

보완 라그랑지안 승수 기법을 이용한 연계전력시장 청산

문국현*, 김지희*, 주성관*
고려대학교*

Interregional Market Coordination Using a Distributed Augmented Lagrangian Algorithm

Guk-Hyun Moon*, Ji-Hui Kim*, and Sung-Kwan Joo*
Korea University*

Abstract - 연계지역 전력시장 간의 에너지 거래는 전체 전력시장의 사회적 편익을 향상시키기 위해 이루어진다. 기존의 연계지역 전력시장 간 시장 최적화 문제를 다루는 중앙처리 접근방식은 경쟁적 전력시장 환경 하에서 적합한 모델이 아니다. 본 논문은 연계지역 전력시장 문제를 다루기 위해 보완 라그랑지안 승수 기법(Augmented Lagrangian Relaxation) 기반의 분산처리 최적화 방법을 제시한다. Block Coordinate Descent(BCD) 분산처리 기법이 보완 라그랑지안 승수의 최적화 문제를 분리하기 위해 적용된다. 연계시장 모델을 구현한 사례연구를 통해 제시된 알고리즘의 효율성을 입증한다.

1. 서 론

전력시장의 개방을 통한 경쟁 메커니즘의 도입에 따라 보다 효율적이고 합리적인 전력시장 모형 구축을 위한 노력이 이루어지고 있다. 합리적 운영을 위한 연구 방안 중 경제급전에 의한 시장처리는 전력시장의 사회효용을 향상시켜 준다는 면에서 중요한 관심 분야 중 하나이다. 최근에는 계통연계를 통해 경쟁 메커니즘의 전력시장 환경에 적합한 방법을 제시하기 위해 연계계통의 정보를 분산처리 하는 방법 대한 연구가 다각적으로 시도되고 있다[1,2].

연계계통의 분산처리 시장 최적화 문제(Distributed Market Optimization Problem)는 라그랑지안 승수 기법을 통해 주어진 제약조건들을 쌍대화 시켜 정식화 될 수 있다. 이 중 보완 라그랑지안 방법(Augmented Lagrangian Relaxation)을 통해 유도된 이차식을 분할시켜 분산처리 연산을 수행할 수 있게 하는 Block Coordinate Descent(BCD) 방법[3]은 기존의 라그랑지안 승수(Classical Lagrangian Relaxation) 방법보다 해의 수렴성이 뛰어나 분산 최적화 문제에서 널리 이용되고 있는 방법 중 하나이다. 본 논문에서는 분할된 시장 최적화 문제를 풀기 위해 BCD 분산처리방법에 Interior Point/Cutting Plane(IP/CP) 라그랑지안 갱신 기법[4]을 적용한 연계시장의 분산처리방식을 제안한다. 사례연구에서는 BCD 방법이 가지는 효율성을 입증하기 위해 4 모선 연계시장 모델에서의 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 연계시장 문제 정식화

분산처리 연계시장에서 BCD 분산처리 기법을 사용한 최적화 수식 모형을 제시하기에 앞서 연계시장 문제를 중앙처리 방식으로 정식화 시킨 후 이것을 지역별로 분할시켜 분산처리 방식으로 변환하는 방법을 서술한다.

2.1.1 중앙처리 시장 최적화 문제 정식화

N개의 개별시장들을 연계시켜 통합된 하나의 시장을 구성했다고 가정하면, 중앙처리 방식의 연계시장 최적화 문제는 아래의 식과 같이 정식화 될 수 있다.

$$\min_{X_k^i} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{M_i} f_k^i(X_k^i) \quad (1)$$

subject to:

$$B \cdot \theta + F = X - D \quad (1.1)$$

$$\sum_i g^i(X^i) = 0 \quad (1.2)$$

$$-L^{\max} \leq H(B)^{-1}(X - F - D) \leq L^{\max} \quad (1.3)$$

$$X_k^{\min} \leq X_k \leq X_k^{\max} \quad (1.4)$$

여기서 X_k^i 는 시장 i의 발전기 k의 공급량이며, $f_k^i(X_k^i)$ 는 발전기 k의 비용함수이고, θ 는 모선 전압위상각이다. 또한, X 는 유효전력의

출력량이며, D 는 유효전력수요를 뜻하고, L^{\max} 은 선로제약을 의미하는 변수이다.

