

# 분산형 전원을 포함하는 배전계통을 위한 조류계산 기법 연구

(Load Flow Analysis for Distribution Systems Including Distributed Generations)

권형석 · 김홍래\*

(Hyung-Seok Kwon · HongRae Kim)

## 요 약

본 논문에서는 분산형 전원을 포함하는 배전계통을 위한 3상 조류계산 프로그램에 대하여 소개한다. 배전계통의 조류계산을 위하여 각 상간에 존재하는 불평형을 모두 고려할 수 있도록 계통 내 설비들의 모델을 선정하였으며, 전력방정식이나 측정함수 등도 새로 유도하였다. 본 논문을 통해 개발된 조류계산 프로그램은 다양한 크기와 형태의 시험계통에 대해 사례연구를 시행함으로써 알고리즘의 타당성 및 프로그램의 수렴성을 검증하였다.

## Abstract

This paper addressed the issue of the three-phase load flow program for electric power distribution systems that include distributed generations. The equipment models were selected in order to consider imbalances among phases for the load flow analysis of distribution systems. Also, power equations and measurement functions are newly derived. The load flow analysis program developed in this paper was tested for the propriety of algorithm and convergence characteristics by case studies on test systems in various scales and types.

Key Words : three-phase load flow, distributed generations, distribution systems

## 1. 서 론

배전계통은 전력을 사용하는 최종 소비자와 직접 연결되어 있는 전력계통으로, 전력공급의 신뢰성 확보, 계통 운용의 안정성 제고 등에 있어서 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 그간 우리나라를 포함한 세계 여러 나라에서 배전계통 운용의 효율화를

위하여 배전자동화(distribution automation)나 수요 측 관리(demand-side management) 등의 계획을 꾸준히 진행하여 왔다.

최근에는 배전계통의 효율적, 안정적 운용에 대한 필요성이 더욱 크게 부각되고 있으며, 또한 안정적인 전력수급 대책을 확보하거나 에너지 환경의 변화에 대응하기 위하여 배전계통 내에 도입되고 있는 다양한 형태의 분산형 전원(distributed generation)에 대한 논의도 활발하게 진행되고 있다. 이러한 상황에서 분산형 전원을 포함하는 복합배전계통(composite distribution systems)을 효율적으로 운

\* 주저자 : 순천향대학교 정보기술공학부 부교수

Tel : 041-530-1336, Fax : 041-530-1548

E-mail : hongkim@sch.ac.kr

접수일자 : 2004년 12월 21일

1차심사 : 2004년 12월 22일

심사완료 : 2005년 1월 6일

용하기 위한 배전계통 해석 기술의 개발은 필수적인 것이라 할 수 있다.

계통 계획이나 해석을 위한 가장 핵심이 되는 도구는 조류계산이라고 할 수 있으며, 복합배전계통을 위한 조류계산 프로그램의 개발은 시급한 과제이다. 일반적으로, 지금까지 대부분의 조류계산은 송전계통을 주 대상으로 개발된 것으로, 계통의 운용상황이나 구조 등의 차이 때문에 배전계통 특히 분산형 전원이 도입된 복합배전계통에 그대로 적용하기에는 어려움이 따른다.

본 논문에서는 배전계통의 선로구성 형태에 관계없이 모든 배전계통에 적용할 수 있는 범용 조류계산 프로그램을 소개하며, 지금까지 개발된 여러 가지 계통 모델링 기법이나 프로그램 구현 기법을 사용하여 알고리즘을 구현하였다.

개발된 프로그램들의 타당성을 입증하기 위하여 IEEE 14모선 계통을 3상으로 확장한 3상 망상 계통과 3상 불평형 부하와 단상 및 2상 선로를 포함하는 20모선 시험계통을 대상으로 사례연구를 수행하고 그 결과를 정리하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 배전계통 조류계산의 연구동향

