

A New Distribution System Power Flow Method Using Symmetrical Components

崔正煥* · 張成一** · 朴濟永*** · 金光鎬§ · 金在彦§§ · 朴鍾根§§§

(Jeong-Hwan Choi, Sung-Il Jang, Jae-Young Park, Kwang-Ho Kim, Jae-Eon Kim, Jong-Keun Park)

Abstract - This paper proposes a new power flow method for distribution system analysis by modifying the conventional back/forward sweep method using symmetrical components. Since the proposed method backward and forward sweeps with the variables expressed by symmetrical components, this method reduces computation time for matrix calculations; therefore, it is able to reduce the computational burden for real-time distribution network analysis. The proposed method was also developed to effectively analyze the unbalanced distribution system installing AVR(Auto Voltage Regulator), shunt capacitors. The proposed algorithm was compared with the conventional Back/forward Sweep method by applying both methods to three phase unbalanced distribution system of IEEE 123-bus model, and the test results showed that the proposed method would outperformed the conventional method in real time distribution system analysis.

Key Words : Distribution system power flow, Symmetrical components, Back/forward sweep method

1. 서 론

조류 계산은 전력 계통의 분석을 위한 매우 중요한 도구로서 전력 계통의 운용 및 계획에 필수적인 기초 자료를 제공하고 있다. 특히 배전계통에 있어서 배전 자동화, 커패시터의 용량의 최적화, 배전선로의 손실 최소화를 위한 최적 구성 등과 같은 과제의 궁극적인 완성을 위해서는 신속하고도 정확한 배전계통의 3상 조류계산 수행이 필요하며 이를 위해 효율적인 조류계산 기법의 개발은 대단히 중요하다.

기존 송전 계통의 조류계산 알고리즘으로 Gauss-Seidel Method, Newton-Raphson method, Fast-decoupled Newton-Raphson method 등이 널리 이용되어 왔다. 그러나, 송전계통과 달리 배전 계통은 일반적으로 방사상의 구조를 갖으며, R/X 비가 상대적으로 높게 나타나기 때문에 기존 송전 시스템에서 사용되던 조류계산 기법을 그대로 적용시키는 것은 효과적이지 않다고 알려져 있다. 근래에 들어서 배전계통의 방사상의 구조에 적합한 알고리즘으로 상전류를 이용한 Back/forward sweep method[3]와 유효·무효 전력을 이용한 Forward sweep method[4]가 개발되어 사용되고 있다. 여기

서 Back/forward sweep method는 방사상 배전계통의 각 Branch의 말단에서부터 전원측으로 Branch의 각 상전류를 역계산(backward sweeping)하고, 다시 전원측으로부터 말단으로 각 노드의 상전압을 계산(forward sweeping)하여, 각 부하의 P, Q와 비교하여 수렴을 판정하는 구조로 되었다. 또한 Forward sweep method는 각 Node의 전압이 상전압, 유효, 무효 전력으로 표현되는 recursive equation을 이용하여 전원측으로부터 말단으로 계속적인 연산(forward sweep)을 수행하는 방법이다. 이와 같은 방법은 방사상 구조를 가지고 있는 배전 시스템의 구조를 효과적으로 활용하고 있기 때문에, 기존의 송전계통의 조류계산 알고리즘을 적용했을 때에 비해 우수한 수렴 특성을 나타내는 장점을 갖고 있다. 그러나 두 가지 방법에 있어서 매 연산시 선로 임피던스 행렬상의 상호임피던스 성분이 모두 계산에 포함되어 있으나, 전압, 전류를 대칭성분으로 변화하여 연산을 한다면, 임피던스 행렬 연산시 대각성분만으로 계산이 가능하기 때문에 기존 방법의 연산시간을 효과적으로 줄일 수 있다고 본 연구에서는 판단되었다.

따라서 본 논문에서는 배전 계통의 방사상의 구조적인 특성에 효과적으로 대응하는 Back/forward sweep 방법의 연산을 채용하고, 각 노드의 전압, 전류, 복소전력 등을 대칭성분으로 변환하여 연산을 수행함으로써, 임피던스 행렬의 연산이 대각성분의 영상, 정상, 역상의 임피던스만의 연산으로 간략화되어 결과적으로 연산량을 줄일 수 있는 새로운 3상 배전계통 조류계산 기법을 제안한다. 제안된 방법은 불평형 계통 해석에 적합한 대칭성분을 이용하여 조류계산을 수행함에 따라 기존의 방법에 비해 선로의 상호 임피던스의 영향, 불평형 부하 등을 효과적으로 처리할 수 있게 되었다. 또한, 제안한 조류 계산 알고리즘에서는 연산의 효율성을 위해 단상과 2상

* 準 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 ** 正 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 *** 準 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程
 § 正 會 員 : 江 原 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博
 §§ 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博
 §§§ 正 會 員 : 世 爾 大 工 大 電 氣 工 學 部 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 2001年 7月 10日
 最 終 完 了 : 2001年 11月 9日

선로에 대해서는 선로의 길이가 비교적 짧다는 가정 하에 전압강하를 무시한 후 단상과 2상 선로에 연결되어 있는 모든 불평형 부하를 3상 노드의 부하로 처리하여 조류계산을 실시한다. 조류계산을 종료되면, 단상과 2상 선로의 노드 전압을 구할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안한 조류계산 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 불평형의 방사상 구조를 갖는 IEEE-123 bus model에 적용하여 기존 상전류를 이용한 Back/forward sweep 방법과 비교하였다. 테스트 결과 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 방법에 비해 보다 우수한 수렴성능을 나타내는 것을 확인하였고, 이를 통해 제안된 방법은 배전자동화에 있어서 필수적인 실시간 배전계통 조류계산에 보다 효과적으로 활용될 수 있음을 입증하였다.

2. 대칭성분을 이용한 3상 배전 계통 조류계산

2.1 기존의 상전류를 이용한 조류계산 알고리즘

배전 계통 조류계산 알고리즘인 상전류를 이용한 Back/forward sweep 방법[3]은 아래와 같고, 여기서 모든 변수는 복소수이다

① 각 노드의 부하에 유입되는 부하 전류를 (1)과 같이 구한다.

$$I_{i,abc}^n = (S_{i,abc}^n / V_{i,abc}^n)^* \quad n=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

여기서, $I_{i,abc}^n$ 는 노드 i 의 부하로 유입되는 a 상, b 상, c 상 전류이며, $S_{i,abc}^n$ 는 노드 i 의 a 상, b 상, c 상 전력이고, $V_{i,abc}^n$ 는 노드 i 의 a 상, b 상, c 상 전압이다.

② Backward sweeping을 통해 선로의 전류는 부하로 유입되는 전류와 이웃하는 선로로 흐르는 전류의 합이 되므로 각상의 선로의 전류를 구한다.

$$I_{B i,abc}^n = I_{L, i-1,abc}^n + \sum_{m \in M} I_{B m,abc}^n \quad (2)$$

여기서, n 은 iteration 수를 나타내며, M 은 $i-1$ 노드에 연결되어 있는 모든 Branch의 수를 나타낸다. 따라서 위 식의 오른쪽에서 두 번째 항은 특정노드에서 선로를 타고 말단쪽으로 흐르는 전류의 총량을 의미한다.

③ Forward sweeping을 통해 노드의 전압을 구한다.

$$V_{i-1,abc}^n = V_{i,abc}^n - Z_{j,abc} I_{j,abc}^n \quad (3)$$

여기서, $Z_{j,abc}$ 는 각 선로 j 의 임피던스이다. 여기서 선로 j 는 노드 i 와 $i-1$ 사이의 선로가 된다.

새롭게 계산된 전압 크기와 이전 단계에서 구한 전압 크기의 차가 허용오차 안에 들어올 때까지 ①, ②, ③를 계속적으로 반복하도록 알고리즘을 구성하였다.

2.2 대칭성분을 이용한 조류계산의 정식화

배전 계통의 간선은 대부분 3상 가공선로와 지중 케이블로 이루어져 있다. 본 연구에서는 배전 선로를 다음 그림 1과 같이 모델링을 하였다. 여기서 선로 임피던스 행렬 $[Z]$ 는 그림 2와 같다. 여기서, V_A, V_B, V_C, V_N 은 송전단의 전압, V_a, V_b, V_c, V_n 은 수전단의 전압, z_{ii} 는 선로 임피던스이며, z_{ij} 는 선로의 상호임피던스를 나타낸다.

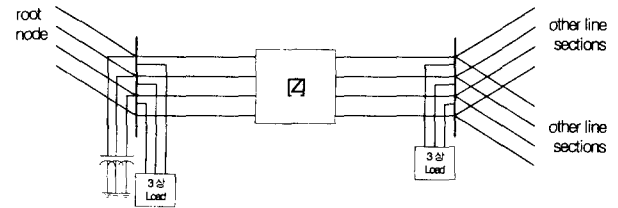


그림 1 배전 시스템에서의 3상 선로 구간

Fig. 1 Three phase line section on distribution system

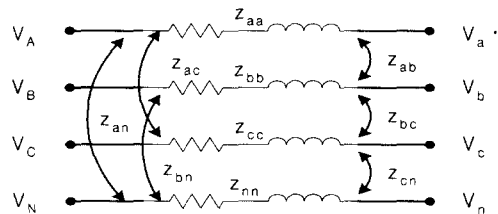


그림 2 선로의 모델

Fig. 2 Line model

그림 3과 같이 선로의 모델이 구성되었을 때, 전압 강하에 대한 방정식은 (4)과 같이 4×4 행렬 방정식으로 구성된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{an} & z_{bn} & z_{cn} & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 (4)의 임피던스 행렬의 원소는 가공선로와 지중선로에 대한 임피던스이며, 가공선로의 경우 Carson 공식[1]을 이용하여 구할 수 있으며, 지중선로에 대해서는 참고문헌 [5]에서 제시한 지중선로 계산법을 이용하여 구할 수 있다.

배전선의 중성선 접지를 고려하여 (4)에서 중성선 전압 $V_{Nn} = 0$ 라고 가정하면 4×4 행렬 방정식을 Kron 소거법[2]을 이용하여 중성선의 영향을 abc 상에 포함시킨 (5)와 같은 축약된 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, Z_{ii} 는 중성선의 영향을 포함하여 새롭게 얻어진 선로 임피던스이며, Z_{ij} 는 중성선의 영향을 포함한 선로간의 상호 임피던스이다.

(5)를 배전선 조류 계산에 적용하기 위해 대칭 좌표법에 의해 변환하여 표현하면 (6)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} [A][V_{012}^{abc}] &= [A][V_{012}^{ABC}] - [Z_{abc}][A][I_{012}] \\ [V_{012}^{abc}] &= [V_{012}^{ABC}] - [A]^{-1}[Z_{abc}][A][I_{012}] \\ [V_{012}^{abc}] &= [V_{012}^{ABC}] - [Z_{012}][I_{012}] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, A는 대칭성분으로 변환시키기 위한 변환 행렬이며, $V_{012}^{abc}, V_{012}^{ABC}$ 는 각각 수전단, 송전단의 영상, 정상, 역상 전압이며, I_{012} 는 영상, 정상, 역상 전류이며, Z_{012} 는 선로의 영상, 정상, 역상 임피던스를 각각 나타낸다.

2.3 대칭성분을 이용한 Back/forward sweep

본 연구에서 제안한 조류계산은 다음에 기술한 3단계로 전개된다. 그림 3은 그림 1의 3상 선로를 (6)에서 나타낸 대칭성분의 전압, 전류에 의해 표현되는 단선도의 형태로 나타낸 것으로 대칭 성분을 이용한 Back/forward sweep 방식의 알고리즘을 설명하기 위해 제시하였다. 본 알고리즘에서는 우선적으로 배전선로에 대해 주어진 데이터를 2.2절에서 기술한 바와 같이 가공선로는 Carson 공식과 Kron 소거법을 이용하고, 지중선로는 참고문헌 [5]의 방법을 이용하여 그림 3과 같은 대칭성분의 회로로 변환하여야 한다.

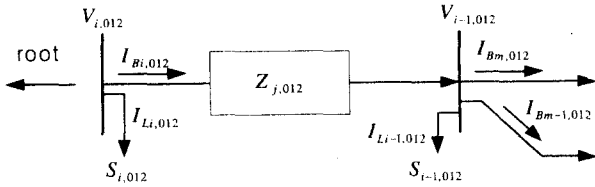


그림 3 대칭성분으로 표현한 선로의 모델
Fig. 3 Line model representing with symmetrical components

여기서, $V_{i,012}$ 은 노드 i 의 대칭분 전압, $I_{B i,012}$ 은 노드 i 와 노드 $i-1$ 사이의 선로의 대칭분 전류, $S_{i,012}$ 은 노드 i 의 부하의 대칭분 전력, $I_{L i,012}$ 은 노드 i 에서 부하로 유입되는 대칭분 전류를 의미한다. 또한 $I_{B m,012}, I_{B m-1,012}$ 은 노드 $i-1$ 에 연결된 선로로 나가는 전류를 나타낸다. 참고로 한 개의 노드에서 여러 가지가 나가는 방사상의 배전계통 구조로 인해, 전압의 인덱스와 전류의 인덱스는 반드시 일치하는 것은 아니나 알고리즘의 이해를 위해 그림과 같이 표기를 하였다.

① 각 노드의 부하로 유입되는 대칭분 전류 계산

첫 번째 단계에서 각각의 노드에서의 대칭성분 전류를 각 Branch의 말단에서부터 Backward로 계산한다. 이때 각 노드에 있어서 부하가 소비하고 있는 복소전력의 대칭성분은 (7)와 같이 정의할 수 있고, 각 노드에서 부하로 유입되고 있는 영상, 정상, 역상 전류는 (8), (9), (10)과 같이 나타내며, 이를 (7)에서 정의한 복소전력의 대칭성분에 대해 정리하면

각 노드에서 부하로 유입되고 있는 영상, 정상, 역상의 대칭성분 전류를 각각 (11), (12), (13)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_{i,0}^n \\ S_{i,1}^n \\ S_{i,2}^n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{i,a}^n \\ \alpha^2 S_{i,b}^n \\ \alpha S_{i,c}^n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$I_{Li,0}^n = \left(\frac{S_{i,a}^n}{V_{i,0}^n + V_{i,1}^n + V_{i,2}^n} + \frac{S_{i,b}^n}{V_{i,0}^n + \alpha^2 V_{i,1}^n + \alpha V_{i,2}^n} + \frac{S_{i,c}^n}{V_{i,0}^n + \alpha V_{i,1}^n + \alpha^2 V_{i,2}^n} \right)^* \quad (8)$$

$$I_{Li,1}^n = \left(\frac{S_{i,a}^n}{V_{i,0}^n + V_{i,1}^n + V_{i,2}^n} + \frac{\alpha^2 S_{i,b}^n}{V_{i,0}^n + \alpha^2 V_{i,1}^n + \alpha V_{i,2}^n} + \frac{\alpha S_{i,c}^n}{V_{i,0}^n + \alpha V_{i,1}^n + \alpha^2 V_{i,2}^n} \right)^* \quad (9)$$

$$I_{Li,2}^n = \left(\frac{S_{i,a}^n}{V_{i,0}^n + V_{i,1}^n + V_{i,2}^n} + \frac{\alpha S_{i,b}^n}{V_{i,0}^n + \alpha^2 V_{i,1}^n + \alpha V_{i,2}^n} + \frac{\alpha^2 S_{i,c}^n}{V_{i,0}^n + \alpha V_{i,1}^n + \alpha^2 V_{i,2}^n} \right)^* \quad (10)$$

$$I_{Li,0}^n = \left(\frac{k_1 S_{i,0}^n + k_2 S_{i,1}^n + k_3 S_{i,2}^n}{k_4} \right)^* \quad (11)$$

$$I_{Li,1}^n = \left(\frac{k_2 S_{i,0}^n + k_3 S_{i,1}^n + k_1 S_{i,2}^n}{k_4} \right)^* \quad (12)$$

$$I_{Li,2}^n = \left(\frac{k_3 S_{i,0}^n + k_1 S_{i,1}^n + k_2 S_{i,2}^n}{k_4} \right)^* \quad (13)$$

여기서, $k_1 = (V_{i,2}^n)^2 - V_{i,0}^n V_{i,1}^n$, $k_2 = (V_{i,0}^n)^2 - V_{i,1}^n V_{i,2}^n$, $k_3 = (V_{i,1}^n)^2 - V_{i,0}^n V_{i,2}^n$, $k_4 = k_1 V_{i,2}^n + k_2 V_{i,0}^n + k_3 V_{i,1}^n$, α 는 $e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ 로 정의하며, $i_{Li,0}^n, i_{Li,1}^n, i_{Li,2}^n$ 은 정전력 부하에 의해 노드 i 에 들어오는 영상, 정상, 역상 전류이며, $S_{i,a}^n, S_{i,b}^n, S_{i,c}^n$ 는 노드 i 의 a상, b상, c상 전력이며, $S_{i,0}^n, S_{i,1}^n, S_{i,2}^n$ 는 노드 i 의 영상, 정상, 역상 전력이며, $V_{i,0}^n, V_{i,1}^n, V_{i,2}^n$ 는 노드 i 의 영상, 정상, 역상 전압을 나타낸다.

② Backward sweeping을 통한 선로의 대칭분 전류 계산

두 번째 단계에서는 노드와 노드사이의 선로를 통해 흐르는 대칭성분 전류를 구하게 된다. 그림 3에서 나타난 것처럼 선로의 전류는 (14)과 같이 부하로 유입되는 전류와 이웃하는 선로로 흐르는 전류의 합이 된다.

$$I_{B i,012} = I_{L i-1,012} + I_{B m,012} + I_{B m-1,012} \quad (14)$$

따라서 말단에서부터 첫 번째 단계에서 구해진 부하 전류를 이용하여 Backward로 모든 선로에서 흐르는 전류를 구할 수 있게 된다. 이 식을 일반화하면 (15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{B\ i,0}^n \\ I_{B\ i,1}^n \\ I_{B\ i,2}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L\ i-1,0}^n \\ I_{L\ i-1,1}^n \\ I_{L\ i-1,2}^n \end{bmatrix} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} I_{B\ m,0}^n \\ I_{B\ m,1}^n \\ I_{B\ m,2}^n \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서, n 은 iteration 수를 나타내며, M 은 $i-1$ 노드에 연결되어 있는 모든 Branch의 수를 나타낸다. 따라서 위 식의 오른쪽에서 두 번째 항은 특정노드에서 선로를 타고 말단쪽으로 흐르는 전류의 총량을 의미한다.

③ Forward sweeping을 통한 노드의 대칭분 전압 계산

세 번째 단계에서는 두 번째 단계와는 반대로 주어진 전원측의 전압을 이용하여 (16)와 같이 각 노드의 전압을 전원측에서부터 말단까지(Forward sweeping) 계산해나간다.

$$\begin{bmatrix} V_{i-1,0}^n \\ V_{i-1,1}^n \\ V_{i-1,2}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{i,0}^n \\ V_{i,1}^n \\ V_{i,2}^n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{j,0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{j,1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{j,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B\ i,0}^n \\ I_{B\ i,1}^n \\ I_{B\ i,2}^n \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $Z_{j,0}$, $Z_{j,1}$, $Z_{j,2}$ 는 각각 선로 j 의 영상, 정상, 역상 임피던스이다. 여기서 선로 j 는 노드 i 와 $i-1$ 사이의 선로가 된다.

새롭게 계산된 전압 크기와 이전 단계에서 구한 전압 크기의 차가 허용오차 안에 들어올 때까지 3가지 단계를 계속적으로 반복하도록 알고리즘을 구성하였다.

2.4 불평형 선로 및 AVR의 처리

A. 단상과 2상 선로

본 알고리즘에서는 연산의 효율성을 위해서 단상과 2상의 선로에 대해서는 선로의 길이가 비교적 짧다는 가정 하에 전압강하를 무시하고 모든 부하를 합하여 이를 연결하고 있는 3상 노드의 불평형 부하로 처리하였다. 그림 4와 같이 3상 노드의 불평형 부하는 (17)와 같이 노드 i 의 부하와 이 노드에 연결되어 있는 단상과 2상의 선로의 부하를 합이다. (18)는 (17)을 일반화하여 나타내었다.

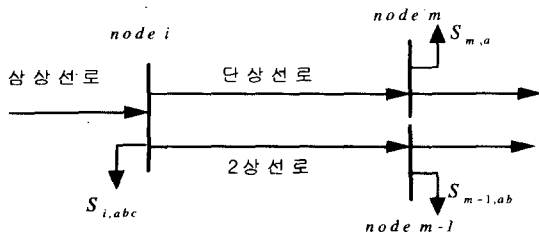


그림 4 3상에 단상과 2상 선로가 연결된 모델
Fig. 4 Three phase Model with single- and double-line

$$S_{i,abc}^i = S_{i,abc} + S_{m,a} + S_{m-1,ab} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} S_{i,a}^i \\ S_{i,b}^i \\ S_{i,c}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{i,a} \\ S_{i,b} \\ S_{i,c} \end{bmatrix} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} S_{m,a} \\ S_{m,b} \\ S_{m,c} \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (18)와 같은 방법을 이용하여 단상과 2상 선로를 모두 포함하고 있는 계통을 3상만의 선로로 재구성한 뒤 모든 3상 선로에 대한 조류계산을 실시한다. 이 조류계산이 끝난 후에는, 해당 단상 및 2상 선로의 임피던스를 고려하여 노드 전압을 계산하도록 하였다. 이러한 방법은 단상과 2상 선로의 연산을 위의 알고리즘 상에 포함하는 것에 비해 연산부담을 상당히 줄이게 되는데, 그 결과 또한 큰 차이가 없음을 테스트를 통해 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 진출한 것처럼 단상과 2상 선로에 연결된 모든 부하를 합하여 불평형 부하로 처리한 후 연산이 완료된 3상 조류계산 결과를 통해 최종적인 선로의 전압, 전류를 구하도록 알고리즘을 구성하였다.

B. AVR(Auto Voltage Regulators)의 처리

배전 계통에서 간선의 전압은 일반적으로 AVR에 의해 조정되며, 이들 AVR은 대개 탭을 가지고 있는 단권 변압기가 사용된다. AVR이 포함된 배전계통을 해석하기 위해 본 연구에서는 AVR를 이상 변압기로서 모델링하고, 전압조정은 LDC (Line Drop Compensation) 기법을 사용하는 것으로 하였다. 그림 5에 LDC 회로와 제어 회로도를 나타내었다.

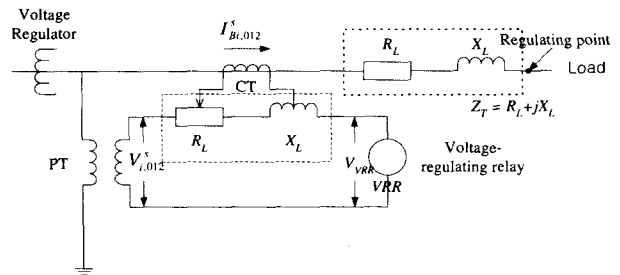


그림 5 LDC 회로와 제어 회로
Fig. 5 Simple schematic diagram of the control circuit and line drop compensator circuit

제안된 알고리즘에서 조류계산시 선로상에 AVR이 존재할 경우에는 우선, 탭 위치를 중간으로 가정하고 2차측 전압을 구한 후, 전압의 크기에서 전압을 조정하고자 하는 지점까지의 전압강하가 전압을 조정하고자 하는 지점에서의 유지전압과의 차이를 이용하여 그 AVR의 탭 위치를 결정한다. 그 변화된 탭 위치에서의 탭 비를 이용하여 2차측 전압을 구한 후, 전압의 크기가 허용 전압 범위 안에 존재하는지를 판단한다. 계산 결과가 허용범위를 벗어 날 경우, 즉 2차측 전압이 유지전압의 최대값 이상일 때에는 최대값으로 설정하고, 최소값 이하일 때에는 최소값으로 설정한 후 연산을 진행한다. (19)은 전압을 조정하고자 하는 지점에서의 전압을 목표 전압과

비교하여 적정 탭의 단계를 정하는 수식이며, (19)에 의해 변화될 탭의 위치에서의 탭 비는 (17)을 이용하여 얻게 된다. (18)은 탭 비에 의해 조정된 전압의 크기가 지정된 전압의 범위 안에 존재하는지를 비교하는 수식이 된다.

$$steps = \frac{|V_{i,012}^s - Z_T I_{Bi,012}^s| - V_{VRR}}{step} \quad (19)$$

$$tap\ ratio_i^{n+1} = tap\ ratio_i^n + steps \times step \quad (20)$$

$$|V^{min}| < |V_{i,012}^s| < |V^{max}| \quad (21)$$

여기서, $|V^{min}|$, $|V^{max}|$ 은 AVR의 2차측에 대한 유지전압 범위이며, $V_{i,012}^s$ 는 AVR의 2차측 전압이다. $steps$ 는 전압이 조정될 최대 $step$ 수를 의미하며, $step$ 은 탭의 간격을 의미한다. Z_T 는 전압을 조정하고자할 지점의 임피던스이며, V_{VRR} 은 AVR이 유지하고자 하는 지점에서의 전압이다.

전술한 것처럼 변화된 탭 비에 의해 전압을 보정한 후에는 다시 *Forward sweep* 방법을 이용하여 각 노드의 전압을 계산하게 된다.

이상과 같이 본 연구에서 제안한 대칭성분을 이용한 3상 배전 계통의 조류계산 기법을 흐름도로 나타내면 다음 그림 6와 같다.

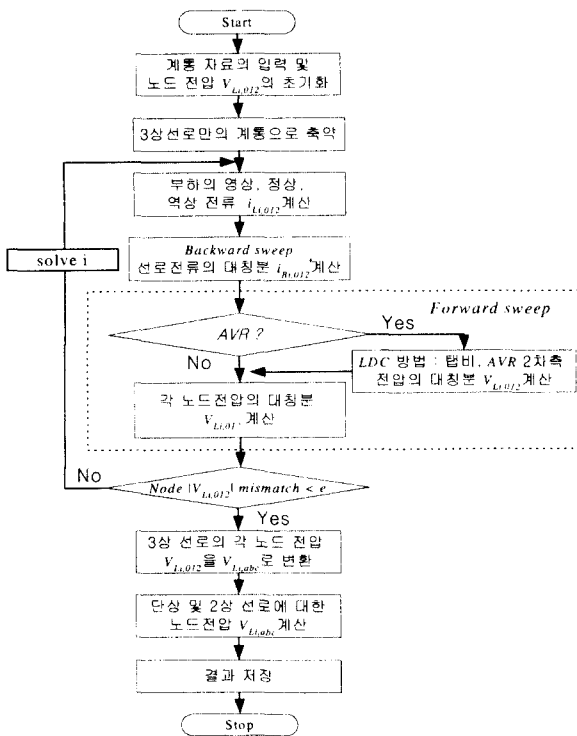


그림 6 본 논문에서 제안한 알고리즘의 흐름도
Fig. 6 Flowchart of the proposed algorithm in this paper

3. 사례연구

3.1 IEEE 123-bus 모델 계통의 선정

본 논문에서는 조류 계산 알고리즘을 검증하기 위해 그림 7과 같은 IEEE 123 bus 모델 계통[2]을 사용하였다.

모델 계통의 배전용 변전소의 변압기는 1차측 3상 단락용량이 1100MVA, 1차측 정격전압이 115kV, 2차측 정격전압이 4.16kV인 Δ -Grounded Y 결선의 변압기로 가정하였다. 변압기의 최대담당부하는 5MVA이며, 각 노드의 부하는 정전력 부하로 가정하였고, 기준 부하 용량은 1.67MVA을 설정하여 각 노드의 부하를 PU값으로 변환하여 연산하였다.



그림 7 IEEE 123-bus 배전 계통 모델
Fig. 7 IEEE 123-bus model

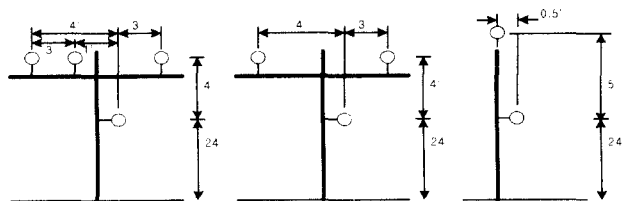


그림 8 모델계통의 선로 spacing
Fig. 8 Line spacing of the test model

선로 데이터는 대부분 3상 선로로 구성되고 일부 단상과 2상 선로도 포함되어 있다. 그림 7에서 보는바와 같이 굵은 실선은 3상 선로, 점선은 2상 선로, 실선은 단상 선로이다. 여기서, 노드번호 60번부터 66번까지는 3상 지중선로이다. 2.2절에서 기술한 것과 같이 표 1의 선로 데이터에 대해 가공선로는 Carson 공식과 Kron's 소거법을 이용하고 지중선로는 참고문헌 [5]을 이용하여 3상 선로의 임피던스 행렬을 구하였다. 이때 선로의 spacing은 그림 8와 같으며, 이 모델 시스템의 R/X 비는 가공선로인 경우 0.2~0.9, 지중선로인 경우 9.923의 비를 갖는다.

표 2는 IEEE 123 node 배전시스템의 노드에 대한 부하 용량이다. 여기서, 노드 번호 8, 13, 152, 54, 57, 67, 72, 89, 91, 93에는 부하가 존재하지 않는다. 또한, 표 3과 같이 3상과 단상 커패시터가 IEEE 123-bus 테스트 모델 계통에 연결되어

있고, 4개의 AVR(Auto Voltage Regulator)이 설치되어 있으며, AVR의 정격은 표 4와 같다^[2]. 이때, AVR은 단상이며, 3상은 단상 AVR 3개를 Y-결선으로 조합하여 모델링하였다.

표 1. 선로데이터

Table 1. Line data

선로(도체)		conductor type		Res (ohm/km)	Dia (m)	GMR (m)	Amp	
가공 선로	3상	상	336,400	ACSR	0.1901	28.3858	0.08001	530
		중성선	4/0	ACSR	0.3679	22.1654	0.02671	340
	2상	상	336,400	ACSR	0.1901	28.3858	0.08001	530
		중성선	4/0	ACSR	0.3679	22.1654	0.02671	340
	1상	상	1/0	ACSR	0.0746	15.6693	0.01463	230
		중성선	1/0	ACSR	0.0746	15.6693	0.01463	230
지중 선로	3상	상	1/0	Cu	0.607	0.368	0.01113	310
		중성선	#14	Cu	14.872	0.064	0.00208	20

표 2. IEEE 123 노드 배전 계통의 노드 부하

Table 2. IEEE 123 node radial distribution system node loads

Node No.	Phase A		Phase B		Phase C	
	kW	kVar	kW	kVar	kW	kVar
1	38.47	19.22	0	0	0	0
2	0	0	19.23	9.61	0	0
4	0	0	0	0	38.47	19.22
5	0	0	0	0	19.23	9.61
6	0	0	0	0	38.47	19.22
7	19.23	9.61	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	38.47	19.22	0	0	0	0
10	19.23	9.61	0	0	0	0
11	38.47	19.22	0	0	0	0
12	0	0	19.23	9.61	0	0
16	0	0	0	0	38.47	19.22
17	0	0	0	0	19.23	9.61
19	38.47	19.22	0	0	0	0
20	38.47	19.22	0	0	0	0
22	0	0	38.47	19.22	0	0
24	0	0	0	0	38.47	19.22
28	38.47	19.22	0	0	0	0
29	38.47	19.22	0	0	0	0
30	0	0	0	0	38.47	19.22
31	0	0	0	0	19.23	9.61
32	0	0	0	0	19.23	9.61
33	38.47	19.22	0	0	0	0
34	0	0	0	0	38.47	19.22
35	38.47	19.22	0	0	0	0
37	38.47	19.22	0	0	0	0
38	0	0	19.23	9.61	0	0
39	0	0	19.23	9.61	0	0
41	0	0	0	0	19.23	9.61
42	19.23	9.61	0	0	0	0
43	0	0	38.47	19.22	0	0
45	19.23	9.61	0	0	0	0
46	19.23	9.61	0	0	0	0
47	34.19	26.46	34.19	26.46	34.19	26.46
48	68.38	52.91	68.38	52.91	68.38	52.91

표 2. IEEE 123 노드 배전 계통의 노드 부하 (계속)

Table 2. IEEE 123 node radial distribution system node loads (continue)

