

배전계통을 위한 분산형 조류계산 : Part 2 알고리즘

*이상성 **박종근 **문승일 **윤용태

*차세대지역에너지연구소 및 전력시스템연구실(기초전력연구원), **서울대학교 전기컴퓨터공학부, 신림9동, 관악구, 151-742, 서울특별시

Distributed Load Flow for Distribution Power System : Part 2 Algorithm

*S. S. Lee **J. K. Park **S. I. Moon **Y. T. Yoon

*RERI and PSRD (KESRI), **Seoul National University, ShinLim-9Dong, KwanAk-Gu, Seoul, 151-742, Korea

Abstract - 본 논문은 Part 2로서 배전계통을 위한 분산형 조류계산의 알고리즘을 제안하고, 결합 조류계산을 수행하기 위하여 경계상의 정보를 이용하고 송전과 배전계통에서 조류계산의 수렴 이후에 교환하는 알고리즘이다. 이는 각각의 조류계산 해법들이 송전과 배전계통에 사용될 수 있기 때문이다. 송전과 배전계통의 조류계산은 네트워크의 토플로지와 파라메터 값들에서 큰 차이가 있기 때문에 분리하여 수행하여야 한다. 그러나, 두 계통이 물리적으로 연계되어 있거나 정확한 조류계산 해를 동시에 풀 수 있기 때문에 두 계통의 경계모선들에서 전력 오차를 계산하는 데 있어 약간의 오차가 있을 수 있다. 송전과 배전 계통의 경계 모선에서 전력 조류는 송전계통의 조류 계산에 대하여 부하로서 나타낼 수가 있다. 다중 조류 기법들이 상호 존재하므로 이를 분산처리에 이용하는 이점이 된다. 특히, 분산전원 출현으로 인한 이러한 분산형 조류계산 기법의 필요성이 점점 증가하고 있다. 분산형 조류계산 알고리즘은 비동기 분산형과 동기화 분산 알고리즘으로 분류할 수 있다. 분리 계산 기법이 하나 이상의 배전계통을 가진 계통의 결합 조류계산에 사용된다면, 스칼라 경계 변수들은 상태 변수 벡터로 대체 할 수 있다.

Index Terms-분산형 조류계산 알고리즘, 비동기 분산형과 동기화 분산 알고리즘, 경계모선, 계통분할, 배전계통

1. 서 론

전력계통을 의도적으로 송전계통과 배전계통으로 나누는 이유는 두 계통의 회로망 토플로지뿐만 아니라 전압 레벨에서 큰 차이가 있다. 역시 두 계통의 파라메터에 있어서도 큰 차이가 있다. 그러므로 만일 이 두 계통이 조류계산에서 직접적으로 결합한다면 수렴문제가 발생할 것이다[1].

일반적으로, 송전계통은 환상망 구조로 되어있지만 [10], 배전계통은 방사상 구조로 되어있다. 지금까지, 배전계통에 대하여 대부분의 계산은 배전계통이 나뭇가지형 방사상 구조로 되어있다고 가정해 왔다. 그러나 현대 전력계통의 급속한 진전과 분산전원 출현으로 인하여 배전 회로망은 일부 환상형을 가진 구조가 되면서 더욱 복잡한 형태로 되어가고 있다. 비록 2개의 방사상 배전망을 연결하는 스위치들이 정상 상태에서는 그 접속에는 약간의 전류가 흐른다고 표시되는 경우에 개방되어 있다고 하지만, 일부 어떤 계통에서는 결합 효과를 고려하여야 할 것이다[2-9].

컴퓨터 망 기술의 빠른 발전과 폭넓은 응용으로 배전계통의 분산처리를 위한 실제적인 지원을 고려하여야 할 것이다. 배전계통의 지리적인 측면이 송전계통과 비교하여 매우 작기 때문에 이의 데이터 통신은 송전계통과 같이 많은 단계들을 가지고 있을 필요가 없으며, 지역 제

어 분소의 컴퓨터는 직접적으로 연계할 수 있을 것이다. 결과적으로, 어느 정도는 배전계통의 분산처리는 송전계통과 비교하여 더욱 쉽게 되고 더욱 신뢰성 있고 덜 비싸게 할 수 것이다[1].

본 논문은 배전계통을 위한 분산형 조류계산의 알고리즘을 제안하고, 결합 조류계산을 하기 위하여 경계상의 정보를 이용하고 송전과 배전계통에서 조류계산의 수렴 이후에 교환하는 알고리즈다. 특히, 분산전원 출현으로 인한 이러한 분산형 조류계산 기법의 필요성이 점점 증가하고 있다.

