Alternating Direction Method를 이용한 최적조류계산의 분산처리

論 文
48A - 11 - 9

An Efficient Implementation of Optimal Power Flow using the Alternating Direction Method

金 豪 雄* · 朴 滿 根** · 金 發 鎬***
(Ho-Woong Kim · Marn-Guen Park · Balho H. Kim

Abstract - This paper presents a mathematical decomposition coordination method to implementing the distributed optimal power flow (OPF), wherein a regional decomposition technique is adopted to parallelize the OPF. The proposed approach is based on the Alternating Direction Method (ADM), a variant of the conventional Augmented Lagrangian approach, and makes it possible the independent regional AC-OPF for each control area while the global optimum for the entire system is assured. This paper is an extension of our previous work based on the auxiliary problem principle (APP). The proposed approach in this paper is a completely new one, however, in that ADM is based on the Proximal Point Algorithm which has long been recognized as one of the attractive methods for convex programming and min-max-convex-concave programming. The proposed method was demonstrated with IEEE 50-Bus system.

Key Words : Optimal Power Flow, decomposition, ADM, APP

1. 서 론

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

이와 같이 OPF가 경제급전이나 계통계획의 필수임은 누구나 인식하고 있음에도 불구하고, 실제 계통을 운전하거나 계획하는 데 있어 자주 이용되지 못하고 있는 가장 큰 이유는, 그 계산속도가 현실적이지 못하거나 또는 대형계통문제의 경우 解의 수렴성 및 신빙성에 이의가 제기되기 때문이다 (이것은 非線型計劃問題가 안고 있는 공통점이기도 하다). 그 외에도 解를 얻기 위해 도입된 비현실적인 假定들이 해의 신뢰성을 떨어뜨려 왔다는 점도 무시할 수 없다. 특히, 상정사고(Contingency) 등을 고려하기 위해서는 일반 OPF 문제에 비해 기하급수적으로 대형화된 문제를 해결해야 하는데, 해의 수렴성 뿐만 아니라 계산속도 면에서 커다란 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환이 OPF의 병렬계산, 또는 분산처리이다.

병렬계산의 효시는 1981년 발표된 Romeo의 논문[1]이라 할 수 있다. 이 논문에서는 여러개의 독립된 지역으로 구성된 계통의 경제급전문제를 병렬계산을 이용하여 해결하는 방법을 제시함으로써 이 후의 연구에 많은 영향을 미쳤다.

1994년 Wu와 Bose[2]는 LU-factorization과 Substitution Algorithm을 이용하여 Large-sparse System의 계통방정식을 푸는 방법을 제시하였고, Newton method 및 Fast Decoupled Newton method를 이용하여 조류계산을 수행하여 병렬계산의 실용가능성을 입증하였다.

초창기 병렬계산에는 이들 계산에 적합하도록 설계된 컴퓨터가 이용되었으며[3], Hypercube Multiprocessor를 이용하여 Danzig-Wolfe 기법을 처음 시험한 Sundarraj[4] 등을 필두로 상당한 연구가 있었다. 그러나 대부분의 병렬계산기법 연구가 Jacobian Factorization 같은 부분에만 치중되어 있어 실전적인 병렬계산이라 하기 어렵고, 최근에 들어서 전력계통 분야의 경우, 병렬계산보다는 오히려 대형컴퓨터에 의한 중앙 집중식연산에 의존하는 경향이 두드러지고 있는 실정이다.

1997년 Balho Kim과 Ross Baldick[5]은 지역분할기법(Regional Decomposition)과 Auxiliary Problem Principle (APP)을 응용한 새로운 OPF 기법을 발표하였다. 이 방법의 특징은 병렬계산을 위하여 대형문제를 분할할 때, 종래의 방법처럼 수학적으로 나누는 것이 아니라 지형에 따라 나누어 분산처리 하므로써, 한 전력계통에 다수의 전력회사가 존재할 경우 전력회사간의 직접적인 정보 교환이 없이도 최적해를 얻을 수 있다는 데에 있다.