주어진 목적함수(1)는 시장 i의 발전기 k의 비용함수를 최소화시키는 수식이다. 제약 식(1.1)은 연계시장의 수급균형을 나타내고, 식(1.2)은 연계시장 간의 전력조류 교차식이며, (1.3)과 (1.4)는 발전기와 송전망의 상하한 제약을 나타낸다.

2.1.2 Block Coordination Descent(BCD) 방법을 이용한 분산처리 시장 최적화 문제 정식화

중앙처리방법으로 유도된 시장 최적화 문제에 분산처리 최적화 기법을 적용시키기 위한 연계시장 분할법을 소개한다. 수식 (1)에서 유도한 중앙처리 시장 문제에 보완 라그랑지안(Augmented Lagrangian Relaxation)방법을 적용하면 다음 수식 (2)와 같이 전개될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N L^i = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^{M_i} f_k^i(X_k^i) \cdot \lambda \cdot \sum_i g^i(X^i) + c \cdot \left\| \sum_i g^i(X^i) \right\|^2 \right\} \quad (2)$$

보완 라그랑지안 방법을 통해 전개된 최적화 문제는 이차식 $\left\| \sum_i g^i(X^i) \right\|^2$ 성분으로 인해 분산처리 방법으로 수식 전개가 불가능

하다. BCD 방법을 수식 (2)에 적용하면, 전력조류 값을 고정된 형태로 이차식 성분을 분리시킬 수 있다. 분산처리 방법을 통해 정리된 시장 최적화 문제는 아래의 식 (3)과 (4)와 같이 정식화 된다.

$$\min_{X_k^i, \lambda^i} \left\{ \sum_{k=1}^{M_i} f_k^i(X_k^i) + \sum_{F_i} \lambda_{(n)}^i \cdot F^i + \frac{c}{2} \cdot \sum_{F_i, F_j} \left\| F^i - F^j \right\|^2 \right\} \quad (3)$$

$$\min_{X_k^j, \lambda^j} \left\{ \sum_{k=1}^{M_j} f_k^j(X_k^j) + \sum_{F_j} \lambda_{(n)}^j \cdot F^j + \frac{c}{2} \cdot \sum_{F_i, F_j} \left\| F_{(n+1)}^i - F^j \right\|^2 \right\} \quad (4)$$

여기서 (n)은 반복연산 횟수이며, c는 수렴속도를 결정하는 상수이고, F^i 와 F^j 는 각 연계시장에서 나가는 전력조류의 양이다. λ^i 과 λ^j 는 각 시장 최적화 문제의 라그랑지안 승수이고, 시장 i에서 들어오는 전력시장 가격정보로 해석할 수 있다. 유도된 수식의 쌍대 함수(dual function)는 아래의 수식 (5)와 같이 전개될 수 있다.

$$\max \phi^i(\lambda^i), \max \phi^j(\lambda^j) \quad (5)$$

쌍대 함수 $\phi(\lambda)$ 은 $\min L(X, \lambda)$ 로 정의된다. 적용된 BCD분산처리 방법의 수렴성은 [3]에서 그 증명과정이 제시되어 있다. 제안된 BCD방법은 보완 라그랑지안 승수 기법을 사용하여 원문제와 쌍대문제와의 수렴 해 차이가 적어 해의 최적성이 우수하며, 비동기식 통신 방식을 사용한다. 비동기통신 방식을 사용하면, 반복연산 과정에서 시장 정보들을 정해진 순서 없이 전달할 수 있어 새로 갱신된 정보를 전송하는데 걸리는 통신시간이 큰 경우 많은 시간을 절약할 수 있다.

2.2 Interior-Point / Cutting Plane 라그랑지안 승수 갱신 방법

본 논문에서는 라그랑지안 승수를 갱신하기 위해 Interior-Point/Cutting-Plane(IP/CP) 방법을 적용한다. IP/CP 방법은 기존의 Interior Point(IP)[4] 방법에 쌍대화 함수 영역에서의 analytic center를 구하는 연산을 적용시켜 최적 점을 찾는다. IP/CP 방법은 다 지역 연계 전력시장 문제에서 승수를 갱신하는데 있어 우수한 수렴속도를 보여준다[5]. IP/CP방법은 다음의 식 (6)과 같은 최적화 문제 형태로 정의된다.

