

비동기분산처리 방식을 이용한 연계전력시장청산

문국현\*, Anni Huang\*\*, 주성관\*, 위영민\*, 송경빈\*\*\*  
\*고려대학교, \*\*North Dakota State University, \*\*\*송실대학교

Asynchronous Decentralized Optimization Method for Coordinating Electricity Markets

Guk-Hyun Moon\*, Anni Huang\*\*, Sung-Kwan Joo\*, Young-Min Wi\*, Kyung-Bin Song\*\*\*  
\*Korea University, \*\*North Dakota State University, \*\*\*Soongsil University

**Abstract** - This paper presents an asynchronous decentralized optimization method to coordinate energy trading between electricity markets. The proposed method decomposes the market optimization problem of interconnected electricity markets into individual market optimization problems. The decomposed problem is solved by using the Interior Point/Cutting Plane (IP/CP) method with asynchronous communication model. A numerical example is presented to validate the effectiveness of the proposed method.

1. 서 론

북미와 유럽의 많은 국가에서 전력산업에 경쟁적인 전력시장이 개설되고 국경(혹은 지역경계)을 넘어서 국가(혹은 지역)간 전력거래가 증가하면서, 연계전력시장(Interconnected Electricity Markets)의 경제문제(Seam Issues)[1] 해소를 통한 국가(혹은 지역)간 전력거래 활성화를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문은 비동기분산처리방식을 이용하여 시장간 전력 거래 시 발생할 수 있는 경제문제를 해소하고 연계전력시장을 청산하는 방법을 소개한다.

연계시장 분산처리 시장최적화문제(Market Optimization Problem)는 라그랑지 방법들을 통해 제약조건을 생대화 시켜 정식화 될 수 있다[2]. 이 중 라그랑지 승수보완을 통해 얻어진 정식을 분할시켜 연산을 수행하는 최적화 방법인 Auxiliary Problem Principle(APP) 방법은 해의 수렴성이 뛰어나고 수식이 간결해, 대규모 전력계통의 분산최적조류문제(Distributed Optimal Power Flow)를 푸는데 널리 이용되고 있는 방법 중 하나이다[3]. 본 논문에서는 분할된 시장최적화문제를 풀기위해 Interior Point/Cutting Plane(IP/CP)방법[4, 5]과 대부분의 분산최적조류계산법에서 사용되고 있는 동기 통신방식[6]대신 비동기통신 방식[7]을 이용한 연계시장의 분산처리방식을 제안한다. 사례연구에서는 IP/CP 방법이 가지는 효율성을 입증하기 위해 APP 방법과의 비교결과를 제시하고, 또한 비동기 방식과 동기 방식이 가지는 차이점을 IP/CP 방법을 이용해 비교분석한다.

2. 본 론

2.1 연계시장 문제 정식화

본절에서는 연계시장 문제를 중앙처리 방식으로 정식화 시킨 후, 정식화된 문제를 지역별로 분할시켜 분산처리 방식으로 변환하는 방법을 서술한다.

2.1.1 중앙처리 최적화 문제 정식화

N개의 개별시장들을 연계시켜 중앙처리 방식의 통합된 하나의 시장을 구성했다고 가정해보자. 이 때, 각 개별시장 i (i ∈ N)의 발전기의 수는 모두 N<sup>i</sup> 개이다. 그러면 시장 i 에 있는 모선 k의 발전기 공급입찰 함수는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$p_k^i = a_k^i q_k^i + b_k^i, \quad k \in N^i \quad (1)$$

여기서,

- a<sub>k</sub><sup>i</sup> : 발전기 공급입찰계수
- b<sub>k</sub><sup>i</sup> : 발전기 공급부동계수
- p<sub>k</sub><sup>i</sup> : 발전기 전력입찰가격계수
- q<sub>k</sub><sup>i</sup> : 발전기 전력공급계수
- N<sup>i</sup> : 시장 i 에 존재하는 발전기 개수

중앙처리 방식의 연계시장 최적화 문제는 아래의 식과 같이 정식화 시킬 수 있다.

