

분권화된 송전선로 혼잡관리를 위한 정보공유 프로토콜 개발

정재우, 송성환, 윤용태, 문승일  
서울대학교

Information Exchange Protocol Design for Decentralized Congestion Management

Jae-Woo Jeong, Sung-Hwan Song, Yong Tae Yoon, Seung-II Moon  
Seoul National University

**Abstract** - 전력시스템은 기존에 수직통합체제에서 벗어나 시장이라는 운영체제로 발전되고 있다. 이는 시스템의 불안정한 요소를 증가시키고 있으며, 이에 따라 시장체제 하에서 송전선로의 혼잡관리는 시스템을 안정적으로 운영될 수 있게 하는 중요한 요소 중의 하나로 간주되고 있다. 현재 사용되고 있는 최적조류계산(OPF) 방법은 송전선로 혼잡을 직접적으로 해결할 수 있는 방법이지만, 그 계산에 있어 시장 참여자들의 세부적인 정보의 공개를 요구하기 때문에 경쟁 시장체제에는 적당한 방법이 아니다. 따라서 본 논문에서는 시장 체제에 적합하도록 제한된 정보하에서 분권화된 계산을 통한 혼잡관리 방식과 이에 따라 필요한 정보공유 프로토콜을 제안하였다. 제안된 방법은 간단한 3모션 시뮬레이션을 통해 검증토록 하였다.

1. 서 론

전력시스템의 운영은 기존에 수직통합체제에서 벗어나 경쟁도입이라는 큰 변화를 겪고 있다. 시장이라는 운영체제는 기존의 통합적인 운영방식에 비해 시스템의 불안정한 요소를 증가시키고 있으며, 특히 송전선로의 혼잡관리는 시스템을 안정적으로 운영될 수 있게 하는 가장 중요한 요소로 나타나고 있다. 혼잡관리의 광의적 의미는 실제 전력거래에 대해 혼잡발생 요소를 미리 차단하는 것이며, 전력시스템의 사고와 독점적 전력가격을 예방하는 것이다. 또한 이는 혼잡이 발생하였을 때 서로 다른 계약 당사자 간에 혼잡비용(charge)과 혼잡수입(credit)을 관리하는 것이며, 시스템 설비에 대한 손상을 막는 것을 의미한다 [1].

전력시장체제에서 선로사용료 부가는 크게 Hogan에 의해 제기된 FTR 방식 [2]과 Chao 와 Peck이 주장한 FGR 방식 [3],[4]으로 구분될 수 있다. 그리고 FTR과 FGR은 각각 적용되는 방식이 다르고 여기에 대한 각각의 합리성에 대한 끊임없는 논쟁이 계속되고 있지만, 다른 계산방법을 통해서 같은 최적의 사회적 후생점에 도달함도 제기되었다 [5].

본 연구에서는 혼잡관리를 위해서 분권적인 방식을 이용한 선도시장 운영과 선도시장의 성공적인 운영을 위해 필요한 시장참여자들 사이의 조약화된 정보공유 체제에 대해 살펴본다.

이어서는 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 정보공유 체제를 만드는 과정에 대해 논하고, 3장에서는 정보공유체제를 통해 혼잡관리가 이루어지는 과정에 대해 살펴볼 것이다. 4장의 간단한 예제를 통한 검증과 5장의 결론을 끝으로 본 논문을 마무리 하도록 하겠다.

2. 정보공유 프로토콜

본 장에서는 혼잡문제를 해결하기 위해 선도시장에서 정보공유의 중요성을 가능하고자 한다.

재dispatch(re-dispatch)과 같은 중앙집중식 혼잡관리방식은 시스템의 안정성이 중요시 되는 시스템 환경에서는 적합한 방식이나 시장참여자 간에 합리적인 경쟁을 유도하고 이러한 시장 경쟁을 통해 어떤 부가가치 창출이 요구되는 전력시장 환경을 위해서 분권적 방식이 적합한 방안이 될 것이다. 그래서 본 연구에서는 선도시장은 분권적 방식으로, 현물 시장은 중앙 집중식 방식으로 운영하는 절충안을 제안한다.

