

대칭성분을 이용한 배전계통 조류 계산 알고리즘 개발

최정환*, 정종찬*, 김광호*, 박종근**, 김재언***
 *강원대학교 전기공학과, **서울대학교 전기공학부, ***충북대학교 전기공학과

Development of Power Flow calculation algorithm in distribution Power Systems using Symmetrical Components

J.H. Choi*, J.C. Jeong*, 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 AVR(Auto Voltage Regulator), shunt capacitor. The proposed method was compared with the conventional Back/forward sweep method by using three phase unbalanced distribution systems of 123 nodes.

1. 서 론

조류 계산은 전력 계통의 분석을 위한 매우 중요한 도구로써 전력 계통의 운용 및 계획에 기초 자료로 사용되고 있다. 배전 자동화와 전력계통의 최적화와 같은 응용 분야에서는 반복적인 조류계산이 필요하며 보다 정확하고 효율적으로 조류계산 문제를 해결하는 것이 매우 중요하다.

송전 시스템에서의 조류계산 알고리즘은 Newton-raphson method와 Fast-decoupled method가 이용되고 있다. 그러나, 배전 시스템은 송전 시스템과는 달리 기본적으로 방사상의 구조를 갖으며, R/X 비가 상대적으로 높게 나타나기 때문에 기존 송전 시스템에서 사용되던 조류계산 기법을 그대로 적용시키는 것은 효과적이지 않다. 그러므로 배전 시스템에서의 조류계산 문제를 해결하기 위해 배전 시스템의 구조적인 특징과 상전류를 이용한 Back/forward sweep method[3]와 유효·무효 전력을 이용한 Forward sweep method[5], 배전 계통에 맞도록 송전 시스템에서의 조류계산 알고리즘을 수정한 Newton-raphson method[6-8]와 Fast-decoupled method[9] 등 많은 알고리즘이 제안되어 왔다. 그러나, Back/forward sweep method와 Forward sweep method는 선로의 상호임피던스 성분에 대한 처리를 해야 하므로 많은 연산 시간이 필요하며, 배전 시스템에 맞도록 수정된 Newton-raphson 방법과 Fast-decoupled 방법은 Jacobian 행렬과 역행렬 연산이 있어 많은 연산 시간이 필요로 한다.

본 논문에서는 배전 시스템의 구조적인 특성을 효과적으로 표현하기 위하여 Back/forward sweep 방식을 채택하였고, 배전 선로의 상호 임피던스, 불평형 부하를 효과적으로 처리할 수 있도록 대칭 성분을 이용한 새로운 조류 계산 알고리즘을 제안하였다. 정상, 역상, 영상 성분의 전류를 대해 Back/forward sweep 방법을 적용한 조류계산 알고리즘은 불평형 방사구조의 배전 시스템의 해석에 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 Jacobian 행렬과 역행렬 연산이 필요 없고 산술연산만을 이용하므로 기존의 방법들에 비해 매우 빠른 특성을 보인다. 그리고, 본 연구에서는 불평형 부하, AVR에 대한 처리가 가능하도록 알고리즘을 개발하였다. 제안한 알고리즘은 단상과 2상 선로에 연결된 부하는 이를 연

결하고 있는 3상의 부하로서 가정하였다. 본 논문에서 제안한 조류계산 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 IEEE에서 제안한 테스트 배전 시스템인 불평형 123bus이며 방사상 구조를 갖는 배전 시스템에 적용하여 기존 상전류를 이용한 Back/forward sweep 방법과 비교하였다. 그 결과 제안한 방법이 더 적은 수렴횟수와 빠른 속도를 갖는다는 것을 알아내었다.

2. 본 론

2.1 대칭성분을 이용한 배전 계통 조류계산 알고리즘

배전 시스템의 간선은 대부분 3상 가공선로와 지중 케이블로 이루어져 있으며 약간의 2상 또는 단상 선로가 말단에 구성되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 단상과 2상 선로에 대한 처리와 3상 선로에 대한 처리 방법을 달리하여 조류 계산 알고리즘을 개발하였다.

2.1.1 3상 선로에 대한 조류계산 알고리즘

배전 시스템의 간선은 대부분 3상 가공선로와 지중 케이블로 이루어져 있다. 배전 시스템에 대한 조류 계산을 하기 위해 선로의 모델링이 필요하다. 그림 1은 배전 시스템의 선로 구간이며, 그림 2는 선로 모델이다.