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N^i} \frac{1}{2} a_k^i (q_k^i)^2 + b_k^i q_k^i \quad (2)$$

subject to

$$B^i \cdot \theta^i = Q^i - D^i \quad (2.1)$$

$$-F^{\max i} \leq H^i(B^i)^{-1}(Q^i - D^i) \leq F^{\max i} \quad (2.2)$$

$$0 \leq q_k^i \leq q_k^{\max} \quad (2.3)$$

$$D^i \geq 0 \quad (2.4)$$

각 변수들이 의미하는 바는 다음과 같다.

- F<sup>max i</sup> : 선 l 의 조류한계치
- Q : 발전기의 유효전력 출력벡터
- θ : 모선의 전압 위상각벡터
- D : 모선의 유효전력 수요 벡터
- B : 전력조류의 전압 각을 나타낸 행렬
- H : 선형화 된 조류 행렬

제약 식 (2.1)은 연계시장의의 수급균형을 나타내고, 식 (2.2)은 송전망 제약조건을 나타낸다. 식 (2.3)은 발전기 출력의 상하한 제약조건을 나타낸다.

2.1.2 분산처리 최적화 계산 기법

수식 (2)에 연계시장의 분산처리 최적화 기법을 적용하기 위한 연계시장 분할법을 소개한다. 정식화된 중앙처리 방식의 연계시장 문제에 전력조류 값을 고정시키면 개별시장 i 를 연계시장으로부터 분리시킬 수 있다. 상수항을 생략하면 목적함수는 아래와 같이 분할되어 정식화 된다.

$$\text{minimize} \sum_{i \in N_i} \left( \frac{1}{2} a_k^i (q_k^i)^2 + b_k^i q_k^i \right) + \sum_{j \in X_j, i \in X_i} (\alpha_{ji} - 2\gamma_i \theta_j)(\theta_i - F_{ij}) \quad (3)$$

subject to

$$B^i \cdot \theta^i + F^i = Q^i - D^i \quad (3.1)$$

$$-F^{\max i} \leq H^i(B^i)^{-1}(Q^i - F^i - D^i) \leq F^{\max i} \quad (3.2)$$

$$0 \leq q_k^i \leq q_k^{\max} \quad (3.3)$$

$$D^i \geq 0 \quad (3.4)$$

여기서 라그랑지 승수 α<sub>ji</sub>는 시장 i 에서 들어오는 전력시장 가격정보로 해석할 수 있고, γ<sub>i</sub>는 수렴속도를 결정하는 상수로써 반복연산 과정 중에 항상 고정된 값을 가진다.

2.2 Interior Point/Cutting Plane

수식 (3) 최적화 문제의 해를 구하기 위해 본 논문이 이용할 Interior Point/Cutting Plane 알고리즘은 IP 방법에 Cutting Plane 개념을 적용시킨 것으로써 반복연산 수행시 생대화 함수 영역에서의 analytic center를 계산한다. 이 영역은 집합형태로 다음의 식으로 정의된다.

$$\Omega^{(k)} = \{x : s = c - Ax\} \quad (4)$$

Analytic center를 구하는 것은 다음과 같이 로그 함수의 합으로 이루어진 수식으로 표현된다.

$$\text{maximize} \sum_i \log s_i \quad (5)$$

subject to

$$s = c - Ax$$

$$s \geq 0$$

각 행렬은 아래와 같이 구성된다.

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

$$s = \begin{bmatrix} s_z \\ s_\lambda \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} \phi(\lambda^k) - \lambda^{T(k)} \xi^k \\ -\theta^k \\ -\lambda_{\min} \\ \lambda_{\max} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

I 는 차원을 나타내는 식별 벡터이고,  $\phi(\lambda)$ 는 쌍대화 함수이며,  $\theta^k$ 는 k번째 반복연산을 하는 동안 현재까지 기록된 최소 값을 뜻한다.