<그림 1>에서와 같이 선도시장은 혼잡관리를 위해 분권적 scheme으로 운영되는데 계통운영자는 이 때 시장참여자들에게 다음과 같은 정보를 주어야 한다.

- 장기적 정보 (Long-term Information) : 지역 구분 (ZONE[K])

이 정보는 장기적인 시간 년별 또는 계절별로 제공되어야 한다. 각각의 지역은 혼잡가능선로(flowgate)에 대해 시스템의 상태 변화에 따라 비슷한 가격신호를 보여주는 모션들을 그룹화 함으로써 나누어질 수 있다 [6]. 이러한 정보를 제공하기 위해 계통운영자는 아래의 전력전송분배계수를 혼잡가능선로( $l = \text{flowgate}$ )에 적용하여 산출하는 것이 바람직하다.

- 중기적 정보 (Mid-term Information) : 전력전송분배계수 -PTDF- ( $H_{ij}[k]$ )

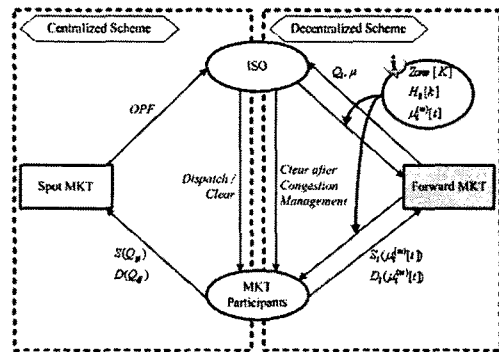
이 정보는 중기적 시점인 월별, 주별로 제공되어야 한다. 이 정보를 제공하기 위해서는 DC 조류계산이 가정이 되어야 하며 DC 조류계산을 통하여 선로에 흐르는 조류는 다음과 같이 주어진다.

$$F_i = \sum_{g1} H_{i,g1} Q_{g1} - \sum_{d1} H_{i,d1} Q_{d1} \quad (1)$$

$$H = \text{diag}\left(\frac{1}{X_{ij}}\right)AY^{-1} \quad (2)$$

$X_{ij}$  : reactance matrix,  $A$  : incidence matrix,  $Y$  : admittance matrix

- 단기적 정보 (Short-term Information) : 송전망 혼잡비용 ( $\mu\{t\}$ )  
이 정보는 거의 매시간 단위로 제공되어야 한다. 본 연구에서 제안하는 방식에서는 선도시장에서 분권적 방식을 적용하기 때문에 다음과 같이  $\mu$ 값 초기값을 현물시장의 평균값으로 하여 정하는 것을 제안한다.  
 $\mu_i^{initial} = E(\mu_i^s)$  (3)



<그림 1> 혼잡관리를 위한 정보공유 프로토콜

위 <그림 1>과 같이 혼잡처리를 위한 중앙 집중적인 방식과 분권적인 방식의 절충안을 바탕으로 선도시장에서 분권적 방식을 이용한 혼잡처리 문제에 대해 정보공유를 통해서 어떻게 처리되는가에 관하여 다음 장에서 다루도록 하겠다.

3. 분권적인 혼잡관리 알고리즘

3.1 OPF의 수학적 모델링

앞서 언급하였듯이 OPF는 전력계통의 혼잡을 직접적으로 해결할 수 있다. 따라서 OPF 모델은 계통운영의 최적화된 운전점을 나타낸다. OPF 모델링은 다음과 같은 가정이 수반되어야 한다.