* 準 會 員 : 弘益大 電氣制御工學科 碩士
** 準 會 員 : 弘益大 電氣制御工學科 碩士課程
*** 正 會 員 : 弘益大學校 電氣制御工學科 助敎授 · 工博
接受日字 : 1999年 5月 14日
最終完了 : 1999年 10月 21日

최근에는 Conejo와 Aguado 등이 여러 개의 지역으로 이루어진 계통에 Lagrangian Relaxation법을 이용한 DC-OPF 응용 방안을 제시하였다[6].

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

본 논문에서는 먼저 지역분할기법 및 ADM 기법의 기본원리에 관해 간략히 살펴본다. 그 다음, 지역분할기법과 ADM 기법이 OPF의 분산처리에 어떻게 적용되었는지에 대해 알아본 후, 간단한 사례연구를 통하여 ADM 기법의 실용성을 점검하기로 한다.

2. 최적화문제의 분할

여기에서는 OPF의 분산처리를 위해 도입된 지역분할기법의 개념 및 ADM 기법의 수리적 원리에 대해 간단히 살펴본다.

2.1 지역분할기법

먼저, 그림 1과 같이 7개의 독립된 지역으로 이루어진 대형 전력계통에서의 OPF 문제를 생각해보자. 그림에서, 각 원은 독립된 제어지역(Control Area) 또는 개별 전력회사를 나타내고 인접 지역간의 화살표들은 정보의 교환을 나타낸다. 이러한 대형 OPF 문제는 문제 그 자체의 해결이 불가능 할 수도 있고 (가령, 제약조건이 복잡한 10,000 모선 이상의 OPF 문제라든지), 또는 계산속도의 개선 등을 위해서라도 원래 문제를 적절한 분할기법을 이용해 몇 개의 작은 문제로 나누어 계산할 필요가 있다. 이 때의 당면 과제는 원문제를 '어떻게' 분할하느냐이다.

지역분할기법이란 그림에서 보는바와 같이 지형적, 또는 자본적으로 이미 경계가 형성되어 있다면 (그림의 경우는 각각의 원이 이에 해당), 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 (최적해 판정 및 구체적인 반복계산기법 구현에 대해서는 참고문헌 [5]와 [7]을 참조하기 바란다).

다음으로 본 연구에서 사용한 지역분할기법 알고리듬을 설명하기 위해 먼저다음과 같은 최적화문제를 생각해보자.

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

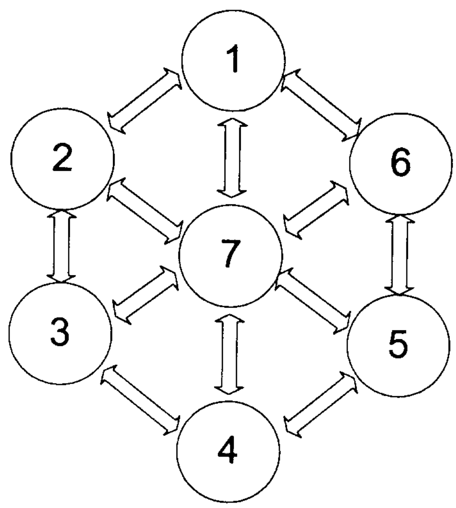

그림 1 지역분할기법
Fig. 1 Regional decomposition

여기서 f_a, f_b 는 Convex Approximation이라고 가정한다 (OPF의 경우 이들 함수는 각 지역의 발전기 비용함수가 된다).

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

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

여기서 λ, γ는 각각 Lagrange 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. 그 동안 이의 해결책으로 수 많은 방법이 제시되었으나 본 논문에서는 ADM 기법을 응용하였다.