### 2.3 통신 방식

정보 교환 메커니즘과 정보갱신 순서를 결정하는 일은 최적화 연산을 수행하는데 중요한 영향을 끼치므로, 연계시장 간 통신방식이 해석되어야 할 필요가 있다. 연계전력시장 청산을 위해 분산처리방법을 이용 반복연산 수행 시 각 시장들은 서로 다른 상태의 시장정보를 가진다. 이러한 시장정보의 불일치 문제를 풀기 위해서 각 시장들의 전력조류 변수 벡터를 도입한다. 연계시장 간의 반복연산을 통해 전력조류 변수벡터가 갱신되고, 갱신된 정보는 상대 시장으로 전달된다. 이 때, 전력조류가 객체함수를 포함하고 있지 않다면 각 반복연산 단계에서 고정된 변수 값을 유지한다. 각 시장의 변수벡터가 수렴할 때까지 정보를 새로이 갱신하고, 상대 시장에게 전달하는 것을 반복한다.

통신 방식은 연계시장 간 정보를 전달하는 순서의 유무에 따라 크게 동기통신 방식과 비동기통신 방식으로 나눌 수 있다. 동기통신 방식의 모델에서는 연계시장 간 필요한 시장 정보를 전달할 때 들어온 순서에 따라 보내야 하는 규칙을 따라야 한다. 반면, 비동기통신 방식의 모델에서는 시장 정보들을 정해진 순서 없이 전달할 수 있어, 빠르게 처리되는 정보를 다른 정보가 처리될 때까지 기다릴 필요 없이 바로 전달할 수 있다. 이 같은 이유로 비동기 방식은 동기 방식에 비해 더 복잡한 통신 방식을 가지지만, 더 최근정보를 이용하여 분할된 시장최적화문제를 풀 수 있는 이점이 있다.

### 2.4 연계시장 분산처리 최적화 절차

연계전력시장청산을 위해 본 논문에서 제안된 비동기통신 방식을 이용한 분산처리 반복연산의 절차는 아래와 같이 정리 될 수 있다.

1. N개로 이루어진 (분할된) 개별시장의 최적화 문제를 정식화 한다.
2. 각 시장에 대한 최초의 해를 구한다.
3. 각 개별시장에서 최적화 모형을 통해 수렴 해를 구한다.
4. 연계시장들 간의 갱신된 정보를 비동기 방식을 이용하여 교환한다.
5. 각각 시장은 계산된 연계시장간 전력선을 통한 외부전력조류의 절대 값이 같거나 절대 값의 차가 허용 한계치  $\epsilon$ (MW) 내에 수렴하는지 검사하여 해들이 수렴조건을 만족하면 연산을 종료한다. 만약 만족하지 않는다면, 단계 3으로 되돌아가서 연산을 반복한다.

이때 수렴한 해는 중앙처리 방식의 최적화 문제에서 구한 값과 동일해야 한다.

### 2.5 사례연구

본 논문에서 제안된 비동기분산처리방식을 검증하기 위해 <그림 1>에서 보여주고 있는 바와 같이 전력시장A와 전력시장B가 연계된 연계시장모형을 이용하였다. 각 시장의 라그랑지 승수는 그들 개별시장과 연관되어 있고 그 것의 변수들에게 영향을 준다. 전력시장 A와 B에 있는 모선의 발전기 입찰가격 정보는 <표 1>과 같다.

<표 1> 각 발전기의 입찰가격정보

	G1	G2	G3	G4
$a_i$ (\$/MW)	0.8	1.6	1.6	0.8

연계시장을 중앙처리 방식으로 최적화 문제를 풀었을 때의 결과 값을 <표 2>에 제시하였다.