- 전압과 무효전력이 무시된 DC 조류계산이 사용된다.
  - 선로 제약만 고려되며, 발전기 한계전력량은 고려치 않는다.
  - 이윤 또는 비용 함수는 각 모션별로 2차함수로 표현 될 수 있다.
- OPF는 사회 후생비용을 최대화하는 것을 그 목적으로 하며, OPF의 수학적 모델은 다음과 같이 표현 된다.

$$\max \left\{ \sum_{j=1}^m B(Q_{d,j}) - \sum_{i=1}^n \alpha(Q_{g,i}) \right\} \quad (4)$$

$$s. t. \{ H \cdot Q \} \leq F^{max} \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 부하모션의 개수,  $n$ 은 발전모션의 개수이고,  $B(Q)$ 와  $\alpha(Q)$ 는 각각 부하 이윤함수 및 발전 비용함수를 나타낸다. 제약조건에서  $H$ 는 PTDF를 나타내고  $F^{max}$ 는 선로의 한계용량을 나타낸다.

3.2 분권적인 혼잡관리 모델

분권적인 전력 시장에서 계통 운영자는 OPF를 풀기에 충분한 정보를 지니고 있지 않다. 따라서 계통운영자의 예측에 의해 혼잡이 나타날 것이 예상되는 선로에 대해 미리 혼잡요금정보를 제시하고, 시장 참여자들은 이 정보를 바탕으로 자신들의 이윤 최대화를 위한 발전량을 입찰할 것이다. 계통운영자는 각각의 시장 참여자들이 제시한 발전량 정보를 종합하여 다시 선로에 제약이 걸리는 여부를 확인하고, 선로에 제약이 없다면 각 시장 참여자들의 발전량 및 송전 제약요금을 확정하고, 제약이 발생할 경우 각 시장 참여자들로 하여금 자신들의 이윤이 최대가 되는 발전량으로 입찰할 수 있게끔 혼잡요금 정보를 갱신하여 제공한다. 즉, 계통운영자가 OPF를 풀어서 송전선로 혼잡을 관리하는 방식이 아니라, 제한된 정보를 바탕으로 각각의 시장참여자들이 자신의 이윤을 최대로 하는 방향으로 혼잡이 관리 되는 것이다 [7]. 분권화된 송전선로 혼잡관리에서도 OPF와 같은 가정이 사용된다.

분권적인 혼잡관리의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\max J_i = \max \sum_{j=1}^M B_j \left( \sum_{m=1}^M Q_{d,j}^{(m)} \right) - \sum_{i=1}^N C_i \left( \sum_{m=1}^M Q_{g,j}^{(m)} \right) \quad (6)$$

$$- [H \cdot Q - F_i^{\max}]^T \cdot \mu$$

여기서 변수들의 의미는 OPF와 같고,  $M$ 은 전체 거래를 의미한다. 계통 운영자들은 시장 참여자들로부터 제공되는 각각의 발전량 정보를 바탕으로  $\mu$ 값 즉, 선로 혼잡비용을 갱신하게 되는데 이 방법은 다음과 같다.

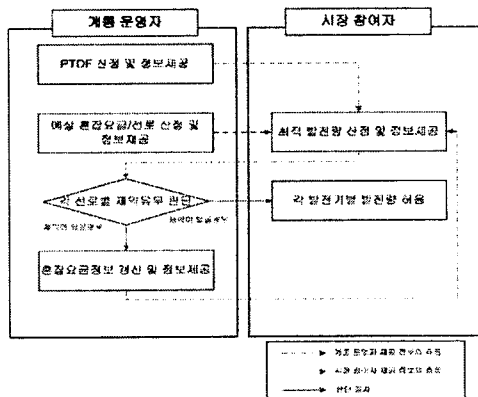
$$\mu_i^{k+1} = \mu_i^k + \Delta \mu_i^k \quad (7)$$

$$\text{where, } \Delta \mu_i^k = \beta \cdot \left( \left[ H \cdot \sum_{m=1}^M Q^{(m)} \right] - F_i^{\max} \right) \quad (8)$$