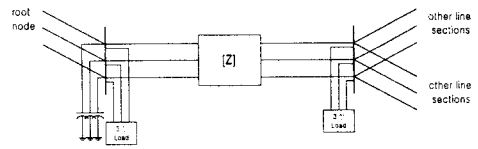


그림 1. 배전 시스템에서의 3상 선로 구간

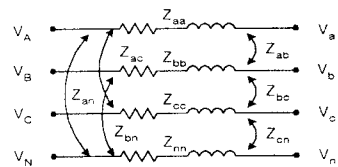


그림 2. 선로의 모델링

여기서, V_{ABC} 는 송전단의 전압, V_{abc} 는 수전단의 전압, z_{ii} 는 선로 임피던스이며, z_{ij} 는 선로의 상호임피던스이다. 그림 2와 같이 선로의 모델이 구성되었을 때, 전압 강하에 대한 방정식은 식 1과 같이 4×4 행렬 방정식으로 구성된다.

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

다.

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

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

식 1의 임피던스 행렬의 원소는 Carson's 방정식[1]을 이용하여 구하였으며, 중성선의 영향을 포함하는 식 1의 4×4 행렬 방정식을 중성선의 영향을 abc상에 포함시키기 위해 Kron's 소거법[2]를 사용하여 식 2와 같이 3×3 행렬 방정식으로 바꾸었다. 위의 전압 강하에 관한 식 2를 배전선 조류 계산에 적용하기 위해 대칭 좌표법에 의해 변환하여 표현하면 식 3과 같다.

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

여기서, A는 대칭성분을 변환시키기 위한 변환 행렬이며, V_{012} 는 영상, 정상, 역상 전압이며, I_{012} 는 영상, 정상, 역상 전류, Z_{012} 는 선로의 영상, 정상, 역상 임피던스이다.

식 3과 같이 대칭 성분을 이용하여 Back/forward sweep 방식에서의 전압 강하 방정식을 유도하였다.

배전 시스템의 조류 계산을 하기 위한 알고리즘은 3단계로 전개된다.

첫 번째 단계에서 단상과 2상 선로에 대한 부하를 선로에 대한 전압강하는 선로의 길이가 짧다고 가정하여 무시하였다. 이 가정 하에서 이를 연결하고 있는 3상 선로에서의 노드에 단상 및 2상 선로에 대한 부하를 포함시켜 3상 선로에 대한 계통으로 축약하였다.

두 번째 단계에서 첫 번째 단계에서 3상에 대한 계통으로 축약한 후, 각각의 노드에서의 대칭성분에 대한 영상, 정상, 역상 전류를 식 5,6,7과 같이 구한다. 우선 영상, 정상, 역상 전력을 식 4와 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} S_{i,0}^k \\ S_{i,1}^k \\ S_{i,2}^k \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{i,a}^k \\ a^2 S_{i,b}^k \\ a S_{i,c}^k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$i_{i,0}^k = \left(\frac{k_2 S_0^k + k_3 S_1^k + k_4 S_2^k}{k_1} \right)^* \quad (5)$$

$$i_{i,1}^k = \left(\frac{k_3 S_0^k + k_4 S_1^k + k_2 S_2^k}{k_1} \right)^* \quad (6)$$

$$i_{i,2}^k = \left(\frac{k_4 S_0^k + k_2 S_1^k + k_3 S_2^k}{k_1} \right)^* \quad (7)$$

여기서, $k_1 = k_2 V_2 + k_3 V_0 + k_4 V_1$, $k_2 = V_2^2 - V_0 V_1$,

$k_3 = V_0^2 - V_1 V_2$, $k_4 = V_1^2 - V_0 V_2$, a 는 $e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ 로 정의하며, $i_{i,0}^k$, $i_{i,1}^k$, $i_{i,2}^k$ 는 정전력 부하에 의해 노드 i에 들어오는 영상, 정상, 역상 전류이며, $S_{i,0}^k$, $S_{i,1}^k$, $S_{i,2}^k$ 는 노드 i의 영상, 정상, 역상 전압이며, $V_{i,0}^k$, $V_{i,1}^k$, $V_{i,2}^k$ 는 노드 i의 영상, 정상, 역상 전압을 나타낸다.

세 번째 단계에서 노드와 노드사이의 선로에서의 영상, 정상, 역상 전류는 Backward sweep method를 이용하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} I_{jB-0}^{(k)} \\ I_{jB-1}^{(k)} \\ I_{jB-2}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a^{(k)} \\ I_b^{(k)} \\ I_c^{(k)} \end{bmatrix} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} I_{mB-0}^{(k)} \\ I_{mB-1}^{(k)} \\ I_{mB-2}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $I_{jB-0}^{(k)}$, $I_{jB-1}^{(k)}$, $I_{jB-2}^{(k)}$ 은 노드와 노드 사이의 영상, 정상, 역상 전류를 나타낸다.

마지막 단계에서는 노드와 노드사이의 전압강하를 산하여 각각의 노드의 영상, 정상, 역상 전압을 구하기 위해 Forward sweep method를 이용하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} V_{(i-1)0}^{(k)} \\ V_{(i-1)1}^{(k)} \\ V_{(i-1)2}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{(j)0}^{(k)} \\ V_{(j)1}^{(k)} \\ V_{(j)2}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{(j)0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{(j)1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{(j)2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(j)B-0}^{(k)} \\ I_{(j)B-1}^{(k)} \\ I_{(j)B-2}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $Z_{(j)0}$, $Z_{(j)1}$, $Z_{(j)2}$ 는 선로 j의 영상, 정상, 역상 임피던스이다.

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

2.1.2 단상과 2상 선로에 대한 처리

본 논문에서 제안한 알고리즘에서는 3상 선로에 대한 조류계산을 처리한 후, 단상과 2상 선로에 대한 노드 전압을 계산하기 위해 다음과 같이 처리하였다.

우선 단상 및 2상 선로를 연결하고 있는 노드의 전압을 이용하여 선로 전류를 구한다. 구한 전류에 의해 단상 및 2상 선로에 대한 전압 강하를 계산하는 방법으로 단상과 2상 선로의 노드 전압을 구하였다. 그림 3은 본 논문에서 제안한 조류계산 알고리즘의 순서도이다.

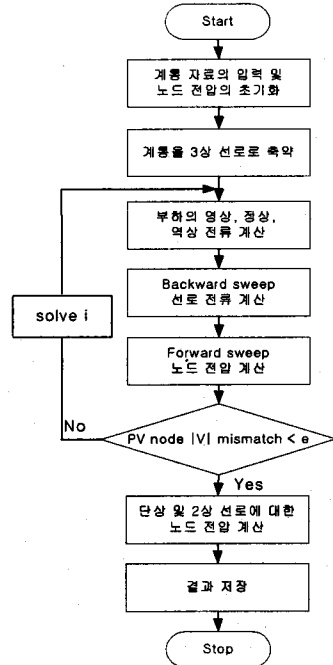


그림 3 조류계산을 위한 순서도

2.2 Auto Voltage Regulators 모델링

배전 계통에서 간선의 전압은 AVR에 의해 조정되며 이들 AVR은 대개 tap을 가지고 있는 단권 변압기이다. AVR을 이상 변압기로서 모델링하였고, 처리과정은 LDC(Line Drop Compensation) 기법을 사용하였다.

첫 번째 단계에서는 초기 tap 위치를 중간에 두드 tap 비에 의한 2차측 전압을 구한 뒤, tap 위치는 식

LDC(Line Drop Compensation) 기법을 사용하였다.

첫 번째 단계에서는 초기 tap 위치를 중간에 두고 tap 비에 의한 2차측 전압을 구한 뒤, tap 위치는 식 33과 같이 변화분을 구해 변화시켜 준다. 식 34는 전압 크기가 지정된 전압의 범위 안에 존재하는지 비교한다.

$$\text{Tap Position 변화분} = \frac{|V_{is}^{(k)} - Z_{iT}^k i_{B-abc} - VRR_i^k}{\text{step}} \quad (33)$$

$$|V^{\min}| < |V_{is}^{(k)}| < |V^{\max}| \quad (34)$$

여기서, $|V^{\min}|, |V^{\max}|$ 은 배전 변전소에서 유지 전압에 대한 범위이며, $V_{is}^{(k)}$ 는 AVR의 2차측 전압이다. Z_{iT}^k 는 전압을 유지시켜야 할 지점의 임피던스, VRR_i^k 는 AVR이 Z_{iT}^k 인 지점에서 유지해야 할 전압의 목표치이다.