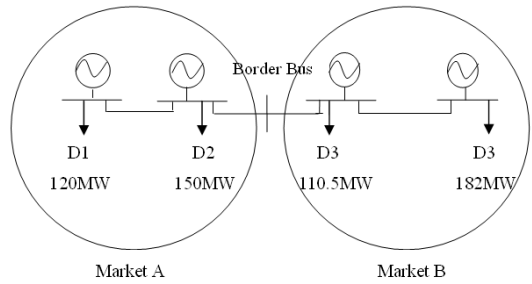
<표 2> 중앙처리 방식을 이용한 최종 수렴 해

	G1	G2	G3	G4
$q_i$ (MW)	187.5	93.75	93.75	187.5
Nodal Price(\$)	300	300	300	300

문제를 간단히 하기 위해 각 발전기들과 송전망은 무한대의 한계용량을 갖는다고 가정한다. 본 논문에서 제안하는 방법의 효용성을 검토하기 위해 i)APP와 동기통신방식, ii) IP/CP와 동기통신방식 그리고 iii) IP/CP와 비동기통신방식을 이용하여 도출된 결과를 비교분석한다. 각 시장의 외부조류의 절대 값들의 차이가 허용오차 내에 들어올 때까지 반복연산을 계속해서 수행한다.

제시한 방법들의 결과 비교를 위해 계산에 소요된 시간과 연계시장중

양처리 방법의 수렴 해와의 오차율을 <표 3>에 제시했다. 반복연산 시 모든 발전기의 초기 값을 같게 두고 계산을 시작했다. 각 시장의 전력조류  $F_{12}$ 와  $F_{21}$ 의 절대 값이 같거나 절대 값의 차가 허용오차범위 이내에 있을 때까지 연산은 반복된다.



<그림 1> 4개 모선의 연계 전력시장 사례모형

<표 3> 연계시장 모의실험 수행결과

최적화기법	통신방식	반복연산수	소요시간(초)	오차율(%)
APP	동기방식	41	2.6230	0.10
IP/CP	동기방식	6	1.5469	-
IP/CP	비동기방식	5	1.1406	0.01

각각의 분산처리 방법의 최종 해는 중앙처리 방법에 의해 얻어진 최적 해와 거의 동일한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 같은 동기통신 방식 모형에서 최적화 방법 간 차이를 비교해보면 IP/CP 방법이 APP 방법에 비해 연산속도가 69.63% 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. IP/CP를 사용할 때 반복연산 횟수는 별 차이가 없었지만, 소요시간에서 비동기 방식을 이용할 때 동기방식을 이용할 때에 비해 35.62% 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. 규모가 큰 시장 간의 계산에서는 연산 횟수와 소요시간이 늘어나므로 최적화 기법이나 통신방식 간의 연산 소요시간 차이가 더욱 커질 것이라 사료된다.

## 3. 결 론

연계전력시장 청산을 위한 분산처리방식 구현에 적합한 최적화방법과 시장간 통신방식을 채택은 연계전력시장을 경제문제를 해소하여 시장간 전력거래 활성화를 위해 중요하다. 본 논문의 사례연구에서는 IP/CP 방법이 APP 방법에 비해 해에 수렴시간이 더 짧은 것을 보였다. 또한 같은 최적화 방식일 경우 비동기 통신방식이 기존에 주로 쓰이는 동기통신 방식에 비해 총 연산 소요시간을 줄여준다는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 비동기통신 방식을 이용한 IP/CP 방법을 연계시장 분산처리를 위한 알고리즘에 적용한다면 좋은 성과를 거둘 것이라 생각된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] N. S. Rau, "Issues in the Path Toward an RTO and Standard Markets," IEEE Trans. Power Systems, vol. 18, no. 2, pp. 435-443, May 2003.
- [2] A. G. Bakirtzis and P. N. Biskas, "A Decentralized Solution to the DC-OPF Power Systems" IEEE Trans. Power Systems, vol. 18, no. 3, pp. 1007-1013, 2003.
- [3] B. H. Kim, "A Study on Distributed Optimal Power Flow," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1997.
- [4] J. A. Aguado and V. H. Quintana, "Inter-Utilities Power-Exchange Coordination: A Market-Oriented Approach," IEEE Trans. Reliability, vol. 41, no. 2, pp. 513-519, 1992.
- [5] M. Madrigal and V. H. Quintana, "Interior-point/cutting-plane methods for unit commitment problems," IEEE Trans. Power Systems, pp. 179-185, 1999.
- [6] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, "Parallel and Distributed Computation Numerical Method," Chapter 6, Prentice-Hall, 1989.
- [7] K. B. Song, "Efficient Optimization Algorithms for Constrained Power Economic Dispatch," Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 1995.