$\mu$ 값은 시장 참여자들로부터 제공되는 정보인  $Q^{(m)}$ 량을 바탕으로 갱신되며, 여기서  $k$ 는 수렴 가속도 상수를 의미한다. 위와 같은 방식으로 계통운영자들은 혼잡선로의 가격정보를 갱신하며, 전 선로에 흐르는 전력이 허용량을 넘지 않을 조건을 만족할 때까지 가격정보를 갱신하여 시장에 제공한다. 여기서 가격정보 갱신이 멈추지는 조건은 다음과 같다.

$$\left[ H \cdot \sum_{m=1}^M Q^{(m)} \right]_i = F_i^{\max} \quad (9)$$

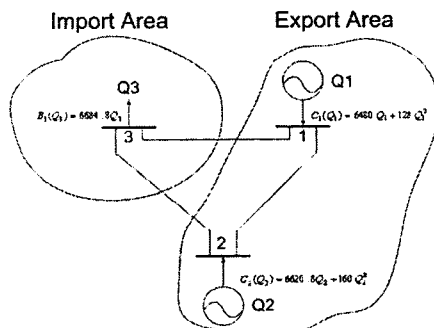
설명한 내용을 바탕으로 분권적인 혼잡관리를 위한 알고리즘을 제안한다.



<그림 2> 분권적 계통 혼잡관리 알고리즘

#### 4. 사례 연구

정보공유를 통한 분권화된 선로 혼잡관리 방식에 대해 3모선의 경우를 들어 검증토록 하겠다. 예제로 사용될 시스템은 <그림 3>과 같고, 여기에 해당하는 전력전송분배계수( $H$ )는 <표 1>로 주어진다. 계산을 단순화하기 위해 송전계약은 선로 1-2번 사이에만 있다고 가정하고, 선로에 0.05 p.u. 이상 조류가 흐를 경우 선로 혼잡이 발생된 것이라 가정한다.



<그림 3> 3-모선 계통도

<표 1> 전력전송분배계수( $H$ )

선로	방향	$Q_1$	$Q_2$
1	1 → 2	0.2353	-0.2941
2	2 → 3	0.2253	0.7059
3	1 → 3	0.7647	0.2941

분권화된 방식과 비교를 위해 먼저 OPF를 통해 선로 혼잡이 해결되는 경우를 계산하면  $Q_1=0.65(\text{p.u.})$ ,  $Q_2=0.35(\text{p.u.})$ ,  $\mu=163 (\text{\$/p.u.})$ 이다.

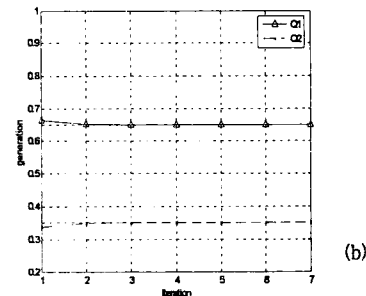
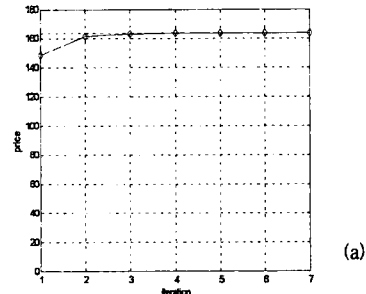
분권화된 방식의 혼잡관리 모델에서는 계통운영자가 각 선로별로 예측된 혼잡 가격을 미리 공지하고, 시장 참여자들은 이 정보를 바탕으로 자신의 이윤이 최대가 되도록 하는 발전량을 입찰하게 되며, 입찰량 정보를 계통운영자에게 공지한다. 계통운영자는 이 정보를 바탕으로 선로 혼잡요금을 다시 책정하게 되고, 이렇게 정보들이 유통되는 중에 선로계약이 해결되게

되면 그 순간 거래량과 선로 혼잡요금 정보가 책정되게 된다.