일반적인 전력 조류 계산은 송전 계통을 주(主) 대상으로 이루어졌으며, 이때 3상 송전전력이 모두 평형상태이고 부하는 3상 송전선에 고르게 나누어 분포한다고 가정하였다. 또한 3상 평형상태인 계통에 대한 조류계산 연구는 오랜 역사를 가지고 있으며, 실계통에서도 이미 안정된 운용상태를 유지하고 있다[1, 2]. 그러나, 배전 계통의 경우에는 계산하여야 할 변수의 수는 많은 반면 이용 가능한 데이터의 수가 적은 것이 일반적이며, r/x 비율이 높고, 계통 선로들이 짧으며, 모든 선로에 완벽한 연가가 이루어지기는 어렵고, 3상뿐만 아니라 단상이나 2상의 선로가 존재하면서 부하도 3상간의 균등하게 배분되기 어렵다. 또한 계통에 분산형 전원이 존재할 수 있으며, 기존의 조류계산 방법을 배전계통에 그대로 적용하기 힘들기 때문에, 복합배전계통의 계획과 운

영을 위해서는 복합배전계통의 특성을 잘 반영한 특별한 조류계산이 필요하다.

지금까지 배전계통 전력 조류 계산을 위한 여러 가지 알고리즘 및 많은 연구 발표가 있었으며[3~10], 국내의 경우에도 최근 복합배전계통에 대한 관심이 고조되면서 복합배전계통의 조류계산에 관한 연구들이 발표되고 있다[11~12].

### 2.2 계통 모델링 및 프로그램 구현

#### 2.2.1 배전선로 모델링

배전선로는 대부분 3상 가공선로와 지중케이블로 이루어져 있으며, 그 특성상 3상간에 평형상태를 유지하기 어려우므로, 각 상간의 상호 커플링을 고려하여 중성선을 포함한 모든 선로를 선로 모델에 포함시켜야 한다. 그림 1은 3상 4선식 배전계통 선로이며 전압강하에 대한 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Kron 소거법을 사용하여 식 (1)을 3×3 선로 임피던스로 구성된 간략화한 식으로 정리할 수 있고, 중성선은 접지되어 있으므로,  $V_{ng}$ 와  $V'_{ng}$ 는 0이다. 간략화된 식을 정리하면[4], 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (3)과 같은 중성선의 영향을 포함한 선로 임피던스 행렬  $[z_{abc}]$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} [V_{abc}] &= [V'_{abc}] \\ &+ ([z_{ij}] - [z_{in}] \cdot [z_{nn}]^{-1} \cdot [z_{nj}]) \cdot [I_{abc}] \\ &= [V'_{abc}] + [z_{abc}] \cdot [I_{abc}] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$[z_{abc}] = [z_{ij}] - [z_{in}] \cdot [z_{nn}]^{-1} \cdot [z_{nj}] \quad (3)$$

$$[z_{abc}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix}$$

분산형 전원을 포함하는 배전계통을 위한 조류계산 기법 연구

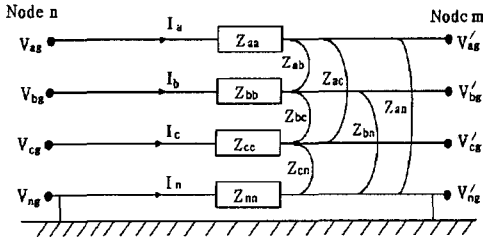


그림 1. 3상 4선식 배전계통  
Fig. 1. Three-Phase Four-wires Distribution System

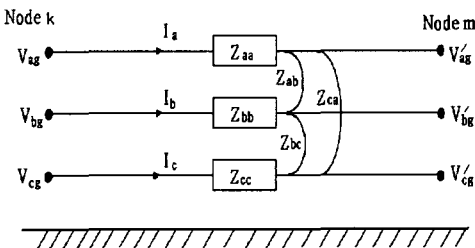


그림 2. 3상 3선식 배전계통  
Fig. 2. Three-Phase Three-wires Distribution System

그림 2와 같은 델타 결선의 경우에는 전압강하 방정식이 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

배전선로의 조류계산에 적용하기 위하여 선로임피던스를 대칭좌표법에 의해 대칭성분으로 분리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} VLG_0 \\ VLG_1 \\ VLG_2 \end{bmatrix} \\ = [A_s] \cdot \begin{bmatrix} VLG_0 \\ VLG_1 \\ VLG_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $a_s = 1.0 \angle 120^\circ$  이다.