2.2 알고리듬 ADM

Eckstein[8, 9] 등이 발표한 ADM 분할기법은 Augmented Lagrangian 문제인 식 (2)를 x에 대해서 먼저 최소화하고 다음에 z에 대해서 최소화한 다음, 마지막으로 λ를 update하는 방식을 채택하여 식 (2)에서 문제가 되었던 Coupling Constrant 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 Lagrange Multiplier(λ)를 Update 하게 된다. 이러한 알고리듬 ADM의 계산과정을 요약하면 다음과 같다.

Step 1: Initialization

Step 2: Solve

$$x^{k+1} = \arg\min\left\{f_a(x) + (\lambda^k)^{\dagger}Ax + \frac{\gamma}{2}\|Ax - z^k\|^2\right\}$$

Step 3: Solve

$$z^{k+1} = \arg\min\left\{f_b(z) - (\lambda^k)^{\dagger}z + \frac{\gamma}{2}\|Ax^{k+1} - z\|^2\right\}$$

Step 4: Compute $\lambda^{k+1} = \lambda^k + \gamma(Ax^{k+1} - z^{k+1})$

Step 5: Repeat Step 2-4.

ADM기법은 순차적 최적화기법이라는 점에서 앞의 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. 이 DGDG 기법은 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있으므로 여기에서는 그 기본원리만 간단히 소개한다.

3.1 DGDG기법

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)

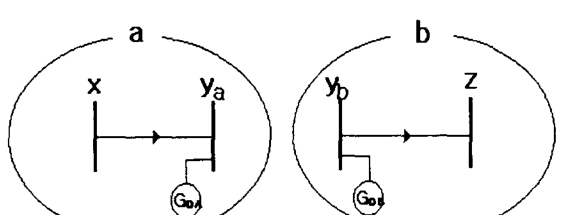

그림 2 DGDG 방법
Fig. 2 DGDG Scheme

을 하여 지역분할을 한 후에도 a-지역에서 b-지역으로 전력조류가 흐르는 것과 같은 상황을 구현하게 된다. 물론, 실제 OPF 문제를 풀 경우, 사전에 전력조류의 방향을 알 필요는 없다.

3.2 분산처리 알고리듬

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

Algorithm-ADM

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

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

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

여기서 λ_i는 제약조건 $y_{ai} - y_{bi} = 0$ 제약조건을 구속시키는 데 필요한 잠재비용(Shadow Cost)을 나타내며, $C_a(x)$, $C_b(z)$ 각각 a-지역, b-지역의 비용(연료비)함수를 의미하고, 분산처리를 위해 목적함수에 도입된 $\frac{\gamma}{2}\|y_a - y_b^k\|^2 + \lambda^{k^T}y_a$ 항은 Dummy Generator의 비용함수를 나타낸다.

4. 사례 연구

본 사례연구에서는 GAMS모형[10]의 Sub-Model인 MINOS5를 이용하여 OPF 프로그램을 분산처리 하였다. 사례연구 대상 계통은 IEEE RTS 24-모선 계통으로서, 분산처리 구현을 위해 2-area 50-모선 계통으로 변형하였다.

본 사례연구의 주 목적이 제안된 알고리듬의 수렴특성을 확인하는 것이므로, 참고문헌 [5]와 [7]에서 사용되었던 INTOPF(Interior Point OPF)와 같은 실전용 OPF 모형은 사용하지 않았으며, 따라서 계산속도(CPU time)의 비교는 수행하지 않았다 (MINOS5와 같은 범용 모형에서의 계산속도 비교는 무의미 함).

또한, 정교한 계수조정(parameter control)은 주어진 계통의 특성에 따라 다르기 때문에, 본 사례연구에서는 계수조정을 전혀 하지 않은 상태에서의 결과를 비교 대상으로 하였다. 참고문헌 [5, 7]에서 보인 바와 같이 정밀한 계수조정이 수반될 경우, 두 알고리듬 모두 6-7회의 반복계산과정만 거치면 0.01 pu 정도의 정확도에 도달할 수 있음을 부기하는 바이다.