2. 분산형 조류계산 알고리즘

분산형 조류계산 알고리즘은 비동기 분산형과 동기화 분산 알고리즘으로 분류할 수 있다. 만일 분리 계산 기법이 하나 이상의 배전계통을 가진 계통의 결합 조류계산에 사용된다면, 스칼라 경계변수들은 상태변수 벡터로 대체 할 수 있다[1].

(1) 분산형 조류 계산(Distributed Computation of Load Flow)

N 구역들로 분할하는 배전계통은 다음과 조건들을 만족한다고 가정한다. 주 피이드는 하나의 분리 구역으로 간주한다. 이는 주 피이드가 가장 중요하기 때문이다. 주 피이드상에서 일어나는 사고는 lateral 지로상에서 보다도 훨씬 넓은 지역에 영향을 미치게 된다. 하나 또는 지리적으로 많은 인접 laterals은 하나의 구역을 형성하기 위하여 접지되어야 한다. 이 그룹 평온 일반적으로 배전계통 내에서 현존 제어 구역들을 따른다. 분산처리를 위하여 계통내에서 이용할 수 있는 컴퓨터의 성능은 동일하다. 부하 평형은 배전계통을 거의 같은 수의 모선을 가지고 구역들로 분할하여 얻을 수 있다.

1) 동기 분산 알고리즘(Synchronous Distributed Algorithm)

$z = (z_1, \dots, z_N)$, $F = (F_1, \dots, F_N)$ 으로 나타낸다. 동기화 분산 조류 알고리즘은 다음과 같다.

$$- J_{ii}(z(k+1))\Delta z_i = F_i(z(k)) \quad i = 1, \dots, N-1, \quad N \leq m+1 \quad (1)$$

$$- J_{00}\Delta z_0(k+1) = F_0(z(k)) + \sum_{i=1}^m J_{0i}\Delta z_i(k) \quad (2)$$

병렬 계산에서 병렬 기기의 구조에 따라 조류계산 수식을 나눌 수 있다. 반면에 분산 계산에서 분산알고리즘을 협조하는 시스템 분해할 수 있다. 특히, $N = m+1$ 일 때, 주 피이드를 계산하는 컴퓨터를 제외하고 나머지 컴퓨터들은 lateral을 계산한다. 동기화 분산 조류 알고리즘에서 경계상태변수들은 매번 반복시에 프로세서 간을 통신한다.

2) 비동기 분산 알고리즘(Asynchronous Distributed Algorithm)

비동기 분산계산을 위하여 먼저 $z^i(t) = (z_1(\tau_1(t)), \dots, z_N(\tau_N(t)))$ 으로 나타낸다. 여기서 $z_i(\tau_i(t))$ 는 프로세서 j 로부터 컴퓨터 i 로 보내는 시간 t 에서 요소 z_i 를 나타낸다. 가능한 통신 지연을 고려할 경우에 비동기 분산 알고리즘은 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$- J_{ii}(z^i(t))\Delta z_i(t+1) = \gamma F_i(z^i(t)) \quad i = 1, \dots, N-1, N \leq m+1 \quad (3)$$

$$- J_{00}(z^0(t))\Delta z_0(t+1) = \gamma F_0(z^0(t)) + \sum_{i=1}^m J_{0i}\Delta z_i(\tau_i^0(t)) \quad (4)$$

여기서 γ 는 완화계수(relaxation factor)이다. 비동기화는 계수들의 수에 의하여 생성된다.

이들은 일반적으로 컴퓨터간의 부하 불평형으로 생겨나는 다른 크기의 구간, 다른 성능을 가진 이 기종 컴퓨터, 컴퓨터 간의 다른 통신 매체들이다. 이와 같이 비동기 조류알고리즘은 분산화된 시스템의 컴퓨터 간에 통신 지연을 예측하기 힘들 때 사용할 수 있다. 비동기 계산 시 수렴 성능을 개선하기 위하여 완화계수 γ 가 (3)과 (4)에서 도입되었다. 완전 비동기 알고리즘에서는 만일 (3)과 (4)에서 통신 지연이 완전 비동기 계산 가정을 만족한다면 (3)과 (4)는 배전계통에서 완전 비동기 조류 알고리즘이라 부른다. 부분 비동기 알고리즘에서는 만일 (3)과 (4)에서 통신 지연이 부분 비동기 계산 가정을 만족한다면 (3)과 (4)는 배전계통에서 부분 비동기 조류 알고리즘이라 부른다.