혼잡요금 고지 시 과거 계통 데이터를 바탕으로 그 평균값을 사용하게 된다. <표 2>은 송전선로의 과거 혼잡요금 기록을 나타내며, 이를 바탕으로 <그림 4>는 혼잡요금 정보가 제시된 계통에서 혼잡요금과 각각의 발전량이 수렴되는 모습을 보여준다.

<표 2> 최근 10일간 계통 혼잡요금 정보

D-10	D-9	D-8	D-7	D-6	D-5	D-4	D-3	D-2	D-1	평균
1263	1502	1231	1720	1836	1510	1365	1542	11910	1315	1480



<그림 4> (a) 혼잡요금의 수렴, (b) 시장 참여자별 발전량의 수렴

#### 5. 결론

현재 혼잡처리와 관련하여 사용되고 있는 최적조류계산(OPF)은 혼잡 발생 시 혼잡비용을 직접 산출함으로써 송전선로 혼잡을 해결할 수 있는 방법이지만, 그 계산에 있어 시장 참여자들의 세부적인 정보의 공개를 요구하기 때문에 경쟁 시장체제에는 적당한 방법이 아님을 지적하였다. 그리고 이들의 정보는 시장 참여자들 사이에 서로 공개될 수도 있으며 시장지배력(Market Power) 및 부당한 게이밍(Gaming)을 야기할 수도 있다. 하지만 전력시스템이 기존의 수직통합체제에서 경쟁적 시장체제로 발전됨에 따라, 개인의 정보는 보호하면서 계통운영자에 의해 주어진 정보를 바탕으로 혼잡을 관리할 수 있는 분권적 방안이 필요함을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 혼잡관리를 위해서 분권적인 방식을 이용한 선도시장 운영과 중앙 집중적인 방식을 이용한 현물 시장 운영에 대한 기반을 제안하였으며, 선도시장의 성공적인 운영을 위해 필요한 시장참여자들 사이의 정보매개체(지역구별, 전력전송분배계수, 시장참여자들의 입찰에 따른 혼잡비용)를 규명하였다. 사례연구를 통해 선물시장에서 주어진 정보를 바탕으로 분권적인 방식의 결과가 중앙 집중적인 방식의 결과와 일치함을 반복적 방법(iterative method)으로 증명하였다.

본 연구는 혼잡관리를 위한 시장설계의 기초연구로서 제안된 것이며, 향후 시장참여자들 사이의 정보교류는 이러한 시장설계에 매우 중요한 요소가 될 것이다. 따라서 시장 참여자간의 경쟁과 협조체계를 원활하게 유도할 수 있는 보다 신뢰도 높은 정보 예측에 대한 연구가 요구된다.

#### [참고 문헌]

- [1] Jian Fu and John W. Lamont, "A combined framework for service identification and congestion management", IEEE Trans. on Power System s, Vol. 16, No. 1, pp. 672-680, February 2001.
- [2] Hogan William., "Contract networks for electric power transmission rights", J. Regul. Econ., 1992, 4, (3), pp. 211-242.
- [3] Chao, H. P. and Peck, S.C., "A market mechanism for electric power transmission", J. Regul. Econ., 1996, 10, (1), pp. 25-59.
- [4] Chao, H. P., Peck, S.C., Oren, S., and Wilson, R., "Flow-based transmission rights and congestion management", Electr. J., 2000, 13, (8), pp. 38-58.
- [5] Hogan, W. W., "Flowgate rights and wrongs", working paper Harvard University, 2000.
- [6] Chien-Ning Yu, Ilic, M.D., "Congestion clusters-based markets for transmission management", proceedings of the IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, 1999
- [7] P.Wei, Y. Ni and F.F. Wu, "Decentralized approach for congestion management and congestion price discovering", IEE Proc.-Gener. Transm. D istrib., Vol.149, No 6, pp.471-476, November 2002.