

최적조류계산 분산처리 기법의 비교

김호웅 박만근 김발호 김정훈  
홍익대학교 전기제어공학과

A Comparison of Distributed Optimal Power Flow Algorithm

Ho-Woong Kim Marn-Guen Park Balho H. Kim Jung-Hoon Kim  
School of Electrical Engineering, Hong-Ik University

**Abstract** - This paper compares two mathematical decomposition coordination methods to implementing the distributed optimal power flow(OPF) using the regional decomposition: the Auxiliary Problem Principle(APP) and the Alternating Direction Method(ADM), a variant of the conventional Augmented Lagrangian approach.

A case study was performed with IEEE 50-bus system.

1. 서 론

최적조류계산(Optimal Power Flow: OPF)이란 기술적, 물리적, 환경적 제약조건 하에서, 최소비용으로 전력계통을 운용하기 위한 해를 찾는 것으로서 경제급전과 조류계산을 총괄하는 기법이다. 60년대 초, 전력계통의 경제급전 문제의 연장선상에서 OPF 문제가 대두된 이래, 전력계통분야에서의 최적조류기법의 응용에 대한 관심은 지속적으로 증대되어 왔다. 특히, 전력산업 구조개편이라는 세계적 조류에 편승하여, 새로운 전력시장운용의 한 체제로서, 또한 적정 송전요율산정의 주요 기법으로서 최적조류계산에 대한 관심과 연구는 그 어느 때보다 크다 하겠다. 이에 따라 OPF의 역할도 과거 장기계통계획 등에서의 사후 검증용으로부터 실질적인 계통운용수단으로 바뀌었으며, 현대 전력요율제도의 근간이 되는 모션한계비용 계산의 유일한 수단이라는 점으로 인해 그 중요성과 활용성은 날로 증가하고 있다.

본 논문에서는 최신 수리기법중의 하나인 Alternating Direction Method(ADM)을 이용한 OPF의 분산처리기법을 소개하고, 이미 발표된 바 있는 APP 기법(1)과의 비교, 분석을 통하여 ADM 기법의 실용성 여부를 검토하였다.

2. 최적화문제의 분할

여기에서는 OPF의 분산처리를 위해 도입된 지역분할 기법의 개념 및 ADM 기법의 수리적 원리에 대해 간단히 살펴보기로 한다.

2.1 지역분할기법

먼저, 그림 1과 같이 7개의 독립된 지역으로 이루어

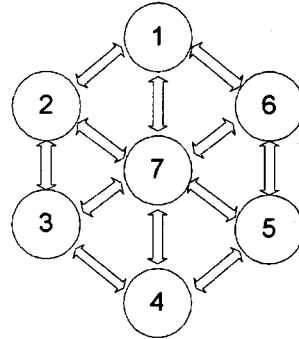


그림 1. 지역분할기법

진 대형 전력계통에서의 OPF 문제를 생각해보자. 그림에서, 각 원은 독립된 제어지역(Control Area) 또는 개별 전력회사를 나타내고 인접 지역간의 화살표들은 정보의 교환을 나타낸다.

지역분할기법이란 그림에서 보는바와 같이 지형적, 또는 자본적으로 이미 경계가 형성되어 있다면, 있는 그대로 나누자는 것이다. 만약, 우리나라 계통이라면 강 또는 산맥을 중심으로 적절히 나누면 될 것이다. 이렇게 지역적으로 문제를 나눈 다음, 독립된 지역에서 각각 OPF를 풀고 그 결과를 인접한 지역끼리 교환하여 최적해에 수렴될 때까지 계산과정을 반복해 나가는 것이다. 반복계산 과정 중에 각 지역간(또는 전력회사간)에 교환되는 정보의 내용은 최적해 판정을 위해 필요한 극히 일부분의 정보로서, 각 지역(또는 각 전력회사)의 생산비 함수 등과 같은 직접적인 정보는 전혀 포함되어 있지 않다.

2.2 알고리즘 ADM

다음으로 본 연구에서 사용한 지역분할기법 알고리즘을 설명하기 위해 먼저 다음과 같은 최적화문제를 생각해 보자.

$$(P) \min_{x,z} \{ f_a(x) + f_b(z) : Ax = z \} \quad (1)$$

여기서  $f_a, f_b$ 는 Convex Approximation이라고 가정한다.

그러면 원문제 (P)의 Augmented Lagrangian은 다음과 같이 되며,

$$L(x, y, z) = f_a(x) + f_b(z) + \lambda^T(Ax - z) + \frac{\gamma}{2} \|Ax - z\|^2 \quad (2)$$

여기서  $\lambda, \gamma$ 는 각각 Lagrangian Multiplier와 상수이다. (2)의 식은 마지막 항이 없는 일반 Lagrangian에 비해 해의 수렴성이 좋은 반면,  $\frac{\gamma}{2} \|Ax - z\|^2$  항 자체가  $f_a(x), f_b(z)$  두 문제에 Coupling Constraint로 작용해 문제의 분할을 어렵게 만들고 있다.

이러한 문제의 해결을 위해 1994년 Eckstein[2, 3] 등이 발표한 ADM 분할기법은 Augmented Lagrangian 문제인 식 (2)를  $x$ 에 대해서 먼저 최소화하고 다음에  $z$ 에 대해서 최소화한 다음, 마지막으로  $\lambda$ 를 update하는 방식을 채택하여 식 (2)에서 문제가 되었던 Coupling Constraint 문제를 해결하였다. 이 방법의 특징은 반복계산이 병렬로 수행되지 않고 순차적으로 수행된다는 점이다. 즉, 한 지역의 OPF가 수행되고 나면 그 다음 지역으로 OPF 수행이 넘어가고, 이렇게 해서 모든 지역의 OPF 계산이 종료되면, 비로소 Lagrangian Multiplier( $\lambda$ )를 update하게 된다.

ADM 기법은 순차적 최적화기법이라는 점에서 기존에 연구되었던 APP 보다는 병렬계산의 응용성이 떨어지나 수렴속도가 빠르고, 또한 OPF의 분산처리기법의 수학적 뒷받침이 된다는 점에서 흥미로운 기법이다.

### 3. 최적조류계산의 분산처리기법

본 논문에서는 지역분할기법을 이용한 분산처리기법을 위해 Dummy Generator라고 부르는 가상의 발전기를 도입한다. 이러한 가상의 발전기는 전력을 생산하거나 소비하는 역할을 하는 하나의 경제주체로서, 자신이 연결되어 있는 모선에서의 잠재비용에 따라 발전량을 결정한다. 본 연구에서는 DGDG(Dummy Generator-Dummy Generator) 기법으로 OPF의 분산처리계산을 구현하였다.

DGDG 기법은 그림 2와 같이 인접한  $a, b$  두 지역의 경계모선을 두 개로 나누어서 각 경계모선 ( $y_a, y_b$ )에 Dummy Generator를 투입하는 방법이다. 가령,  $a$ -지역에서  $b$ -지역으로 전력조류가 있다면,  $a$ -지역의 Dummy Generator는 음의 발전(전력 소비)을 하고  $b$ -지역에서는 양의 발전(전력 생산)을 하여 지역분할을 한 후에도  $a$ -지역에서  $b$ -지역으로 전력조류가 흐르는 것과 같은 상황을 구현하게 된다.

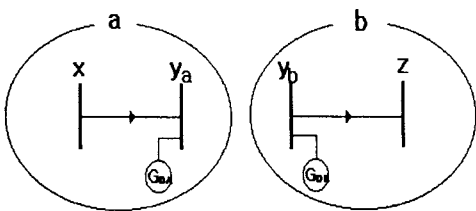


그림 2. DGDG 기법

다음은 앞에서 소개한 ADM 기법을 OPF의 분산처리해 응용하는 과정을 보인 것이다.

### Algorithm-ADM

$$(x^{k+1}, y_a^{k+1}) = \arg \text{Min}_{(y_b, z) \in B} \left\{ C_a(x) + \frac{\gamma}{2} \|y_a - y_b\|^2 + \lambda^{kT} y_a \right\}$$

$$(y_b^{k+1}, z^{k+1}) = \arg \text{Min}_{(x, y_a) \in A} \left\{ C_b(z) + \frac{\gamma}{2} \|y_b - y_a^{k+1}\|^2 - \lambda^{kT} y_b \right\}$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \gamma(y_a^{k+1} - y_b^{k+1})$$

### 4. 사례 연구

본 사례연구에서는 GAMS모형[4]의 Sub-Model인 MINOS5를 이용하여 OPF 프로그램을 분산처리하였다. 사례연구 대상 계통은 IEEE RTS 24-모선 계통으로, 분산처리 구현을 위해 2-area 50-모선 계통으로 변형하였다.

본 사례연구의 주 목적이 제안된 알고리즘의 수렴특성을 확인하는 것이므로, 참고문헌 [1]와 [5]에서 사용되었던 INTOPF(Interior Point OPF)와 같은 실전용 OPF 모형은 사용하지 않았으며, 따라서 계산속도(CPU time)의 비교는 수행하지 않았다.

표 1과 표 2는 본 논문에서 제안한 알고리즘 ADM을 이용한 OPF의 분산처리기법의 결과와 기존에 연구되었던 알고리즘 APP의 결과를 비교한 것이다. 각 표에는 반복횟수에 따른 두 지역을 연결하는 경계모선에서의 유효전력, 유효전력의 잠재비용, 전압 그리고 상차각에 대한 mismatch가 정리되어 있다. 무효전력 및 무효전력의 잠재비용은 지면상 수록하지 않았다. 결과에서 보듯이 알고리즘 ADM을 이용한 분산처리의 수렴특성이 기존에 개발된 APP 기법보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

표 1. 알고리즘 APP

반복횟수	$\Delta P$	$\Delta \lambda_P$	$\Delta V$	$\Delta \theta$
10	0.012	0.387	0.169	0.027
20	0.002	0.011	0.154	0.004
30	0.002	0.009	0.135	0.002
40	0.002	0.008	0.119	0.002
50	0.003	0.002	0.106	0.001
100	0.002	0.002	0.047	0.0007

표 2. 알고리즘 ADM

반복횟수	$\Delta P$	$\Delta \lambda_P$	$\Delta V$	$\Delta \theta$
10	0.002	0.015	0.146	0.004
20	0.002	0.006	0.112	0.002
30	0.002	0.002	0.091	0.001
40	0.002	0.001	0.080	0.001
50	0.003	0.007	0.056	0.0009
100	0.0008	0.002	0.010	0.0005

## 5. 결론 및 향후연구과제

새로운 전력시장의 도래는 OPF의 필요성을 급속히 부각시키고 있으며, 이에 대응한 새로운 최적화 기법의 개발은 OPF의 활용성을 한층 제고시키고 있다.

본 논문에서는 대형 OPF 문제를 처리하는 데 유용하게 사용될 수 있는 새로운 분산처리 기법을 제안하였다. 사례연구를 통한 비교 결과, 기존의 방법인 APP 기법보다 수렴특성면에서 우수함이 판명되었다. 다만, 실제 통 OPF 문제는 MINOS5와 같은 범용 전산모형이 아닌 실전모형에 의해 수행되고, 또한 계산속도 개선을 위한 정교한 계수조정이 병행되므로 본 논문의 사례연구만을 갖고, 알고리즘의 우열을 비교하는 것은 다소 무리가 있겠지만, 본 논문에서 제시된 ADM 분산처리기법은 기 개발된 APP 알고리즘과 충분히 경쟁할 수 있을 것으로 보인다.

앞으로의 과제는 본문에 보인 바와 같이 ADM 기법은 순차적 최적화기법으로서, APP 기법에 비해 수렴특성은 뛰어난 반면, 분산처리 능률이 다소 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점은 더 많은 사례연구와 함께 지속적인 연구를 통해 개선해 나가야 할 것이고, 더불어 안전도 제약조건이 고려된 SCOPF(Security Constrained OPF)의 연구가 필요하다 하겠다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Balho H. Kim and Ross Baldick. Coarse-grained distributed optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 932-939, August 1997.
- [2] J. Eckstein. Parallel alternating direction multiplier decomposition of convex programs. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 80(1):39-63, January 1994.
- [3] J. Eckstein and P.D. Bertsekas. On the douglas-rachford splitting method and the proximal point algorithm for maximal monotone operators. *Mathematical Programming*, 55(3):293-318, 1992.
- [4] Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus. *GAMS User's Guide*. The Scientific Press, Redwood City, CA, 1990.
- [5] Ross Baldick, Balho H. Kim, Craig Chase. A Fast Distributed Implementation of Optimal Power Flow. IEEE/PES Summer Meeting, San Diego, CA, 1998. ('99 Transactions 게재 예정)
- [6] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg. *Power Generation, Operation, and Control*. Wiley, New York, 2nd edition, 1996.