대칭성분 전압은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$[VLG_{012}] = [A_s]^{-1} \cdot [VLG_{abc}] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [VLG_{012}]_k &= [A_s]^{-1} \cdot [VLG_{abc}]_k \\ &= [A_s]^{-1} \cdot [VLG_{abc}]_m \\ &\quad + [A_s]^{-1} \cdot [Z_{abc}] \cdot [A_s] \cdot [I_{012}] \\ &= [VLG_{012}]_m + [Z_{012}] \cdot [I_{012}] \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} VLG_{0k} \\ VLG_{1k} \\ VLG_{2k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VLG_{0m} \\ VLG_{1m} \\ VLG_{2m} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $Z_{00}, Z_{11}, Z_{22}$ 는 각각 영상분, 정상분, 역상분 임피던스.

배전선로는 일반적으로 그 길이가 길지 않으므로 선로의 서셉턴스(susceptance)는 무시할 수 있으며, 만약 모선에 shunt capacitor나 reactor가 연결되어 있다면 어드미턴스 행렬의 대각 원소에 그들에 대한 서셉턴스를 더하여 어드미턴스 행렬을 수정하여야 한다.

### 2.2.2 발전기(분산형 전원)와 부하 모델링

배전계통 내에 연결되는 분산형 전원은 총 유효전력 출력이 일정한 전압원(voltage source)으로 모델링한다. 평형 여자전압을 갖는 3상 동기발전기 모델 [5]을 사용하며, 그 구성은 그림 3과 같다. 그림 3은 3상 전원이  $i$  번 모선에 연결되어 있다고 가정한 것으로, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 평형 3상 전압원이 3상 동기 임피던스 행렬  $Z_{sync}$ 를 통해 발전기 모선단자에 연결되는 모델을 사용한다.

발전기의 총 유효전력 출력은 식 (9)과 같이 계산되며,  $a, b, c$  각 상의 단자 전압의 정상분은 식 (10)과 같이 된다. 발전기 내부 전압은 평형상태이므로,  $a$ 상의 전압  $E_{ia}$ 만을 미지변수 벡터에 포함시켜 조류계산 연산을 수행한다.

$$P_i^{spec} = Real \{ V_{abc} \cdot I_i^* \} \quad (9)$$

$$V_i^1 = \frac{1}{3} (V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c) \quad (10)$$

여기서  $V_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]$ ,  $I_i = [I_{ia} \ I_{ib} \ I_{ic}]$ ,  $\alpha = e^{j2\pi/3}$ ,  $V_i^1$ : 정상분 전압

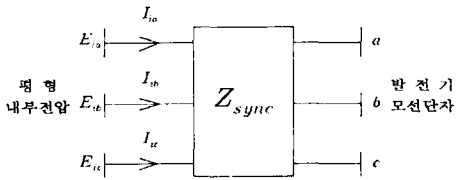


그림 3. 발전기(분산형 전원) 모델  
Fig. 3. Generation(Distributed Generator) Model

각 모선에 접속된 부하는 단상, 2상 및 3상 부하가 있을 수 있으며, 부하의 형태에 따라 전력부하, 전류부하, 임피던스부하 및 이들의 혼합으로 구분할 수 있다. 전력부하는 각 모선에서 각 상별 주입전력의 형태로 표시되는 부하로 유효전력 및 무효전력으로 구분하여 표시한다. 전류부하는 각 상별 전류의 크기와 역률(power factor)로 표시하며, 매 반복연산마다 새로 계산된 모선전압을 이용하여 등가 주입전력으로 변환한다. 임피던스부하는  $\Delta$ , Y 연결에 따라 그 계산 방법이 달라지는데 최종적으로 모두 3×3 어드미턴스 행렬로 모델링한다.

### 2.2.3 변압기 모델링

변압기 탭(tap)은 고정되어 있는 경우와 조정 가능한 탭을 모두 처리할 수 있도록 모델을 구성한다. 변압기는 급전선의 구성에 따라 각 상별로 단상 변압기를 연결하여 사용하거나 3상 변압기를 사용하게 된다. 어느 경우라도, 변압기들은 그 선형 영역에서 동작하는 것으로 가정하고 여자전류는 무시함으로써 모선 어드미턴스 행렬로 모델링한다[5]. 어떤 두 모선 간에 변압기가 연결되어 있고 그 변압기의 어드미턴스 행렬을  $Y$ 로 나타낼 수 있다면, 두 모선에 대한 모선 어드미턴스 행렬은 다음 식 (11)과 같이 쓸 수 있다. 이때, 행렬은 대각 원소의 값이 각 상의 탭 값이 되는 3×3 대각행렬이다.

$$Y = \begin{bmatrix} A^{-1}Y_tA^{-1} & -A^{-1}Y_t \\ -Y_tA^{-1} & Y_t \end{bmatrix} \quad (11)$$

변압기 어드미턴스 행렬  $Y_t$ 는 3상 변압기의 연결구조에 따라 달라지며, 그 내용은 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있다. 2권선 3상 변압기에서 1차측과 2차측 코일의 자기 및 상호 어드미턴스를 각각

$Y_{pp}$ ,  $Y_{ss}$  그리고  $Y_{ps}$ 라고 하면, 서로 커플링된 (mutually coupled) 코일들을 나타내는 어드미턴스 행렬로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

위에서 언급한 바와 같이 변압기의 어드미턴스 행렬은 1차측 코일과 2차측 코일의 결선 방식에 따라 어드미턴스 행렬이 달라진다[5]. 2권선 3상 변압기의 1차측 코일의 off-nominal 탭 비를  $\alpha$ , 2차측 코일의 off-nominal 탭 비를  $\beta$ 라고 하면 자기 어드미턴스 및 상호 어드미턴스는 다음과 같이 수정·보완되어야 한다.

$$Y_{pp}(modify) = \frac{Y_{pp}(exist)}{\alpha^2} \quad (13)$$

$$Y_{ss}(modify) = \frac{Y_{ss}(exist)}{\beta^2} \quad (14)$$

$$Y_{ps}(modify) = \frac{Y_{ps}(exist)}{\alpha \cdot \beta} \quad (15)$$

이러한 모델은 고정 탭을 갖는 변압기는 물론 탭을 조정할 수 있는 전압 조정기에도 그대로 적용할 수 있으며, 이 경우 각 상의 탭은 급전선을 따라 개별적으로 전압을 조정할 수 있도록 독립적으로 고정 가능하여야 한다.

### 2.2.4 소행렬법

3상 전력조류계산에 쓰이는 방정식은 비선형 연립 방정식의 형태로 표현된다. 방정식의 해를 구하기 위해서는 반복적인 연산이 필요하며 이러한 반복 연산 과정에서 상당히 많은 메모리와 연산시간이 필요하므로, 행렬의 원소 중에서 영이 아닌 원소(non-zero element)만을 저장하는 소행렬법을 사용하였다.

저대 송전계통이나, 특히 수지상의 배전계통에서 계통 내 대다수의 모선들은 이웃한 일부 모선들에만 연결되어 있는 형태를 가지며, 따라서 선로 어드미턴스 행렬 및 자코비안 행렬 등은 일부분의 원소만이 0이 아닌 값으로 채워지게 된다. 이러한 성질을 이용

하여 소행렬법을 이용한 연산이 가능한 것이다[13].

### 2.2.5 서열화 개념

조류계산 과정에서 어드미턴스 행렬과 자코비안 행렬을 계산할 때 행렬의 삼각화(triangularity)가 필요하게 되고, 또한 이를 해결하기 위해 여러 가지 방법들이 소개되고 있다. 이 과정에서 생성항(fill-in term)이 발생하게 되며, 이로 인해 소행렬법을 사용하여도 상당히 많은 메모리가 필요하게 되고 계산시간도 증가한다. 소행렬의 삼각화를 하는 과정에서 발생하는 생성항을 줄이기 위해 전력계통의 모선 순서를 조정할 필요가 있고, 이를 위해 모선 서열화 기법을 사용하였다.

## 3. 사례 연구

본 논문에서는 여러 가지 전력계통 조류계산 기법들 가운데 뉴턴-랩슨 반복 연산법을 이용하여 3상 배전계통 조류 계산 연산을 수행하였다. 물론 연산 속도 면에서는 고속분할(fast decoupled power) 법이 가장 빠르고, 수렴특성에서도 단상 계통을 사용하는 송전계통에서는 훌륭한 것으로 검증되었다. 그러나 배전계통의 경우에는 선로가 짧아서 R/X 비가 상당히 높아질 경우가 생기고, 이 경우 고속분할법에서 사용하는 가정에 어긋나기 때문에 정확한 조류계산 결과로 수렴하지 않을 가능성이 많다. 이를 피하기 위해서 고속분할법을 사용하지 않고 뉴턴-랩슨법을 사용하였다.

그림 3의 발전기 모델을 사용하면 각 발전기 단자 모선은 발전기 내부모선(internal bus)에 연결되며, 따라서 발전기 단자 모선은 주입전력이 0인 P-Q모선이 된다. 반면, 발전기 내부모선은 평형 상태를 유지하도록 제한되므로 a상의 전압만을 미지변수로 계산하게 된다.

이러한 방법을 사용하면 P-Q모선에 대하여 3N(N: 모선 수) 개의 전압값과 발전기의 수 만큼에 해당하는 내부모선 전압을 구하게 된다. 이를 위한 조류 계산 방정식은 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\Delta P_l = P^s - P^c(V, \theta) = 0 \quad (16)$$

$$\Delta P_g = P_g^s - P_g^c(V, \theta) = 0 \quad (17)$$

$$\Delta Q_l = Q^s - Q^c(V, \theta) = 0 \quad (18)$$

$$\Delta V = V_g^+ - f(V, \theta) = 0 \quad (19)$$

여기서, P, Q, V는 각각 유효전력, 무효전력, 전압의 크기를 나타내며, 아래 첨자 l 과 g는 각각 부하(load)와 발전(generation)을 의미한다. 위 첨자 s, c, +는 각각 지정값(specified), 계산값(calculated), 정상분(positive sequence)을 의미한다.

### 3.1 입력 데이터

지금까지 전력계통 조류계산 해석을 하기 위한 여러 가지 프로그램들이 있으며, 입력 데이터 형식 또한 다양하다. 본 논문에서 사용한 사례연구의 입력 데이터 형식은 크게 4부분으로 나누어 사용하였다.

발전기 데이터는 모선 번호, 영상분과 정상분의 저항 및 리액턴스를 포함한다. 선로 데이터는 시작 모선, 끝 모선, 회선 수(circuit number), 선로형태(branch type)와 선로 어드미턴스 행렬의 원소 값들로 이루어져있다. 모선 데이터는 상 표시, 모선종류, 전압크기, 위상각, 유효부하, 무효부하, 유효발전량, 무효발전량 등을 사용하였다.

전압 조정기 데이터는 각 상별로 탭(tap)을 조절할 수 있는 3상 변압기로 모델링한 후 확보한 데이터이다. 전압 조정기가 있는 모선과 회선 수, 탭 종류, 어드미턴스 행렬의 원소 값들과 조정모선(controlled bus number), 탭 값, 최소·최대 값, 탭 타입, 최소·최대 전압으로 구성된다.

### 3.2 사례연구 1-3상 당상 계통

단상(single phase)인 IEEE 14모선 계통을 3상으로 확장하여 사용하였고, 선로구성, 발전기, 변압기 등 각각의 구성요소들은 그림 4를 통해 확인할 수 있다.

IEEE 계통은 3상이 평형상태인 송전계통에 대한 데이터로 정상분 데이터가 공개되어 있다. 본 논문에서 개발된 3상 조류계산 프로그램의 사례연구를 위하여 이 계통들을 3상으로 확장하였다.

단상 선로 임피던스 입력 데이터를 등가 3상 입력 데이터로 바꾸기 위하여 영상분(zero sequence) 임피던스는 정상분의 3배로, 그리고 부하는 평형 부하

로 가정하여 조류계산 프로그램의 입력데이터로 사용하였다.

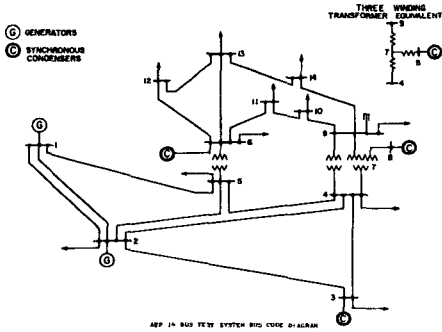


그림 4. IEEE 14모선 계통  
Fig. 4. IEEE 14-bus System

표 1은 IEEE 14모선 계통을 등가 3상 계통으로 변환하여 구성한 시험계통에 대한 조류계산 결과를 정리한 것으로서, 개발된 조류계산 프로그램은 훌륭한 수렴특성을 보였다.

표 1. IEEE 14모선 계통에 대한 3상 조류계산 결과  
Table 1. Three-Phase Voltage Solution for IEEE 14-bus System

모선	$V_a$	$\theta_a$	$V_b$	$\theta_b$	$V_c$	$\theta_c$
1	1.060	0.00	1.060	-120.00	1.060	120.00
2	1.045	-4.96	1.045	-124.96	1.045	115.04
3	1.010	-12.62	1.010	-132.62	1.010	107.37
4	1.026	-10.37	1.027	-130.27	1.026	109.65
5	1.029	-8.91	1.029	-128.91	1.029	111.09
6	1.070	-11.89	1.070	-131.89	1.070	108.10
7	1.054	-11.64	1.055	-131.63	1.053	108.37
8	1.090	-11.60	1.090	-131.59	1.090	108.41
9	1.049	-12.97	1.049	-132.96	1.048	107.04
10	1.045	-13.06	1.046	-133.06	1.044	106.95
11	1.054	-12.61	1.054	-132.61	1.053	107.40
12	1.055	-12.78	1.055	-132.78	1.055	107.22
13	1.049	-12.88	1.050	-132.88	1.049	107.12
14	1.031	-13.94	1.031	-133.93	1.030	106.07

### 3.3 사례연구 2-3상 수지상 배전계통

그림 5와 같은 20모선 수지상 계통을 시험계통으로 구성하여 조류계산 프로그램을 시험하였다. 이 계통은 20개의 모선과 17개의 선로, 두 개의 전압조정기로 구성되었고, 계통 내의 다양한 위치에 분산

형 전원을 투입하여 조류계산 프로그램의 수렴성을 검사하였다. 그림 5는 5번 모선에 3상 분산형 전원을 투입한 경우를 보여주고 있다.

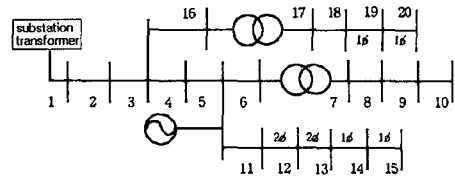


그림 5. 20모선 수지상 시험계통  
Fig. 5. 20-bus Radial Test System

표 2. 20모선 시험계통에 대한 3상 조류계산 결과  
Table 2. Three-Phase Voltage Solution for 20-bus Radial Test System

모선	$V_a$	$\theta_a$	$V_b$	$\theta_b$	$V_c$	$\theta_c$
1	1.050	0.00	1.050	-120.00	1.050	120.00
2	0.940	-14.24	0.930	-133.91	0.944	106.77
3	0.906	-29.05	0.883	-148.72	0.905	93.10
4	0.961	-38.59	0.940	-158.56	0.953	83.35
5	1.045	-45.87	1.028	-166.02	1.032	75.78
6	1.062	-48.26	1.030	-168.92	1.042	73.93
7	1.021	-48.62	1.028	-169.28	1.024	73.65
8	1.036	-50.34	1.035	-170.85	1.036	72.36
9	1.066	-52.03	1.057	-172.42	1.063	71.06
10	1.090	-53.00	1.073	-173.29	1.084	70.46
11	1.046	-48.98	1.007	-168.26	1.027	74.81
12	1.050	-51.31	0.988	-169.66		
13	1.052	-52.90	0.972	-170.35		
14	1.052	-53.61				
15	1.051	-53.94				
16	0.870	-30.58	0.834	-150.08	0.848	92.80
17	0.865	-30.91	0.827	-150.46	0.841	92.73
18	0.863	-32.20	0.813	-151.66	0.857	92.63
19	0.858	-33.03				
20	0.855	-33.40				

계산에 사용된 계통은 실제계통은 아니며, 계통 내에 4개의 단상 선로와 2개의 2상 선로를 구성하고 3상 불평형 부하를 포함시키는 등 불평형 상태의 계통을 인위적으로 구성한 후 프로그램의 수렴특성을 확인하였다. 또한 조류계산 프로그램의 강인성을 확인하기 위하여 상당한 증부하 상태로 계통을 구성하였다.

그림 5와 같이 구성된 계통에 대한 조류계산 결과는 표 2와 같으며, 그 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 실제계통의 운용 상황에서는 보기 어려운 상당한 위상 변화 및 전압강하에도 불구하고 훌륭한 수렴특성을

보이는 것으로 확인되었다. 조류계산 프로그램은 단상선로 및 2상 선로가 포함되어 있거나 불평형 부하가 포함되어 있는 것에 관계없이 거의 일정한 수렴 속도와 반복연산 수를 보이는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

분산형 전원의 배전계통 연계는 사회·경제적인 측면에서 기존의 계통 운용보다 효율적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 분산형 전원을 포함하는 복합 배전계통을 위한 3상 조류계산 프로그램을 뉴턴-랩슨 반복 연산법을 이용하여 구성하였고, 사례연구를 통하여 그 수렴특성을 확인하였다. 각 상별로 탭을 조정할 수 있는 3상 변압기로 전압조정기를 모델링하는 등 배전계통을 구성하는 각종 설비들의 모델을 구성하였고, 소행렬법, 서열화(ordering) 등의 여러 기법들을 사용하여 연산의 효율성을 제고하였다.

개발된 조류계산 프로그램은 배전계통의 수직상 구조를 가정하여 개발된 것이 아니므로 어떠한 구조로 구성된 배전계통이라도 모두 사용이 가능하다. 불평형 선로와 불평형 부하를 포함하고, 상당한 중부하 상태에서 가혹하게 운전되고 있는 상황에서도 훌륭한 수렴특성을 보이는 것을 시험계통에 대한 사례연구를 통해서 확인하였다. 또한 계통 내 다양한 위치에 분산형 전원을 투입한 경우에도 모두 정확한 연산결과를 보임으로써 복합배전계통에 응용이 가능함을 보였다.

개발된 조류계산 프로그램은 다양한 시험계통 및 실계통에 대하여 시험을 계속하는 한편, 그 연산의 효율성을 더욱 제고하여 향후 구축될 배전 SCADA 시스템과 함께 배전계통 운용의 신뢰성을 높이는 데 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 논문에서 활용한 조류해석 기능을 활용하여 전원의 최적위치 선정, 용량결정, 그리고 구조개편과 관련된 계통 운용 등에 사용할 수도 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2003년도 순천향대학교 교수 연구 지원 및 산업자원부의 지원에 의한 기초전력 연구원 과제(관리번호: 01-jung-04)로 수행된 결과임.

#### References

- [1] W. Tinney and C. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 3, pp. 1449-1460, NOV. 1967.
- [2] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 859-869, May/June 1969.
- [3] Fan Zhang, Carol S. Cheng, "A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997.
- [4] William H. Kesting, Distribution System Modeling and Analysis, CRC Press, 2002.
- [5] J. Arrillaga and N. R. Watson, Computer Modeling of Electrical Power Systems, John Wiley & Sons, 2001.
- [6] T. H. Chen, M. S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas and E. chebli, "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991, pp. 1146-1152.
- [7] D. Shirmohammadi, H. Hong, A. Semlyen, and G. Luo, "A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks," IEEE Trans. on Power Systems Vol. 3, pp. 753-762, May 1983.
- [8] Carol S. Cheng, D. Shirmohammadi, "A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995.
- [9] J. Allenong, R. Berron and P. Selent, "Multiphase Power Flow Solutions using EMTP and Newton's Method," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 1455-1463, Nov. 1993.
- [10] P. Garcia, J. Pereira, S. Carneiro, V. Costa, and N. Martins, "Three-Phase Power Flow Calculations using the Current Injection Method," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May. 2000.
- [11] 김태웅, 김재언, "분산전원이 도입된 배전계통의 전압 해석 방법에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 52A-2-1, pp.69-78, 2003.
- [12] 여상민, 김철환, 이종포, "765(KV)변전소 시뮬레이터를 위한 조류계산 프로그램에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 52A-4-2, pp. 201-206, 2003.
- [13] Mariasa Crow, Computational Methods for Electric Power Systems, CRC Press, 2003.

#### ◆ 저자소개 ◆

##### 권형석 (權亨錫)

1973년 1월 25일생. 1998년 순천향대학교 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사).

##### 김홍래 (金鴻來)

1963년 10월 9일생. 1986년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 순천향대학교 정보기술공학부 교수.