표 1 알고리듬 APP

Table 1 Algorithm-APP

반복횟수	ΔP	$\Delta\lambda_P$	ΔV	$\Delta\theta$
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

표 2 알고리듬 ADM

Table 2 Algorithm-ADM

반복횟수	ΔP	$\Delta\lambda_P$	ΔV	$\Delta\theta$
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

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

5. 결 론

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 '수렴특성면'에서 우수함이 판명되었다. 다만, 실계통 OPF 문제는 MINOS5와 같은 범용 전산모형이 아닌 실전모형에 의해 수행되고, 또한 계산속도 개선을 위한 정교한 계수조정 작업이 병행되므로 본 논문의 사례연구만을 갖고, 알고리듬의 우열을 비교하는 것은 다소 무리가 있다. 다만, '기본 조건에서 우위를 보이는 알고리듬은 변동상황하에서도 적절히 대처할 수 있는 능력이 있을 것'이라는 유추를 수용한다면, 본 논문에서 제시된 ADM 분산처리기법은 기 개발된 APP 알고리듬과 충분히 경쟁할 수 있을 것으로 보인다. 현재 별도로 수행중인 ADM 기법의 활용방안 연구가 완료되면 제안된 ADM 기법의 실용성에 대한 평가가 가능하리라 보인다. 이에 대한 결과는 별도의 논문을 통해 소개하겠다. 여기에는 본 저자가 최근에 제안한 Proximal Point 기법을 이용한 PCPM OPF 알고리듬의 연구결과도 함께 소개될 것이다.

마지막으로, 본문에 보인 바와 같이 ADM 기법은 순차적 최적화기법으로서, APP 기법이라든지 추후에 소개될 PCPM 기법에 비해 수렴특성은 뛰어난 반면, 분산처리 능률이 다소 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점은 지속적인 연구를 통해 개선해 나갈 것이다.

본 연구는 1998년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임 (과제번호 : 982010103)

참고 문헌

[1] R. Romano, Victor H. Quintana, R, Lopez, and V. Valadez. Constrained economic dispatch of multi-area systems using Dantzig-Wolfe decomposition principle. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 100(4):2127-2137, April 1981.

[2] J.Q. Wu and A. Bose. Parallel solution of large-sparse matrix and parallel power flow. *Paper 94 SM 596-7 PWRS presented at the IEEE Power Engineering Society 1994 Summer Meeting, San Francisco, CA, July 15-19,* 1994.

[3] Task Force of the Computer and Analytical Methods Subcommittee of the Power System engineering Committee. Parallel processing in power systems computation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(2):629-637, May 1992.

[4] R.P. Sundarraj, S. Kingsley Gnanendran, and J.K. Ho. Distrubuted price-directive decomposition applications in power systems. *Paper 94 SM 596-7 PWRS presented at the IEEE Power Engineering Society 1994 Summer Meeting, San Francisco, CA, July 15-19,* 1994.

[5] 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.

[6] A. J. Conejo and J. A. Aguado Multi-Area Coordinated Decentralized DC Optimal Power Flow. IEEE Transactions on Power Systems, 1272-1278, November 1998.

[7] 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)

[8] J. Eckstein. Parallel alternating derection multiplier decomposition of convex programs. *Journal of Opti-*

mization Theory and Applications, 80(1):39-63, January 1994.

[9] 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.

[10] Anthony Brooke, David Kendrick, and Alexander Meeraus. *GAMS User's Guide*. The Scientific Press, Redwood City, CA, 1990.

저 자 소 개

김 호 웅(金 豪 雄)
1973년 2월 21일 생. 1997년 홍익대 전자전기제어공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기제어공학과 졸업(석사).
Tel : 338-1621
E-mail : woongs@hanmail.net

박 만 근(朴 滿 根)
1970년 7월 6일 생. 1997년 홍익대 전자전기제어공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기제어공학과 석사과정.

김 발 호(金 發 鎬)
1962년 7월 11일 생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1997년 미국 UT at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1997년 미국 UT at Austin 전기공학과 졸업(공박). 1997년~현재 홍익대 전기제어공학과 조교수
Tel : 320-1462
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr