

BTDF를 이용한 직거래 전력시장에서의 혼잡처리에 관한 연구

이승진*, 이기송*, 박종배*, 신종린*, 이명환*
 건국대학교 전기공학과*

A study of congestion management in bilateral electricity market using BTDF

Seung-Jin Lee*, Ki-Song Lee*, Jong-Bae Park*, Joong-Rin Shin*, Myung-Hwan Lee*
 Dept. of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

Abstract - This paper presents a method for a congestion management in the competitive market which is modeled as the multiple bilateral transaction. Traditionally, the congestion management for the multiple bilateral transaction is accomplished through the process of adjustment bids. It is necessary in for the market entity to submit their price information when the congestion is occurred. Finally, the ISOs can be known about the approximated contract price of participants from the price of adjustment bids. However, the entities can submit only the amount of their contract to ISOs and ISOs are required the method to manage the congestion only by the contracted quantity. Therefore, this paper presents a method for congestion management by curtailing the only contracted quantity of market entities. To evaluated the above problem, we suggest Bilateral Transaction Distribution Factors(BTDFs), which is the sensitivity of line flow with curtailment of transactions. Using this factor, we studied about congestion management when the objective function is to minimize total curtailment of transaction.

1. 서 론

최근 우리나라 뿐만 아니라 세계 여러 전력산업에 경쟁적 전력시장이 도입됨에 따라 기존 수직 통합형 전력산업체제 하에서의 운영에 대한 접근방법과 달리 개별 시장참여자들의 수익을 극대화하는 시장 운영방법이 전개되고 있다[1].

이러한 경쟁적 전력시장은 전력거래 방법에 따라 두 가지 모델(즉, 풀 모델과 직거래 모델)로 나누어진다. 현재 우리나라 전력시장은 초기단계에서는 풀 모델을 통하여 시장을 운영하고 있으나 세계 여러 시장에서는 직거래 모델과 풀 모델이 혼용되어 시장을 운영하고 있다. 따라서, 향후 우리나라 전력시장 모형의 불확실한 진화에 따라 여러 시장의 모델을 연구할 필요가 있으며 특히, 직거래 모델에 관련된 많은 연구가 요구된다.

일반적으로 직거래 모델을 채택하여 운영하고 있는 세계 여러 시장에서 참여자들은 ISO에게 그들의 직거래 계약 물량을 제출한다. 뿐만 아니라, 계통에 혼잡이 발생한 경우 혼잡처리를 할 수 있도록 조정입찰을 통하여 혼잡가격을 ISO에게 제출하게 된다[2]. 이는 직거래 모델의 시장참여자는 ISO에게 그들의 계약가격에 대한 근사화된 정보를 제공하는 결과를 낳게 된다. 하지만, 직거래시장에서의 가장 큰 원칙은 각각의 거래를 최대한 존중해주어야 한다는 것이며 이러한 원칙을 최대한 지켜줄 수 있는 혼잡처리 방법이 필요하게 되었다.

따라서, 본 논문에서는 직거래모델에서 시장참여자의 거래물량의 차단을 최소화하는 혼잡처리 방법론을 제시하였다. 또한, 위의 문제를 효율적으로 해결할 수 있도록 거래물량에 대한 송전망 전력조류의 영향을 나타내는 Bilateral Transaction Distribution Factors(BTDFs)를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법론의 효용성을 입증하기 위해 IEEE 6보선에서 직거래 시장을 모델링하여 사례연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 연구배경

전력계통의 선로에는 여러가지 제약에 의하여 최대한 송전할 수 있는 전력량이 제한되어 있기 때문에 시장에서 결정된 참여자들의 물리적인 거래의사를 모두 다 충족시켜주지 못하게 된다. 이렇게 사전에 계획된 거래가 송전혼잡을 일으키게 되면 계통운영자는 최대한 효율적인 방법으로 송전혼잡을 해소하여 계통을 안정적으로 운용할 수 있도록 각 시장 참여자들에게 제급전지시를 내리게 된다.

입찰시장에서 결정된 가격정보를 하나의 기준으로 하여 혼잡처리를 할 수 있는 풀 모델과는 달리 직거래시장에서는 계통운영자가 가격정보를 알 수 없으므로 계통에서의 위치와 거래량만을 정보로 하여 혼잡처리를 하게된다. 발전사업자에게만 발전량에 제한을 두는 풀 모델과는 달리 직거래시장에서의 혼잡처리를 위해서

발전사업자의 계획발전량을 제한할 때, 이는 곧 특정 수요자와의 계약 자체를 제한하는것이 되기 때문에 발전사업자와 직접 거래를 맺은 수요자의 수요량도 혼잡해소를 위하여 제한되는 발전량과 동일하게 제한을 받게 된다.

직거래시장에서의 가장 큰 원칙은 각각의 거래를 최대한 존중 해주어야 한다는 것이며 이러한 원칙을 최대한 지켜 줄 수 있는 혼잡처리 방법이 필요하게 되었다.

