

3상 배전계통에서의 부하조류해석 알고리즘에 관한 연구

류재홍, 김재언
충북대학교 전기공학과

A Study for a load flow analysis algorithm in the three-phase distribution network

Jae-Hong Ryu, Jae-Eon Kim,
Chungbuk National University

2. 3상 조류해석 알고리즘

2.1 부하조류 계산식

3상 배전계통에서의 부하 조류계산 알고리즘에 관한 계산식을 소개하기로 한다. 배전계통은 대개 방사형 구조이며 3상, 혹은 단상, 가공선로 혹은 지중선로로 구성된다. 또한 많은 node와 branch를 가지며, 각 node branch에는 불평형 부하가 달려있다. 여기서는 일단 선로의 node i 와 $i+1$ 사이의 선로 j 로 구성된 회로의 일부를 그림 1에 나타내었다. 선로의 커패시턴스는 무시하기로 한다.

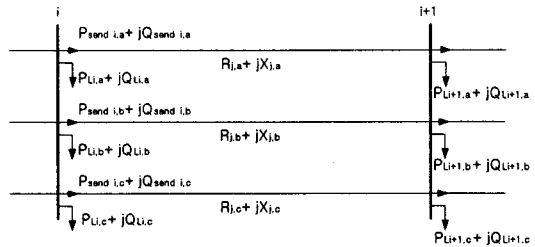


그림 1 3상 배전계통의 선로

그림 1과 같은 3상 배전계통에서, 선로의 자기 및 상호 임피던스는 다음과 같이 3×3 Matrix로 나타낼 수 있다.

$$Z_j = \begin{bmatrix} Z_{j,aa} & Z_{j,ab} & Z_{j,ac} \\ Z_{j,ba} & Z_{j,bb} & Z_{j,bc} \\ Z_{j,ca} & Z_{j,cb} & Z_{j,cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

각 지선의 맨 첫 node에서의 유효전력 및 무효전력의 투입량은 식(2)에서와 같이 모든 지선의 모든 node의 부하값과 branch의 손실값의 합으로 구할 수 있다.

$$P_{sum(L)} = \sum_{i=FN}^{EN} P_L(i) + \sum_{j=FN}^{EN-1} PLL(j) \quad (2)$$

$$Q_{sum(L)} = \sum_{i=FN}^{EN} Q_L(i) + \sum_{j=FN}^{EN-1} QLL(j)$$

$P_{sum(L)}$: 각 지선의 처음 node에서 투입되는 유효전력
 $Q_{sum(L)}$: 각 지선의 처음 node에서 투입되는 무효전력
 FN : 각 지선의 맨 처음 node
 EN : 각 지선의 마지막 node
 P_L, Q_L : 각 node의 유효, 무효전력부하
 PLL, QLL : 각 선로의 손실과 선로의 distributed load와의 합

Abstract - This paper introduces an advanced three-phase load flow analysis algorithm in the radial distribution network. This method is an extension of the Novel method for solving radial distribution networks⁽¹⁾ with the emphasis on expanding from single phase to three-phase. The proposed method involves only simple algebraic computation without any form of Jacobian matrix but has a desirable convergence characteristic. Computationally, The suggested technique is very efficient and requires less computer memory storage and maintains high execution speed. Also, the submitted process can be easily programmed and be simply extended to different types of load characteristics. A simulation results applied to the IEEE 34 bus radial distribution feeder are examined by using the MATLAB.

1. 서론

지금까지 부하조류해석을 위해 사용되어 온 가장 일반적인 알고리즘들에는 Newton-Raphson Method(NR), Gauss-Seidel Method(GS)와 Fast Decoupled Load Flow Method(FDLF) 등이 있었다. 하지만 이러한 알고리즘들은 선로의 R/X 비율이 비교적 작은 송전 계통의 경우에는 그 수렴 특성이 우수하여 적용 가능하다. 상대적으로 비율이 큰 방사상 배전계통에는 효율적이지 못했다.