(2) 수렴 분석

만일 조류 방정식의 자코비안 행렬이 대각적으로 우월하다면 분산 비동기 조류 알고리즘은 완화계수 γ 가 충분히 작아질 때 수렴한다. 행렬 J 와 \tilde{J} 는 분명하게 대각적으로 우월하다. 그래서 모든 $i \neq k$ 에 대하여 $\Delta J_{ik} \gg \Delta J_{ki}$ 이다. 그러므로 배전계통에서 배전 비동기 조류 알고리즘은 완화계수 γ 가 충분히 작아질 때 수렴한다.

N 구간들로 분할하는 배전계통은 다음과 조건들을 만족한다고 가정한다. 주 피이드는 하나의 분리 구간으로 간주한다. 이는 주 피이드가 가장 중요하기 때문이다. 주 피이드상에서 일어나는 사고는 lateral 지로상에서 보다도 훨씬 넓은 지역에 영향을 미치게 된다. 하나 또는 지리적으로 많은 인접 laterals은 하나의 구간을 형성하기 위하여 접지되어야 한다. 이 그룹은 일반적으로 배전계통내에서 현존 제어구간들을 따른다. 분산처리를 위하여 계통내에서 이용할 수 있는 컴퓨터의 성능은 같다. 부하 평형은 배전계통을 거의 같은 수의 모션을 가지고 구간들로 분할하여 얻을 수 있다.

(3) 다중 배전계통을 가진 결합 조류계산

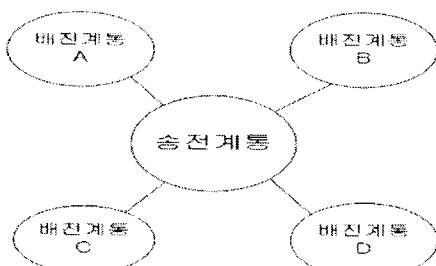


그림 1 다중 배전계통 결합 조류계산

경계상의 부하에 대한 전력은 그림 1에서 나타난 바와 같이 2개의 인접한 회로망에서 2개의 피이드에서 공급한다. 앞에서 2 분지의 연계(tie) 선로상의 전류는 무시한다고 가정하였다. 배전계통에서 루프가 형성될 경우에는 전류를 무시할 수가 없다. 그래서, 위에서 제시된 조류알고리즘들은 이러한 적용을 위하여 수정하여야 한다. 연계 전류를 고려해야하는 경우는 다음과 같은 2가지다. 경계상의 부하에 대한 전력은 하나의 마디에서 공급한다. 즉, 다른 망으로부터 경계상의 부하에 이르는 전력은 0이다. 이 경우에, 임의로 연계선로를 새로운 위치로 옮겨갈 수 있으며 이전에 제안한 조류 알고리즘을 적용할 수 있다.

연계선로 $k-l$ 상의 전력 조류를 $P_{tie} + jQ_{tie}$ 이라 하자. 그러면, 세안된 조류 알고리즘에 대하여 경계조건들은 다음과 같이 수정되어야 한다.

배전계통 A에 대하여,

$$P_{jk} = -P_{tie} \quad (5)$$

$$Q_{jk} = Q_{tie} \quad (6)$$

배전계통 B에 대하여,

$$P_{gj} = P_{tie} \quad (7)$$

$$Q_{gj} = Q_{tie} \quad (8)$$

제안된 배전조류계산 알고리즘은 다른 경계조건들을 가진 배전계통의 조류 문제에 적용할 수 있다.

(5) 송전계통과 배전계통의 분리계산에 기준한 결합 조류계산

송전계통과 배전계통의 조류계산은 네트워크의 토플로지와 파라메터 값들에서 큰 차이가 있기 때문에 분리하여 수행하여야 한다. 그러나, 두 계통이 물리적으로 연계되어 있거나 정확한 조류계산 해를 동시에 풀 수 있기 때문에 두 계통의 경계모선들에서 전력 오차를 계산하는데 있어 약간의 오차가 있을 수 있다. 그러나, 송전계통에서 배전망으로 주입되는 전력은 배전망의 조류계산에서 상태 변수들로 취급한다. 만일 두 조류 해법간의 차이가 실제적으로 있다면 해당하는 조류 전체 전력계통의 모니터링과 제어에 역효과가 생길 수 있다. 결합 조류계산은 ISO와 DSO가 각각의 계통들의 운영에 대하여 더욱 정확한 묘사를 할 수가 있다면 이러한 현상을 방지할 수 있다.

