

**Symmetrical Components를 이용한 배전계통 3상 조류 계산 알고리즘 개발**

최정환\*, 장성일\*, 김광호\*, 박종근\*\*, 김재언\*\*\*  
 \*강원대학교 전기공학과, \*\*서울대학교 전기공학부, \*\*\*충북대학교 전기공학과

**Development of 3 phase Power Flow calculation algorithm in distribution Power Systems using Symmetrical Component**

J.H. Choi\*, S.I. Jang\*, K. H. Kim\*, J. K. Park\*\*, J.E. Kim\*\*\*  
 \*Kangwon National Univ., \*\*Seoul National Univ., \*\*\*Chongbuk National Univ.

**Abstract** - This paper describes a power flow method for distribution systems, applying the method of symmetrical component to back/forward sweep method. The proposed algorithm is effective for unbalanced radial distribution system, with process of distributed resource(PQ & PV node), AVR(Auto Voltage Regulator), shunt capacitor. This proposed method compared conventional back/forward sweep method with the using three phase unbalanced distribution systems with 34 nodes.

단상 선로가 말단에 구성되어 있다. 배전 시스템의 3상 조류계산 알고리즘 적용에 있어 그림 1과 같이 배전 계통의 line section이 있을 때, 선로에 대한 모델은 아래 그림2와 같이 구성된다.

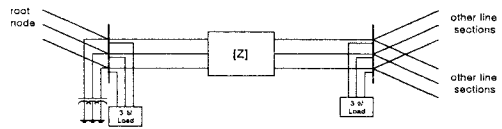


그림 1 three-phase line section

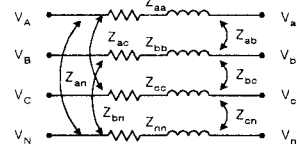


그림 2 선로의 모델링

**1. 서 론**

배전 시스템은 송전 시스템과는 달리 기본적으로 방사상의 구조(radial structure)를 갖으며, R/X ratio가 상대적으로 높게 나타난다. 따라서 기존 송전 시스템의 조류계산에서 사용되던 Newton-Raphson method나 Fast-decoupled method를 배전 시스템 조류 계산에 적용시키는 것은 효과적이지가 않다. 이에 따라 배전 시스템의 구조적인 특성을 이용한 back/forward Sweep 방법이 배전 시스템 조류 계산에 매우 효과적인 접근 방식이라고 여겨진다.

그림 2와 같이 선로의 모델이 구성되었을 때, 선로에 대한 전압 강하에 대한 방정식은 식 1과 같이 4×4 행렬 방정식으로 구성된다.

본 연구에서는 기본적인 back/forward sweep 방식을 채택하고, 배전 선로의 상호 임피던스, 불평형 운전 등을 효과적으로 처리할 수 있도록 대칭 성분을 이용한 새로운 조류 계산 알고리즘을 제안한다. 정상, 역상, 영상 성분의 전류에 대해 back/forward sweep 방법을 적용하여 제안된 본 조류계산 알고리즘은 Unbalanced Radial Distribution Systems의 해석에 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 본 연구에서는 분산전원(PQ 및 PV node), 불평형 부하, AVR, Shunt Capacitance에 대한 처리가 가능하도록 알고리즘을 개발하였다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 알고리즘은 3상 조류 계산시, 선로의 상호 임피던스의 영향으로 인한 coupling을 대칭 좌표법을 이용하여, 영상, 정상, 역상으로 3상을 decoupling하기 때문에 연산 부담을 상당히 줄일 수 있으며, 특히 분산 전원, AVR 처리에 있어서는 정상 성분만을 고려하기 때문에 3상 모두 계산하는 기존의 back/forward 방법에 비해 많은 장점을 가지고 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 1의 임피던스 행렬의 원소는 Carson's 방정식[1]에 의해 구했으며, 이 4×4 행렬 방정식을 3×3 행렬 방정식으로 바꾸기 위해 Kron's 소거법[2]를 이용하였다.

위의 전압 강하에 관한 식 2를 배전선 조류 계산에 적용하기 위해 대칭 좌표법에 의해 변환하여 표현하면, 식 3과 같다.

$$\begin{aligned} [A][V_{012}^{-1}] &= [A][V_{012}^i] - [Z_{abc}][A][I_{012}] \\ [V_{012}^{-1}] &= [V_{012}^i] - [A]^{-1}[Z_{abc}][A][I_{012}] \\ [V_{012}^{-1}] &= [V_{012}^i] - [Z_{012}][I_{012}] \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서는 3상 불평형 34bus의 배전 시스템에 대해 제안된 알고리즘과 기존 back/forward sweep 방법을 비교하여 그 성능을 평가하였다.

Symmetrical component로 back/forward sweep method를 배전 계통의 조류 계산에 적용하기 위해 그림 3과 같이 radial 계통을 나타내었다.

그림 3에서 root node을 전압의 크기와 위상을 알고 있는 Slack node라하고 다른 node은 같은 전압의 크기와 위상을 갖도록 초기 값을 지정한다. radial 시스템의 조류 계산을 하기 위한 알고리즘은 3단계로 구성한다.

**2. 본 론**

**2.1 Symmetrical Components를 이용한 배전 계통 조류계산**

배전 시스템의 primary feeder는 대부분 3상 가공선로와 지중 케이블로 이루어져 있으며, 약간의 2상 또는

첫 번째 단계에서 각각의 노드에서의 전류를 식 4의 방법으로 구한다.

$$\begin{bmatrix} I_{i1}^{(k)} \\ I_{i2}^{(k)} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \left( \begin{bmatrix} (S_{ia}/V_{ia}^{(k-1)})^* \\ (S_{ib}/V_{ib}^{(k-1)})^* \\ (S_{ic}/V_{ic}^{(k-1)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* \\ Y_{ib}^* \\ Y_{ic}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ia}^{(k)} \\ V_{ib}^{(k)} \\ V_{ic}^{(k)} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

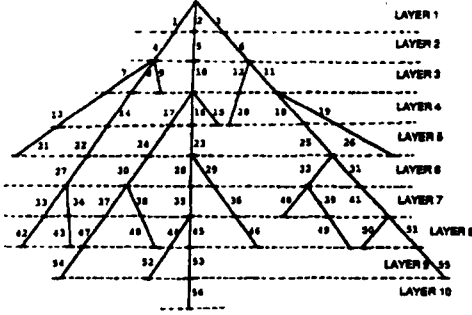


그림 3 Radial distribution network

여기서,  $I_{i0}, I_{i1}, I_{i2}$ 은 정전력 부하와 shunt 소자에 의해 node i에 들어오는 영상, 정상, 역상 전류이며,  $S_{ia}, S_{ib}, S_{ic}$ 는 node i의 부하 용량이며,  $V_{ia}, V_{ib}, V_{ic}$ 는 node i의 전압을 나타내며,  $Y_{ia}, Y_{ib}, Y_{ic}$ 은 node i에서의 shunt 소자를 나타낸다.

두 번째 단계에서 node와 node사이의 branch에서의 대칭 성분의 전류를 backward sweep method를 이용하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} I_{jBra-0}^{(k)} \\ I_{jBra-1}^{(k)} \\ I_{jBra-2}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{i0}^{(k)} \\ I_{i1}^{(k)} \\ I_{i2}^{(k)} \end{bmatrix} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} I_{mBra-0}^{(k)} \\ I_{mBra-1}^{(k)} \\ I_{mBra-2}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $I_{jBra-0}, I_{jBra-1}, I_{jBra-2}$ 은 node와 node 사이의 영상, 정상, 역상 전류의 크기를 나타낸다.

마지막 단계에서는 node와 node사이의 전압강하를 계산하여 각각의 node의 전압과 위상각을 구하기 위해 forward sweep method를 이용하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} V_{(i-1)0}^{(k)} \\ V_{(i-1)1}^{(k)} \\ V_{(i-1)2}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{i0}^{(k)} \\ V_{i1}^{(k)} \\ V_{i2}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(j)Bra-0}^{(k)} \\ I_{(j)Bra-1}^{(k)} \\ I_{(j)Bra-2}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

전압의 크기가 이전 단계에서 구한 전압의 크기와 비교하여 허용오차 안에 들어올 때까지 위 세 단계를 계속 반복하여 계산한다.

## 2.2 분산전원에 대한 처리

배전 계통내에 태양광 발전, 열병합 발전, 풍력 등의 여러 가지 종류의 분산자원(Distributed Resources)들이 존재한다. 또한, 이들 분산전원이 배전 계통내에 미치는 조류의 영향을 알아보기 위해 조류계산 알고리즘에 모델링을 추가해야 한다. 이들 분산전원은 배전 계통내에서 다음과 같은 모드로서 역할을 담당한다.

고정된 유효, 무효 전력을 공급하는 형태와 지정된 역률을 전력을 출력하는 형태, 지정된 전압에 전력을 공급하는 형태로서 역할을 담당하고 있으며, 처음 두 가지는 PQ node로서 처리가 가능하며, 마지막은 PV node로서 처리한다. PV node로서 처리하기 위해 다음과 같은 순서로 PV node를 처리한다. 공급되는 무효전력은 3상 동일하므로 공급되는 전압의 크기 동일하다. 따라서, 정상 성분의 전압만을 고려하면 된다. 전류는 부하 측에서 볼 때, 진상이므로  $90^\circ$  위상이 앞선 것으로 표현하여

나타낸다.

첫 번째 단계에서는 지정된 전압과 forward sweep method에 의해 계산 전압의 크기의 차를 구한다.

$$\Delta V = V_{sp} - V_i \quad (7)$$

여기서,  $V_i$ 는 정상 전압을 나타낸다.

두 번째 단계에서는 보상되어질 전류의 크기  $I_q$ 을 구한다.

$$[Z_V][I_q] = [\Delta V] \quad (8)$$

$$I_{i1}^{(q)} = |I_{i1}|^{(q)} e^{j(90^\circ + \delta_i^{(q)})} \quad (9)$$

여기서, 임피던스 행렬  $[Z]$ 의 대각행렬은 PV bus에서 root bus까지 정상 impedance의 합이며, 비대각행렬은 PV bus i과 PV bus j가 root bus까지의 공통 path상의 정상 impedance 합이다.

세 번째 단계에서는 PV node에 대한 필요한 무효전력을 계산한다.

$$Q_{iq}^* = Q_i^* + Q_{id} \quad (10)$$

$$Q_i^{(q)} = 3 \times \text{Im}[(V_{i0} I_{i0}^{(q)})^* + (V_{i1} I_{i1}^{(q)})^* + (V_{i2} I_{i2}^{(q)})^*]$$

여기서,  $I_{i1}^{(q)}$ 는  $I_{i1}^{(q)}, I_{i2}^{(q)}$ 의 합이다.

마지막으로 분산전원에서 공급할 수 있는 무효전력의 크기  $Q_{iq}$ 을 비교한다.

$$Q_{iq}^{\min} < Q_{iq}^* < Q_{iq}^{\max} \quad (11)$$

본 논문에서 제안한 배전 계통의 조류 계산 알고리즘의 전체 흐름도는 그림 4와 같다.

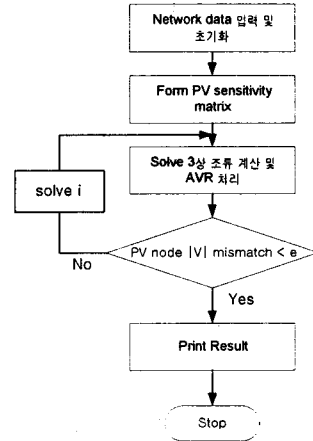


그림 4. 본 논문에서 제시한 알고리즘의 전체 흐름도

## 2.3 Voltage Regulators의 모델링

배전 계통에서 primary feeder의 전압은 AVR에 의해 조정되며, 이들 AVR은 대개 Tap을 가지고 있는 단권 변압기이다. 본 논문에서는 이 AVR을 이상 변압기로서 모델링하였으며, 이에 대한 처리과정은 아래와 같이 서술하였다.

첫 번째 단계에서는 초기 tap position을 중간 tap position에 두고 tap position의 tap ratio에 의한 2차측 전압을 식 7와 같이 구하고, 그 전압의 크기가 지정된 전압의 범위 안에 존재하는지 비교한다.

$$|V_s^{\min}| < |V_s^{(k)}| < |V_s^{\max}| \quad (12)$$

여기서,  $|V_s^{\min}|, |V_s^{\max}|$ 은 secondary bus에서의 유지시켜야 하는 전압의 범위이며, 2차측의 전압은 3상 평형하도록 유지되므로 영상, 역상 전압은 나타나지 않는다. 두 번째 단계에서는 2차측 전압이 만약 upper limit보다 클 경우, 새로운 tap ratio를 계산하고 계산된 값과 유사한 tap 위치로 tap을 변환하고, 2차측 전압이 low limit보다 작을 경우에 대해서도 마찬가지로 새로운 tap 비를 구한 다음 그 값과 유사한 tap 위치로 tap을 변환시킨다. 마지막으로 새로운 tap position 설

정하여 계산된다.

### 3. 사례 연구

본 논문에서는 조류 계산 알고리즘을 검증하기 위해 34 bus(2)에 대한 배전 계통을 선택하였고, 본 논문에서 제시한 symmetrical component를 이용한 배전선 조류 계산 알고리즘과 기존의 3상 전류를 이용하는 Back/Forward sweep 방법으로 아래의 배전 계통을 테스트하였다.

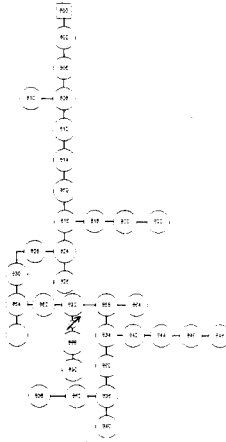


그림 5 34 node를 가진 배전 계통

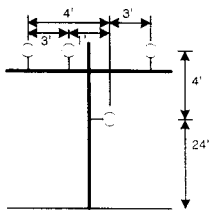


그림6. 본 논문에서 사용된 선로의 spacing

위 34 node의 배전 계통은 24.9kV, 단락용량 2,500kVA인 배전 계통이며, 이 배전 계통의 선로 데이터는 3상 4선식으로 그림 6과 같은 spacing을 가지며, 선로의 데이터는 표 1과 같다. 또한 각 node마다의 거리는 다르다. 각 버스의 부하는 정전력 부하이다. 부하용량은 2.5MVA을 기준으로 설정하여 PU값으로 나타내었다. AVR은 Y-결선으로 연결된 단상 Regulator이며, Shunt Capacitor는 3상 평형하게 node 844와 node 848에 각각 100 kVAR, 150 kVAR가 3상 평형하게 연결되어 있다. main feeder의 총 길이는 약 58km이다[2]. 제시한 배전 계통을 가지고 기존의 3상 전류를 이용한 back/forward sweep 방법과 제안된 방법에 대한 결과는 표 2과 같다.

표 1. 선로의 데이터

conductor type	Res.(ohm.mi)	Dia.(in)	GMR(ft)	Amp	
336.400	ACSR	0.306	0.721	0.02440	530

표 2. 기존의 방법과 제안한 방법과의 비교

	말단 전압 변화	수렴횟수	수렴 속도
기존의 방법	0.85-0.90[p.u]	33	0.8700
제안한 방법	0.85-0.90[p.u]	18	0.4400

기존의 3상 전류를 이용하는 Back/Forward sweep method과 본 논문에서 제안한 방법을 비교하면, 표에서 보는 것과 같이 본 논문에서 제시한 방법이 기존의 방법보다 수렴속도가 더 빠르고 수렴횟수 또한 더 적으며, 3상 전류를 이용하는 방법보다는 본 논문에서 제시한 방법이 더 우수함을 알 수 있었다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 기본적인 back/forward sweep 방식을 채택하고, 배전 선로의 상호 임피던스, 불평형 운전 등을 효과적으로 처리할 수 있도록 대칭 성분을 이용한 새로운 조류 계산 알고리즘을 제안하였다. 정상, 역상, 영상 성분의 전류를 대해 back/forward sweep 방법을 적용하여 제안된 본 조류계산 알고리즘은 Unbalanced Radial Distribution Systems의 해석에 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 본 연구에서는 분산전원 (PQ, PV node), AVR, Shunt Capacitance에 대한 처리가 가능하도록 알고리즘을 개발하였다.

본 알고리즘은 3상 조류 계산시, 선로의 상호 임피던스의 영향으로 인한 coupling을 대칭 좌표법을 이용하여, 영상, 정상, 역상으로 3상을 decoupling하기 때문에 연산 부담을 상당히 줄일 수 있으며, 특히 분산 전원, AVR 처리에 있어 정상 성분만을 고려하기 때문에 3상 모두 계산하는 기존의 Back/Forward 방법에 비해 많은 장점을 가짐을 알 수 있었다.

본 논문에서는 3상 불평형 34bus의 배전 시스템에 대해 제안된 알고리즘과 기존 Back/Forward Sweep 방법보다 좀더 빠른 수렴 속도를 나타내었다. 향후에는 배전 계통 내에서 사용하고 있는 다양한 기기들에 대한 모델링 및 처리 방법에 대해 연구할 예정이다.

### (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] X. P. Zhang, W.J. Chu, H.Chen, "Decoupled asymmetrical three-phase load flow study by parallel processing", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol 143, No. 1, January 1996