Branch equation을 이용한 NR Method의 경우 3상 조류계산에 적용하려면 노드의 수가 증가하면 Jacobian Matrix의 Dimension이 증대하고 역행렬을 구성하는데 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

배전계통에서의 이와 같은 문제점을 해결하고자 각 node 전압의 크기, 각 branch의 송전단 또는 수신단의 유효전력과 무효전력, 각 branch의 임피던스 식으로 표현되는 조류계산 알고리즘들이 개발되어 왔다.⁽²⁾⁽³⁾ 하지만, 이러한 알고리즘들은 3상 배전계통에서의 각 상이 평형하다고 가정한 단상 등가회로로 해석하였으나, 실제 배전계통에서 선로의 각 상이 평형하다고 보기는 어렵고, 고압 배전선뿐만 아니라 배전 변전소에서 인출되는 저압 배전선의 각 상의 부하가 평형하지 않고 또한 배전 선로에 열병합, 태양열등 분산형 전원이 도입될 경우와 합성 부하의 문제도 고려를 해주어야 한다.

따라서 이 논문에서는 기존의 단상 등가회로로 해석한 Novel method for solving radial distribution networks⁽¹⁾을 참조하여 3상 불평형 및 불평형 부하가 달린 저압배전선에도 적용 가능한 알고리즘으로 개발하였으며, 여기서 제안한 방법은 IEEE 34bus Radial Distribution Feeder의 모델계통에 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

식(2)에서 각 상의 송전단 i 의 유효, 무효전력에서 선로의 손실과 node의 부하 유출량을 빼주면 각 node의 유효, 무효전력 값을 구할 수 있다.
다음의 식에서

$$\begin{aligned} P_{send(i+1)} &= P_{sum(L)} - PL_{(i)} - PLL_{(i)} \\ Q_{send(i+1)} &= Q_{sum(L)} - PL_{(i)} - PLL_{(i)} \end{aligned} \quad (3)$$

각 node에서 유출되는 유효, 무효전력 값을 구한 후 미리 설정된 각 node의 전압 값을 가지고 각 branch에서의 전류를 구하면 다음과 같다.

$$I_{(j)} = \frac{P_{send(i)} - j Q_{send(i)}}{V_{(j)}} \quad (4)$$

$P_{send(i)}$: 각 상의 node i 에서의 유효 전력
 $Q_{send(i)}$: 각 상의 node i 에서의 무효 전력
 $I_{(j)}$: 각 선로 j 에 흐르는 전류

식(4)의 전류값과 식(1)의 자기, 상호 임피던스 값을 이용하여 각 선로의 전압강하 분을 빼주면, 각 상의 노드 전압 V 는 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{(i+1),a} \\ V_{(i+1),b} \\ V_{(i+1),c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{(i),a} \\ V_{(i),b} \\ V_{(i),c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{j,aa} & Z_{j,ab} & Z_{j,ac} \\ Z_{j,ba} & Z_{j,bb} & Z_{j,bc} \\ Z_{j,ca} & Z_{j,cb} & Z_{j,cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{j,a} \\ I_{j,b} \\ I_{j,c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

선로에서의 전류값과 선로의 고유 저항, 리액턴스 값을 이용하면 각 선로에서의 유효, 무효전력 손실은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} LP_{j,a,b,c} &= R_{j,a,b,c} \cdot I_{j,a,b,c}^2 \\ LQ_{j,a,b,c} &= X_{j,a,b,c} \cdot I_{j,a,b,c}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)의 유효, 무효전력 손실은 수렴여부를 판단하는 기준이 된다.

2.2 알고리즘

전체에 대한 조류계산 알고리즘의 플로우차트는 다음의 그림 2에 명시되어 있다. 알고리즘은 방사형 배전계통에 대해서 2개의 반복루프 구조를 가지고 있다.

입력사항: 선로의 형태(node와 branch)

선로의 자기, 상호임피던스 및 저항, 리액턴스
유효, 무효전력 부하, 전압 초기치(1 p.u.)

출력사항: 각 node, branch에 있어서의 전압, 전류값

일단 Root node를 slack node로 하여 $1.0 \angle 0^\circ$ 의 초기 전압치와 위상각을 주고 나머지 다른 모든 node에 대하여도 root node와 같은 초기치를 준다. 이에 다음과 같은 방사상 배전계통에서의 반복 알고리즘으로 구할 수 있다.