이러한 경우에, 분산 처리 기법들은 전력계통의 결합 조류계산을 위한 가능성을 제시해 준다. 분산 계산을 실행하는 데 있어, 배전계통을 지역(zonal) 전력계통으로 취급하고, 배전과 송전 계통의 상태 변수들로서 모선 전압 크기와 위상을 선택한다. 따라서, 결합 조류는 송전계통에 대한 분산 조류와 아주 유사하게 구현할 수가 있다. 결합 분산 조류 기법은 동기 또는 비동기 방법으로 수행할 수 있으며, 데이터 통신망의 특정한 특성에 따라 알고리즘 설계 절차를 정할 수 있다. 여기에서 유일한 문제는 P-Q fast decoupled 조류기법이 배전계통에 적용할 수 없다는 점이다. 그래서 결합 분산 조류는 단지 고전적인 Newton-Raphson 기법을 사용하여 실행할 수가 있다. 이론적으로, 송전계통의 조류는 P-Q fast decoupled 기법을 사용할 수 있으며, 배전계통의 조류는 역시 결합 조류계산에서 Newton-Raphson 기법을 사용할 수가 있다. 그러나 분산 계산은 두 계산 기법들의 수렴율에 있어 차이가 있기 때문에 수렴문제에 직면할 수가 있다.

송전과 배전 계통의 조류계산을 각기 따로 계산하고 가정한다. 단단하게, 먼저 계통이 단지 하나의 송전계통과 하나의 배전계통을 가진 경우를 고려한다. 송전계통과 배전계통에 있어, 각각의 조류계산을 위한 경계 조

건들을 안다고 가정한다. 송전계통은 조류계산을 위하여 입력 데이터의 부분으로서 변전 모선의 주입전력 P_{dj} 와 Q_{dj} 를 취한다. 그리고 조류 계산 결과는 변전 모선의 전압 크기 V_j 를 표시해준다. V_j 를 배전계통의 조류계산에 대하여 입력 데이터의 부분을 나타내고 조류계산은 P_{dj} 와 Q_{dj} 의 새로운 값들을 생성한다고 한다. $V_j^{(0)}$ 를 안다고 가정하면, 배전계통은 조류계산이 완료된 후에 조류계산을 수행하여 경계상의 부하 $P_{dj}^{(new)}$ 와 $Q_{dj}^{(new)}$ 를 얻는다. 경계상의 전력 주입을 P_{dj} 와 Q_{dj} 로 취한 후, 송전계통의 조류계산을 수행하여 $V_j^{(new)}$ 에 대하여 새로운 값을 얻는다.

만일 $|V_j^{(new)} - V_j^{(0)}| < \epsilon$ 이라면, 경계상의 조건들은 두 계통을 만족하고 결합 조류계산은 수렴한다. 그렇지 않으면,

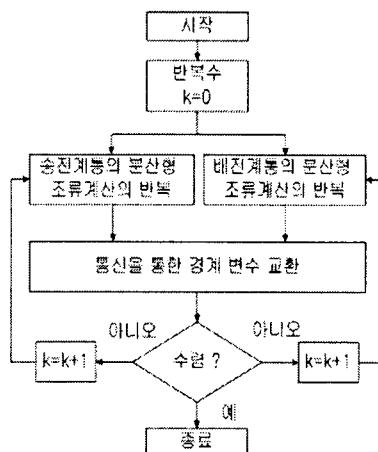


그림 2 송전과 배전 계통을 위한 분산형 결합 조류계산

3. 결 론

지금까지 제시한 송전과 배전 계통을 위한 결합 조류계산은 계통이 하나의 배전계통 이상일 경우에 대하여 쉽게 확장할 수 있다. 이러한 상황에서, 각 배전계통에 대한 조류계산은 분산 방식으로 나누어서 수행할 수 있다. 전체 계통을 위한 조류는 송전과 배전 계통을 위한 분리형 계산에 기준한 결합 조류계산을 통하여 수행할 수가 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며 관계 기관에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Shahidehpour, Y. Wang, "Communication and Control in Electric Power Systems", Wiley Inter-Science, 2003.
- [2] S. Iwamoto and Y. Tamura, "A load flow calculation method for ill-conditioned power systems", *IEEE Trans., PAS-100*, pp. 1736-1713, 1981.
- [3] D. Rajicic and A. Bose, "A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios", *IEEE Trans., PWRS-3*, pp. 743-746, 1988.
- [4] N. Iatziargyriou, T. Karakatsanis, M. Papadopoulos, "Probabilistic load flow in distribution systems containing dispersed wind power generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 159-165, February,
- [5] D. Das, H. S. Nagi, and D. P. Kothari, "Novel method for solving radial distribution networks", *IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution*, Vol. 141, No. 4, pp. 291-298, July, 1994.
- [6] R. D. Zimmerman and H. D. Chiang, "Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems", *IEEE Trans., on Power Systems*, vol. 10, No. 4, pp. 2045-2052, Nov., 1995.
- [7] S. Naka, T. Genji, Y. Fukuyama, "Practical equipment models for fast distribution power flow considering interconnection of distributed generators", *Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 2, pp. 1007-1012, 2001.
- [8] A. Augugliaro, L. Dusonchet, M. G. Ippolito, and E. R. Sanseverino, "An efficient iterative method for load flow solution in radial distribution networks", *IEEE Porto Power Tech Proceedings*, Vol. 3, 2001.
- [9] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation", *IEEE Trans., on Power Delivery*, vol. 17, No. 3, pp. 822-827, July, 2002.
- [10] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power flow solution by Newton's method", *IEEE Trans., PAS-86*, pp. 1449-1456, 1967.

면, 결합 조류는 더욱 많은 반복이 필요하게 될 것이다. 이 조류 계산 기법은 그림 3에 나타나 있다.

만일 배전계통에서 분산 전원 유닛들이 있다면 배전계통은 변전 모선을 슬렉 모선으로 간주해야 것이다. 전압 크기를 $V_j^{(0)}$ 라 하면, 이의 조류는 P_{dj} 와 Q_{dj} 를 생성한다. 그리고, 송전계통은 조류계산을 위한 입력 데이터로서 P_{dj} 와 Q_{dj} 를 택한다. 이는 변전 모선에 대하여 $V_j^{(new)}$ 를 생성한다. 이 $V_j^{(new)}$ 의 값은 배전계통의 조류계산의 다음 반복을 위하여 사용할 것이다.

$|V_j^{(new)}(k+1) - V_j^{(new)}(k)| < \epsilon$ 일 때, 결합 조류계산을 위한 수렴조건이 만족하면 결합 조류계산을 종료한다.

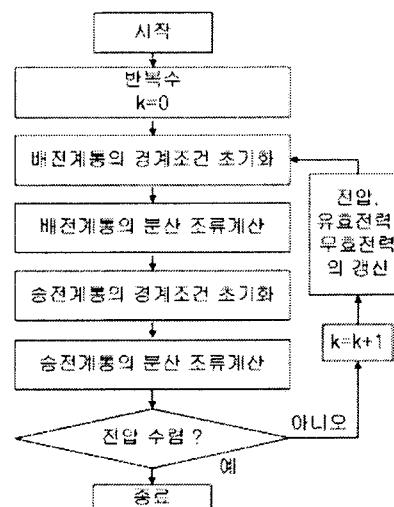


그림 3 송전과 배전 계통을 위한 분리형 계산에 기준한 결합 조류계산

1993.

- [5] D. Das, H. S. Nagi, and D. P. Kothari, "Novel method for solving radial distribution networks", *IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution*, Vol. 141, No. 4, pp. 291-298, July, 1994.
- [6] R. D. Zimmerman and H. D. Chiang, "Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems", *IEEE Trans., on Power Systems*, vol. 10, No. 4, pp. 2045-2052, Nov., 1995.
- [7] S. Naka, T. Genji, Y. Fukuyama, "Practical equipment models for fast distribution power flow considering interconnection of distributed generators", *Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 2, pp. 1007-1012, 2001.
- [8] A. Augugliaro, L. Dusonchet, M. G. Ippolito, and E. R. Sanseverino, "An efficient iterative method for load flow solution in radial distribution networks", *IEEE Porto Power Tech Proceedings*, Vol. 3, 2001.
- [9] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation", *IEEE Trans., on Power Delivery*, vol. 17, No. 3, pp. 822-827, July, 2002.
- [10] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power flow solution by Newton's method", *IEEE Trans., PAS-86*, pp. 1449-1456, 1967.