두 번째 단계에서는 2차측 전압이 만약 $|V^{\max}|$ 보다 클 경우, 새로운 tap 비를 계산하고, $|V^{\min}|$ 보다 작을 경우에 대해서도 마찬가지로 새로운 tap 비를 구한 다음 그 값과 유사한 tap 위치로 변환시킨다. 마지막에 새로운 tap 위치를 설정하여 Forward sweep 방법을 이용하여 전압을 구한다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 조류 계산 알고리즘을 검증하기 위해 선택한 배전 시스템은 IEEE에서 제시한 test 모델인 123 bus[2]이며, 본 논문에서 제시한 대칭성분을 이용한 배전선 조류 계산 알고리즘과 기존의 3상 전류를 이용하는 Back/forward sweep 방법을 사용하여 IEEE 123 bus 배전 계통을 테스트하였다. 배전 계통 배전용 변압기의 정격은 최대부하 5MVA, 115 delta-4.16 grounded wye kV, 3상 단락용량이 1100MVA이다. 선로 데이터는 3상 및 단상, 2상 선로로 구성되어 있다. 또한, 각 버스의 부하는 정전력 부하이며, 부하용량은 1.67MVA를 기준으로 설정하여 PU값으로 나타내었다. 커패시터 뱅크는 3상 평형하게, 또는 단상 커패시터 뱅크가 연결되어 있다. 또한 전압이 과도하게 떨어지는 것을 보상하기 위해 4개의 AVR가 있으며, 단상, 2상, 3상에 AVR이 존재한다[2].

IEEE 123 bus 배전 시스템을 가지고 기존의 상전류를 이용한 Back/forward sweep 방법과 대칭성분을 이용한 조류계산 기법에 대한 3상 선로에서의 노드 전압 결과를 그림 4에서 제시하였고, 표 1은 조류 계산 수렴에 필요한 횟수 및 속도를 비교·제시하였다.

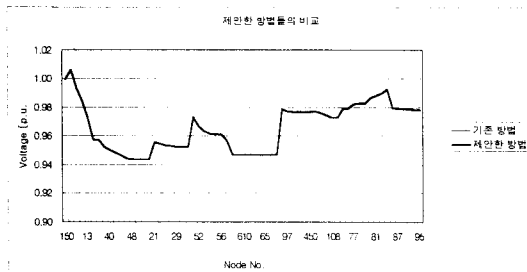


그림 4. 기존방법과 제안한 방법의 조류계산결과 비교

표 1. 기존 방법과 제안한 방법의 비교

(허용오차 : $\text{err} < 1e-10$)

	횟수	속도
기존의 방법	126	5.348
제안한 방법	110	3.565

기존의 3상 전류를 이용하는 Back/forward sweep 방식과 본 논문에서 제안한 조류계산 방법을 비교하면, 표 3에서 보는 것과 같이 본 논문에서 제시한 방법이 기존의 방법보다 수렴속도는 35.7% 빠르고 수렴횟수는 더 적어 3상 전류를 이용하는 방법보다 본 논문에서 제시한 방법이 더 우수함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 배전 시스템의 구조적인 특성을 이용한 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 전류에 대해 Back/forward sweep 방법을 적용하여 제안된 본 조류계산 알고리즘은 unbalanced radial distribution systems의 해석에 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 본 연구에서는 AVR에 대한 처리가 가능하도록 알고리즘을 개발하였다. 제안한 알고리즘은 3상 조류 계산시, 선로의 상호 임피던스의 영향을 대칭 좌표법을 이용하여 영상, 정상, 역상으로 3상을 분리하기 때문에 3상에서 존재하는 선로의 상호 임피던스의 영향을 대각성분으로 포함시킬 수 있어 연산 부담을 상당히 줄일 수 있다. 3상 불평형 123bus의 배전 시스템에 대해 제안된 알고리즘과 기존 Back/forward sweep 방법을 비교하였을 때, 제안된 방법이 기존 방법보다 좀더 빠른 수렴 속도를 나타내었다.

[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
- [5] 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
- [6] Fan Zhang, Carol S. Cheng, "A Modified Newton Method for Radial Distribution system Power Flow Analysis", IEEE Transactions on Power System, Vol. 12 No. 1, February 1997
- [7] Tsai-Hsiang Chen, Mo-shing Chen, Kab-Ju Hwang, Paul Kotas, Elie A. Chebli, "Distribution system power flow analysis - A rigid Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.3, July 1991
- [8] Ray D. Zimmerman, Hsiao-Dong Chiang, "Fast Decoupled Power for Unbalanced Radial Distribution", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November 1995
- [9] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on radial distribution system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989