단계 1:식(2)에 의해 각 지선에서의 $P_{sum(L)}, Q_{sum(L)}$ 을 구한다.

단계 2:식(3)에 의해 전체 node에 대해 $P_{send(i)}, Q_{send(i)}$ 를 구한다.

단계 3:식(4)에 의해 전류를 구한 뒤 식(5)에 의해 전체 node에 대해 전압값을 구한다.

단계 4:식(6)에 의해 선로의 유효, 무효전력 손실을 계산한 뒤 이전 값과 비교하여 수렴 여부를 판단한다

단계 5:수렴 조건을 만족하지 않을 시 단계 1부터 수렴할 때까지 반복한다.

이 알고리즘의 플로우차트는 다음의 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

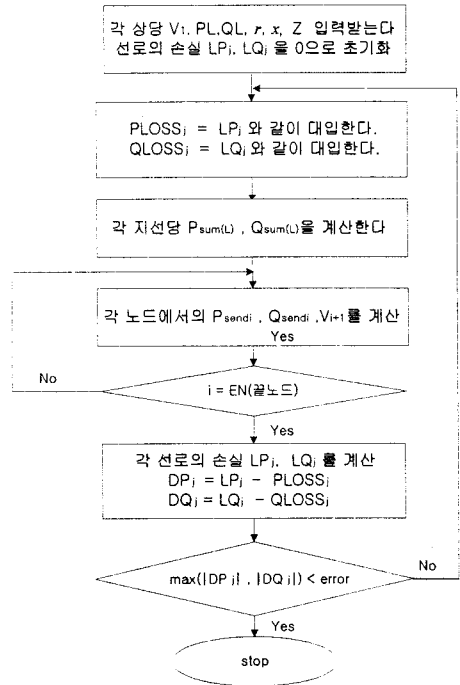


그림 2 플로우차트

위의 플로우차트에서 PLOSS, QLOSS는 선로의 이전 손실값을 저장하는 임시저장 공간이고, DP와 DQ는 계산된 손실값과 이전 손실값과의 차를 저장하는 공간이다.

2.3 합성부하 모델링

제한된 알고리즘에서의 부하조류계산은 부하타입에 따라 다른 결과를 산출하게 되는데 이는 다음의 합성 부하 모델링 식을 이용하여 간단히 해결될 수 있다.

각 node에서의 유효, 무효전력 부하 데이터 P_L, Q_L 의 수식을 다음과 같은 전압 의존형 합성부하 모델로 한 후, 매 반복계산 때마다 업데이트 시킨다.

$$\begin{aligned} P_{L(i)}(V) &= P_{L0(i)} [a_{pi} + b_{pi} V_{(i)} + c_{pi} V_{(i)}^2] \\ Q_{L(i)}(V) &= Q_{L0(i)} [a_{qi} + b_{qi} V_{(i)} + c_{qi} V_{(i)}^2] \end{aligned} \quad (7)$$

P_{L0i}, Q_{L0i} : 부하 모선의 유효, 무효전력부하

a_{pi}, a_{qi} : 정전력 부하 성분 계수

b_{pi}, b_{qi} : 정전류 부하 성분 계수

c_{pi}, c_{qi} : 정임피던스 부하 성분 계수

단, $a_{pi} + b_{pi} + c_{pi} = 1$, $a_{qi} + b_{qi} + c_{qi} = 1$

2.4 시뮬레이션

2.4.1 모델계통 선정

모델계통은 Radial Distribution Test Feeders⁽⁴⁾를 참조하여 선로를 구성하였으며, IEEE 34bus radial distribution feeder의 데이터를 활용하였다. 변압기와 VR은 제외하였고 각 선로, 버스에서의 데이터와 선로의 길이 및 선로구성 특성은 그대로 사용하였다. 기준 용량 10MVA, 기준 전압 6.6KV를 사용하였다. 각각의 선로 임피던스는 Carson's equation을 사용하여 계산하였다.⁽⁵⁾ 여기에 활용된 부하와 선로의 형태는 다음과 같다.

부하 형태 : ① Spot loads, Distributed loads
 ② All wye connected
 ③ All constant kw, kvar

선로 형태 : ① Three-phase overhead
 ② Single-phase overhead

시뮬레이션을 수행하기 위해 모델계통으로 선정한 IEEE 34bus radial distribution feeder의 선로를 그림 3에 나타내었다.

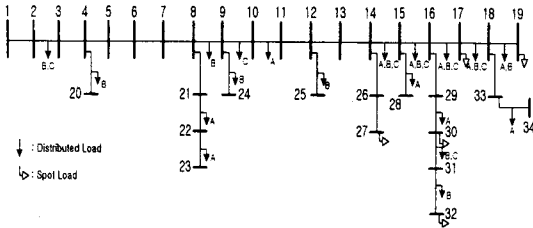


그림 3 IEEE 34 bus radial distribution feeder

위의 그림 3의 계통도에서 1번 node를 slack node로 지정하였고 각 node와 branch의 번호는 왼쪽에서 오른쪽, 위쪽에서 아래쪽으로 차례대로 넘버링을 하였다.

2.4.2 시뮬레이션 결과

이 논문에서 제시한 알고리즘과 기존의 방법들과 모델 배전계통에 적용한 결과를 다음의 표 1에 제시하였다. 기존의 알고리즘은 "Backward Forward Sweep Method(이하 BFSM)"⁽²⁾ 와 "Distflow Method(이하 DM)"⁽⁶⁾를 이용하였고, 프로그램에서의 수렴 조건의 오차 허용범위는 10^{-10} 을 주었다. 비교의 기준은 DM을 기준으로 잡았으며, 같은 조건의 PC하에 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

	제안 알고리즘	BFSM	DM
전압오차	10e-8	10e-5	기준
반복회수	3	2	5
연산시간 (sec)	0.542	0.11	0.772

표 1 조류계산 결과 비교

표1에서 DM은 P,Q,V²의 식에서 branch flow equation을 이용한 system jacobian matrix를 생성하여, 계산하는 방법이기 때문에 이를 기준 방법으로 설정하였다.

또한 BFSM은 real time application에 적용하기 위한 알고리즘으로 반복회수를 수렴 조건에 만족할 때까지 돌리지 않고 근사값을 구하기 때문에 2번으로 임의로 정해서 연산시간은 매우 단축되지만 전압값의 정확도 면에서는 오차가 발생하는 단점이 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 단상 등가회로로 해석한 "Novel Method for Solving Radial Distribution Networks"⁽¹⁾의 알고리즘을 선로의 불평형과 합성부하를 고려한 방사상 배전계통에 적용 가능한 3상 부하 조류계산 알고리즘으로 확장하였다.

시뮬레이션 결과가 보여주듯이 이 알고리즘은 3상 방사상 배전계통의 모델에서 좋은 수렴 특성을 나타내었으며 속도 면에서도 기존의 방법보다 매우 효율적인 것으로 나타났다.

또한 일률적인 node와 branch의 넘버링으로 인한 프로그래밍이 간편하고 Jacobian matrix는 필요하지 않고 오직 반복적인 사칙 연산만을 수행 하기 때문에 메모리의 절약과 속도의 향상을 가져올 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1]D. DAS, H.S. NAGI, and D.P. KOTHARI, "Novel Method for Solving Radial Distribution Networks", IEE Proc. Vol.141, No.4, July 1994, pp. 291-298
- [2]RENATO, C.G: "New method for the analysis of distribution networks", IEEE Trans. Vol.5, No.1, Jan. 1990, pp.391-396
- [3]SHIRMOHAMMADI,D., HONG, H.W., SEMLYEN, A., and LUO, G.X.: "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", IEEE Trans., Vol.3, No.2, May 1988, pp.753-762
- [4]Kersting, W.H. "Radial distribution test feeders " IEEE Trans Vol.63 , Aug. 1991 , Page(s): 975 -985
- [5]Kersting, W.H.; Phillips, W.H. "Distribution feeder line models" Rural Electric Power Conference, 1994. Papers Presented at the 38th Annual Conference , 1994 , Page(s): A4/1 -A4/8
- [6]Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Optimal sizing of Capacitors placed on a radial distribution system", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No.1 735-742, 1989