표 3. 불평형상태의 선로손실 비교

Table 3. Comparison of unbalanced system loss for CASE 1, 2

ITEM	CASE 1		CASE 2	
	P[MW]	Q[MVAR]	P[MW]	Q[MVAR]
TOTAL SYSTEM LOSS	32.20	226.27	33.31	312.98
ZERO SEQ. LOSS	0.0751	0.0160	0.5080	0.6526
POSITIVE SEQ. LOSS	32.064	226.3159	32.2956	312.5024
NEGATIVE SEQ. LOSS	0.0075	-0.0616	0.0522	-0.1792
TOTAL LINE LOSS	24.97	-372.17	26.00	-293.59
TR. CORE LOSS	7.23	598.44	7.31	606.56

## 5. 결 론

본 연구에서는 전송선로의 연가, 선로정수의 상호 결합, 변압기의 결선방식 등을 고려할 수 있도록 전력계통을 모델링하고 뉴턴-랩슨법으로 3상 전력조류 계산을 프로그램화하여 계통의 불평형상태를 평가하였다. 전력계통의 불평형률은 모선의 전압강하와 상관관계를 가지고 있으며 전압강하가 클수록 영상분 및 역상분의 불평형률도 크게 되었다. 계통 불평형에 따른 선로손실은 불평형률에 비례하여 증가 하였고, 역상분손실보다는 영상분손실이 상대적으로 크게 나타났다. 그러나 변압기 철심에서 발생하는 손실은 계통의 불평형과 거의 무관하였다.

전송선의 비연가로 인한 계통의 불평형률은 영상분 보다는 역상분에서 그 정도가 심하고, 2회선 전송선로의 경우 상순 배치를 ABC-ABC보다는 ABC-CBA로 함으로써 불평형률 뿐만 아니라 선로 손실을 줄일 수 있다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 97년도 단기연구비 지원으로 이루어졌음 (97-040)

### 참 고 문 헌

[1] R. G. Wasley and M. A. Shlash, "Newton-Raphson Algorithm for 3-Phase Load Flow", Proc. IEE, Vol.121, No. 7, pp. 630 - 638 July 1974

[2] J. Arrillage and B. J. Harker, "Fast-Decoupled Three-Phase Load Flow", Proc. IEE, Vol. 9, No. 4, pp. 743-740, Aug. 1978

[3] A. Y. Sivaramkrishnam et al, "Thase-Phase Load Flow Algorithm" IE(I)jour, Vol. 60, pp 240-243, April 1980

[4] M. A. Laughton and A. O. M. Saleh, "Unified Phase-Coordinate Load-Flow and Fault Analysis of Poly-Phase Networks", Electrical Power & Energy System, Vol. 2, No. 4, Oct. 1980

[5] J. Arrillage and C. P. Arnold, "Computer Modelling of Electrical Power System" John Wiley Son, 1983

[6] 윤용범, 추진부, "전송계통에서의 영상 순환전류 감소를 위한 최적 상배열 결정 기법", 전기학회 논문지 47권 5호 PP.563-567, 1998.5

[7] 關根泰次, "三相不平衡潮流計算과 不平衡 線路故障解析" 電力技術研究會 PE-86-88, pp. 151-160, 1986

[8] T. H. Chen, et al, "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach", 학술연구 발표회 논문 초록집 pp.18-24,1990

[9] W. F. Tinney and J. W. Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equations by optimally Orderd Trianglar Factorozations", Proc. IEEE, Vol. 55, No. 11, pp. 1801-1809, Nov. 1967

### ◇ 저자소개 ◇

#### 송 현 선 (宋賢善)

1953년 3월 25일생. 1979년 한양대 공대 전기공학과 졸. 1982년 한양대 대학원 전기공학과(석사). 1988년 한양대 대학원 전기공학과(박사). '83년~'92년 동양공전 부교수. 현재 세명대 전기공학과 부교수.