$$\max \sum_i \{ \log \alpha^i | \alpha = c - Ax, s > 0 \} \quad (6)$$

subject to:

$$s = c - Ax \quad (6.1)$$

$$s \geq 0 \quad (6.2)$$

각 변수 행렬은 아래와 같이 구성된다.

$$A = \begin{bmatrix} I & -\xi^k \\ -1 & 0 \\ 0 & -I \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} z \\ \lambda \end{bmatrix},$$

$$s = \begin{bmatrix} s_z \\ s_\lambda \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} \phi(\lambda^k) - \lambda^{T(k)} \xi^k \\ -\theta^k \\ -\lambda_{\min} \\ \lambda_{\max} \end{bmatrix}$$

여기서 I는 크기를 결정하는 식별 벡터이고, ξ^k 는 쌍대화 함수의 기울기 값이며, θ^k 는 k번째 반복연산을 하는 동안 현재까지 기록된 최소 값을 뜻한다. 위의 최적화 문제 풀이를 통해 구해진 변수 α^i 를 통해 라그랑지안 승수는 아래의 식 (7)과 같이 갱신된다.

$$\lambda_{(n+1)} = \lambda_{(n)} + \alpha_{(n)} \cdot (F_{(n)}^i - F_{(n)}^j) \quad (7)$$

즉, 라그랑지안 승수는 전력조류 교차식과 변수 α^i 의 상태에 따라 수렴방향과 속도가 결정된다. 반복연산은 전력조류 교차식의 값이 허용 한계치 ϵ 내에 들어올 때까지 ($|F_{(n)}^i - F_{(n)}^j| \leq \epsilon$) 반복된다.

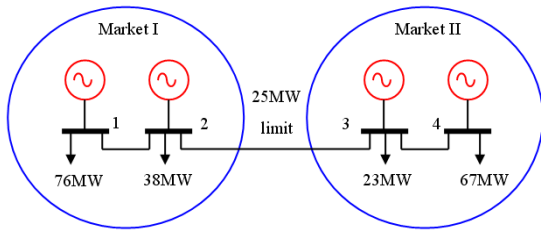
2.3 연계시장 분산처리 최적화 절차

연계전력시장 청산을 위해 본 논문에서 제안한 BCD 분산처리 방법은 연계시장 최적화 연산의 아래와 같이 그 과정을 정리 할 수 있다.

- i. N개로 이루어진 (분할된) 개별시장의 최적화 문제를 정식화 한다.
- ii. 각 시장 변수들과 알고리즘 파라미터들의 초기치를 설정한다.
- iii. 개별시장 i와 j에서 제시된 최적화 모형을 통해 수렴 해를 계산한다.
 $X_{(n+1)}^i := \operatorname{argmin} L^i(X_k^i, \lambda^i), X_{(n+1)}^j := \operatorname{argmin} L^j(X_k^j, \lambda^j)$
- iv. IP/CP방법을 적용하여 구해진 변수 α^i 와 전력조류 교차식을 통해 라그랑지안 승수를 갱신한다.
- v. 계산된 연계시장 간 전력조류 교차식의 절대 값의 차가 허용 한계치 ϵ 내에 수렴하는지 검사한다. 수렴조건을 만족하면 반복연산을 종료하고, 만족하지 않으면, 반복변수 (n)을 (n+1)로 갱신하고, 단계 iii으로 되돌아가서 반복연산을 수행한다.

2.4 사례연구

본 논문에서 제안된 BCD 분산처리 기법을 이용한 시장 최적화 문제를 검증하기 위해 두 개의 지역시장으로 연계된 4개의 모선으로 이루어진 시장모형<그림 1>을 사용한다. 주어진 사례연구 모델은 MATLAB optimization toolbox 환경 하에서 설계되었다. 연계전력시장 A와 B에 있는 모선의 발전기 입찰가격 정보는 <표 1>과 같다.



<그림 1> 4 모선 연계시장모델

<표 1> 각 발전기의 입찰가격정보

발전기 번호	입찰가격정보		
	$f(X) = \alpha \cdot X^2 + \beta \cdot X + \gamma$ (\$/h)		
	α	β	γ
G1	0.65	3.30	14.2
G2	0.46	3.11	13.5
G3	0.35	2.31	9.5
G4	0.30	2.50	8.8

문제의 간략화를 위해 전력 손실은 없다고 가정한다. 본 논문에서 제안하는 방법의 효율성을 검토하기 위해 i)BCD와 IP/CP 갱신방법과 iii)BCD와 Sub-Gradient 갱신방법[4]을 이용하여 도출된 결과를 서로 비교 분석한다. 반복연산 시 모든 발전기의 초기 값은 같게 두었으며, 각 시장의 전력조류 값 차의 허용 한계치 ϵ 는 $10^{-4}(MW)$ 으로 설정하였다. <표 2>에서는 중앙처리 방식을 이용하여 나온 발전기 별 출력량과 비

용정보를 제시하였다. 제시한 방법들의 결과 비교를 위해 계산에 소요된 시간과 중앙처리 방법의 수렴 해와의 오차율을 <표 3>에 제시했다.

<표 2> 중앙처리 방식을 이용한 최종 수렴 해

	G1	G2	G3	G4	Total
$X_k(MW)$	36.79	52.21	53.23	61.77	204.00
cost(\$/h)	1015.4	1429.3	1123.6	1307.9	4876.2

<표 3> 연계계통 모의실험 수행결과

분산처리 기법	라그랑지안 승수 갱신 방법	반복연산 횟수	소요시간(초)	수렴오차율 (%)
BCD	IP/CP	6	1.5469	100
	Sub-Gradient	12	2.4153	100

먼저, 각각의 분산처리 방법의 최종 해는 중앙처리 방법에 의해 얻어진 최적 해와 동일한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 그리고 BCD방법과 IP/CP 알고리즘을 사용할 경우 반복연산의 횟수와 연산소요시간이 기존의 Sub-Gradient 방법에 비해 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. 규모가 큰 시장 간의 계산에서는 연산 횟수와 소요시간이 늘어나므로 분산처리 기법이나 라그랑지안 승수 갱신 방법 간의 연산 소요시간 차이가 더욱 커질 것이라 판단된다.

3. 결 론

본문의 목적은 BCD 분산처리 방식의 효율성에 대해 분석하여 실제 계통환경에 적합한 형태의 시장 최적화 알고리즘을 제공하기 위함에 있다. 연계계통의 최적화 문제를 풀 때 적합한 최적화 알고리즘을 채택하는 것은, 전력시장을 효율적으로 운영하는데 있어 중요한 과제라고 볼 수 있다. 또한 사례연구를 통해 재현된 BCD 분산처리 방식에서 사용한 IP/CP 알고리즘은 기존의 Sub-Gradient 방식에 비해 연산소요시간을 줄여준다는 것을 확인하였다. 연계계통 중앙처리 방식의 최적화 문제에서 도출된 해와 일치하는 값을 얻을 수 있으므로 정확한 수렴 해를 제공한다는 것을 확인했다. 본 논문에서 제안한 IP/CP 알고리즘을 적용한 BCD 분산처리 기법 모형을 연계전력시장 청산을 위한 알고리즘에 적용한다면 좋은 성과를 거둘 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-2-025)주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] P. N. Biskas and A. G. Bakirtzis, "A Decentralized Implementation of DC Optimal Power Flow on a Network of Computers," IEEE Trans. Power Systems, vol. 20, no. 1, pp. 25-33, Feb. 2005.
- [2] P. N. Biskas and A. G. Bakirtzis, "Decentralised Security Constrained DC-OPF of Interconnected Power Systems," IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., vol. 151, no. 6, pp. 747-754, Nov. 2004.
- [3] P. Tseng, "Convergence of a Block Coordinate Descent Method for Nondifferentiable Minimization," Journal of Optimization Theory and Application, vol. 109, no. 3, pp. 475-493, June 2001.
- [4] V. H. Quintana and G. L. Torres, "Introduction to Interior-Point Method," IEEE Trans. Power Systems, vol. 16, no. 3, 2001.
- [5] J. A. Aguado and V. H. Quintana, "Inter-Utilities Power-Exchange Coordination: A Market-Oriented Approach," IEEE Trans. Power Systems, vol. 16, no. 3, pp. 513-519, Aug. 2001.
- [6] K. B. Song, "Efficient Optimization Algorithms for Constrained Power Economic Dispatch," Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 1995.