Node No.	Phase A		Phase B		Phase C	
	kW	kVar	kW	kVar	kW	kVar
49	34.19	26.46	68.38	52.91	34.19	26.46
50	0	0	0	0	38.47	19.22
51	19.23	9.61	0	0	0	0
52	38.47	19.22	0	0	0	0
53	38.47	19.22	0	0	0	0
55	19.23	9.61	0	0	0	0
56	0	0	19.23	9.61	0	0
58	0	0	19.23	9.61	0	0
59	0	0	19.23	9.61	0	0
60	19.23	9.61	0	0	0	0
62	0	0	0	0	38.47	19.22
63	38.47	19.22	0	0	0	0
64	0	0	76.93	38.44	0	0
65	34.19	26.46	34.19	26.46	68.38	52.91
66	0	0	0	0	76.93	38.44
68	19.23	9.61	0	0	0	0
69	38.47	19.22	0	0	0	0
70	19.23	9.61	0	0	0	0
71	38.47	19.22	0	0	0	0
73	0	0	0	0	38.47	19.22
74	0	0	0	0	38.47	19.22
75	0	0	0	0	38.47	19.22
76	102.57	79.37	68.38	52.91	68.38	52.91
77	0	0	38.47	19.22	0	0
79	38.47	19.22	0	0	0	0
80	0	0	38.47	19.22	0	0
82	38.47	19.22	0	0	0	0
83	0	0	0	0	19.23	9.61
84	0	0	0	0	19.23	9.61
85	0	0	0	0	38.47	19.22
86	0	0	19.23	9.61	0	0
87	0	0	38.47	19.22	0	0
88	38.47	19.22	0	0	0	0
90	0	0	38.47	19.22	0	0
91	0	0	0	0	0	0
92	0	0	0	0	38.47	19.22
94	38.47	19.22	0	0	0	0
95	0	0	19.23	9.61	0	0
96	0	0	19.23	9.61	0	0
98	38.47	19.22	0	0	0	0
99	0	0	38.47	19.22	0	0
100	0	0	0	0	38.47	19.22
102	0	0	0	0	19.23	9.61
103	0	0	0	0	38.47	19.22
104	0	0	0	0	38.47	19.22
106	0	0	38.47	19.22	0	0
107	0	0	38.47	19.22	0	0
109	38.47	19.22	0	0	0	0
111	19.23	9.61	0	0	0	0
112	19.23	9.61	0	0	0	0
113	38.47	19.22	0	0	0	0
114	19.23	9.61	0	0	0	0
sum	1369.85	759.43	888.98	519.17	1119.81	634.49

표 3 IEEE 123 버스 방사상 배전선 피더의 커패시턴스
Table 3 IEEE 123 bus radial distribution feeder shunt capacitors

Node No.	Phase A	Phase B	Phase C
	kVAR	kVAR	kVAR
83	200	200	200
88	50	0	0
90	0	50	0
92	0	0	50

표 4 모델 계통의 AVR 정격
Table 4 AVR rating of the test model

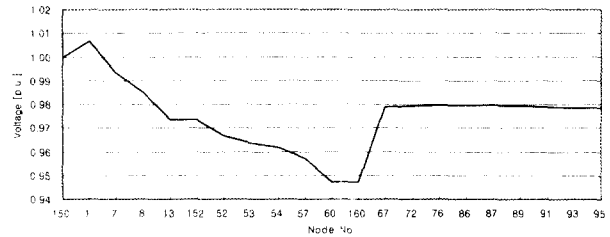
id	상	위치	BW	PT 비	CT 비	R 설정치	X 설정치	Voltage level
1	A	150-1	2	20	700	3.0	7.5	120
2	A	9-14	1	20	50	0.4	0.4	120
3	A	25-26	1	20	50	0.4	0.6	120
	C					0.6	0.4	
4	A	160-67	2	20	300	0.6	1.3	124
	B					1.4	2.6	
	C					0.2	1.4	

3.2 조류계산의 비교 테스트 결과

앞 절에서 기술한 모델 계통을 대상으로 본 논문에서 제시한 대칭성분을 이용한 배전선 조류 계산 알고리즘과 기존의 상전류를 이용한 Back/forward sweep 방법을 비교하였다.

본 논문에서는 알고리즘을 수행하기 위해 Matlab을 이용하여 기존 방법과 본 논문에서 제안한 대칭성분을 이용한 3상 배전선 조류계산 알고리즘을 각각 구현하였다. 그림 9은 대표적으로 테스트 배전 계통의 가장 긴 선로를 갖는 feeder A에 대해 계산한 결과를 나타낸 것으로 그림 9(a)는 기존 방법의 계산 결과이며, 그림 9(b)는 제안된 방법의 계산 결과이다. 그림을 살펴보면 노드 번호 150과 1 사이와 160과 67 사이에 AVR이 존재하므로 이때 전압 상승을 가져 왔으며, 노드 번호 67 이후의 노드에서는 노드 번호 88과 83에 병렬로 연결되어 있는 커패시터 뱅크의 영향과 적은 부하 용량, 짧은 선로 길이로 인해 전압 강하가 적게 나타났다. 또한 그림에서는 편의상 3상 선로의 A상 전압만을 나타내었고, 그림에서 알 수 있듯이 제안한 방법과 기존의 방법의 결과가 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Feeder A에 대한 전압강화(대칭성분 이용 Back/Forward sweep method)



(b) 대칭성분을 이용한 Back/Forward sweep method : 제안한 방법

(a) Back/Forward sweep method using symmetrical components : conventional method

그림 9 Feeder A에서 기존방법(a)과 제안한 방법(b)의 조류 계산 결과 비교

Fig. 9 Power flow result comparison of conventional method(a) and proposed method(b) in the feeder A

표 5는 feeder A의 조류계산에 대한 전압을 나타내며, 표 6은 feeder A의 선로에서의 손실을 나타낸다.

표 5 Feeder A에 대한 조류계산 결과
Table 5 Power flow result of feeder A

Node No.	Phase A		Phase B		Phase C	
	V [p.u.]	deg.	V [p.u.]	deg.	V [p.u.]	deg.
150	1.000	0.000	1.000	-120.001	1.000	120.001
1	1.007	-1.280	0.990	-120.907	0.986	118.933
7	0.993	-2.240	0.983	-121.587	0.977	118.181
8	0.985	-2.887	0.978	-122.047	0.972	117.670
13	0.974	-3.806	0.971	-122.722	0.963	116.891
152	0.974	3.806	0.971	-122.722	0.963	116.892
52	0.967	-4.572	0.967	-123.345	0.958	116.235
53	0.963	4.942	0.965	-123.657	0.955	115.902
54	0.962	-5.162	0.964	-123.852	0.954	115.693
57	0.957	-5.766	0.961	-124.382	0.950	115.104
60	0.947	-7.083	0.956	-125.454	0.941	113.832
160	0.947	-7.082	0.956	-125.454	0.941	113.832
67	0.979	-7.597	0.984	-125.852	0.980	113.418
72	0.979	-7.809	0.984	-126.078	0.980	113.175
76	0.980	-7.958	0.984	-126.245	0.981	113.055
86	0.980	-8.101	0.982	-126.498	0.982	112.958
87	0.979	-8.193	0.982	-126.640	0.982	112.898
89	0.979	-8.214	0.981	-126.701	0.983	112.861
91	0.979	-8.234	0.981	-126.721	0.983	112.831
93	0.979	-8.251	0.981	-126.744	0.983	112.830
95	0.979	-8.251	0.980	-126.770	0.983	112.829

표 6 Feeder A에 대한 전체 선로 손실
Table 6 Total line loss of feeder A

	Phase A(kW)	Phase B(kW)	Phase C (kW)
Line Loss	47.21	23.13	33.01

(a) 상전류를 이용한 Back/Forward sweep method : 기존방법
(a) Back/Forward sweep method using phase currents : conventional method

다음으로 연산 속도에 대해서 살펴보았다. 표 7은 제안된 방법과 기존의 방법이 수렴에 필요했던 반복 횟수 및 연산 시간을 나타낸 것이다. 수렴기준은 모든 노드의 전압 변화치가 1×10^{-4} 이하가 되도록 정하였다.

표 7에서 나타나듯이 기존의 상전류를 이용하는 Back/forward sweep 방식에 비해 본 연구에서 제안된 대칭성분을 이용한 조류계산 방법이 수렴 속도면에서 34.46% 정도 빠름을 알 수 있었다. 따라서 제안된 대칭성분을 이용한 3상 조류계산 기법은 기존 방법과는 거의 동일한 계산 결과를 내면서, 연산속도는 대폭 향상시킴으로써 배전계통 조류계산에 있어 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주었다.

표 7 기존 방법과 제안한 방법의 연산 속도 비교
Table 7 Comparison of computational speed between the proposed method and the conventional method

	iteration 수(회)	수렴시간(초)
Back/forward sweep	43	2.063
제안된 방법	38	1.352

4. 결 론

본 논문에서는 배전 시스템의 구조적인 특성을 이용한 Back/forward sweep 방식을 채택하였고, 배전 선로의 상호 임피던스, 불평형 운전 등을 효과적으로 처리할 수 있도록 대칭 성분을 이용한 새로운 조류 계산 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 각 노드의 전압, 전류, 복소전력 등을 대칭성분으로 변환하여 연산을 수행함으로써, 선로 임피던스를 대칭성분으로 변환하여 행렬의 비대각성분인 상호 임피던스를 행렬의 대각성분에 포함시킴으로써 행렬의 연산이 대각성분의 영상, 정상, 역상의 임피던스만의 연산으로 가능하도록 하여 연산량을 상당히 줄일 수 있다는 장점을 갖는다. 또한, 본 연구에서는 배전계통상의 AVR과 단상, 2상의 선로가 포함된 계통에 대해서도 효과적으로 조류계산을 수행할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. IEEE 123-bus 배전계통 모델에 대해서 수행한 비교 테스트에서도 제안된 기법이 기존의 Back/forward sweep 방법에 비해 수렴 속도면에서 우수함을 나타내었다. 따라서 제안된 기법은 향후 배전계통 조류계산에 있어서 효과적으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

[1] William H. Kersting, W. Howard Phillips, "Distribution Feeder Line Models", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, No. 4, July/August 1995
 [2] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders," IEEE Transaction on Power Systems, Vol.6, No. 2, August 1991
 [3] Carol S. Cheng, Dariush Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," IEEE transactions on power systems, Vol. 10, No. 2, May 1995

[4] D. Das, H.S. Nagi, D.P. Kothari, "Novel method for solving radial distribution networks", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 141, No.4, July 1994
 [5] John Wiley and Sons, "Circuit Analysis of AC Power Systems, Vol. II", New York, 1950

저 자 소 개



최 정 환(崔正煥)

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 033-250-6290, Fax : 033-241-3775
 E-mail : jhchoi@mirae.kangwon.ac.kr



장 성 일(張成一)

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 033-250-6290, Fax : 033-241-3775
 E-mail : sijang@mirae.kangwon.ac.kr



박 재 영(朴濟永)

1975년 7월 18일생. 2001년 강원대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : 033-250-6290, Fax : 033-241-3775
 E-mail : bluenext@netsgo.com



김 광 호(金光鎬)

1966년 1월 17일생. 1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 1995년~현재 강원대 전기전자정보통신공학부 부교수
 Tel : 033-250-6298, Fax : 033-241-3775
 E-mail : khokim@cc.kangwon.ac.kr

김 재 언(金在彦)

전기학회논문지 제 49권 제 7호 참조

박 종 근(朴鍾根)

전기학회논문지 제 49권 제 11호 참조