2.2 직거래시장의 모델링

본 논문에서는 어떠한 거래 m 에 대하여 다음과 같은 다중 직거래 프레임워크로 정의하였다.

$$C^{(m)} = \{t^{(m)}, G_g^{(m)}, L_i^{(m)}\},$$

$$m \in M, g \in N_g^{(m)}, i \in N_b^{(m)}$$

- $C^{(m)}$: m 번째 거래
- M : 시장에서의 모든 거래들의 집합
- $t^{(m)}$: m 번째 거래의 거래량
- $N_g^{(m)}$: m 번째 거래의 발전기가 있는 모선번호의 집합
- $N_b^{(m)}$: m 번째 거래의 부하가 있는 모선번호의 집합
- $G_g^{(m)}$: m 번째 거래의 g 번 모선의 발전기에서의 발전량
- $L_i^{(m)}$: m 번째 거래의 i 번 모선의 부하에서의 부하량
- $F_{l-k}^{(m)}$: m 번째 거래의 l 번 모선과 k 번 모선 사이의 선로에 흐르는 전력량

위의 거래를 기준으로 N 모선 계통의 첫 번째 모선을 슬랙모선으로 설정하여 DC조류계산법을 이용하여 혼잡처리를 고려하였다.

2.3 BTDF

선로혼잡을 처리하기 위하여 거래 m 에 대하여 특정 $l-k$ 선로에 흐르는 전력량의 민감도를 나타내는 BTDF(Bilateral Transaction Distribution Factor)를 기존의 GGDF를 이용하여 나타내었다[3].

우선, GGDF의 정의에 따르면 선로조류량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{l-k} = \sum_{g \in N_g^{(m)}} D_{l-k,g} \cdot G_g \quad (1)$$

본 논문의 직거래 모델에서의 발전량과 선로조류는 $G_g = \sum_{m \in M} G_g^{(m)}$, $F_{l-k} = \sum_{m \in M} F_{l-k}^{(m)}$ 이므로, 식 (1)은 다음과 같이 거래 (m)에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{l-k}^{(m)} = \sum_{g \in N_g^{(m)}} D_{l-k,g} \cdot G_g^{(m)} \quad (2)$$

이때, 특정 모선 p 의 발전량이 변화하였을 때 $l-k$ 선로에 흐르는 전력량은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{l-k}^{(m)'} = \sum_{g \in N_g^{(m)}} D_{l-k,g} \cdot G_g^{(m)} + D_{l-k,p} \cdot \Delta G_p^{(m)} \quad (3)$$

계통의 수급조건을 만족시키기 위하여 변화시킨 $\Delta G_p^{(m)}$ 의 양을 슬랙모선이 아닌 부하 $\Delta L_i^{(m)}$, ($i \in N_b^{(m)}$)에서 각각의 기준

부하의 비율만큼 나누어서 담당한다고 가정하면 $l-k$ 선로에 흐르는 전력량은 식 (4)와 같다.

$$F_{l-k}^{(m)'} = F_{l-k}^{(m)'} + \sum_{i \in N_b^{(m)}} D_{l-k,i} \cdot \Delta L_i^{(m)} \\ = \sum_{g \in N_g^{(m)}} D_{l-k,g} \cdot G_g^{(m)} + D_{l-k,p} \cdot \Delta G_p^{(m)} \\ + \sum_{i \in N_b^{(m)}} D_{l-k,i} \cdot \Delta L_i^{(m)} \quad (4)$$

각각의 $\Delta L_i^{(m)}$ 는 위에서 언급한 가정에 따르면 식 (5)와 같다.

$$\Delta L_i^{(m)} = -\frac{L_i^{(m)}}{l^{(m)}} \cdot \Delta G_p^{(m)} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하면 식(4)는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$F_{l-k}^{(m)'} = \sum_{g \in N_g^{(m)}} D_{l-k,g} \cdot G_g^{(m)} + D_{l-k,p} \cdot \Delta G_p^{(m)} \\ - \sum_{i \in N_b^{(m)}} D_{l-k,i} \cdot \left(\frac{L_i^{(m)}}{l^{(m)}} \cdot \Delta G_p^{(m)} \right) \quad (6)$$

이때, $\Delta F_{l-k}^{(m)} = F_{l-k}^{(m)'} - F_{l-k}^{(m)}$ 이므로

$$\Delta F_{l-k}^{(m)} = \left[D_{l-k,p} \Delta G_p^{(m)} - \left\{ \sum_{i \in N_b^{(m)}} D_{l-k,i} \left(\frac{L_i^{(m)}}{l^{(m)}} \Delta G_p^{(m)} \right) \right\} \right] \\ = \left[D_{l-k,p} - \sum_{i \in N_b^{(m)}} \left(D_{l-k,i} \frac{L_i^{(m)}}{l^{(m)}} \right) \right] \Delta G_p^{(m)}$$

식(7)에서 BTDF를 정의하면

$$\Delta F_{l-k}^{(m)} = T_{l-k,p}^{(m)} \cdot \Delta G_p^{(m)} \quad (8)$$

$$T_{l-k,p}^{(m)} = D_{l-k,p} - \sum_{i \in N_b^{(m)}} \left(D_{l-k,i} \frac{L_i^{(m)}}{l^{(m)}} \right) \quad (9)$$

여기서,

$D_{l-k,p}, D_{l-k,i}$: GGDF에 의하여 구해질 수 있는 값

$N_b^{(m)}, L_i^{(m)}, l^{(m)}$: 거래정보로서 주어지는 값

여기서,

$$D_{l-k,g} = A_{l-k,g} + D_{l-k,R} \quad (10)$$

$$D_{l-k,R} = \frac{F_{l-k} - \sum_{p \neq R} A_{l-k,p} \cdot G_p}{\sum_q G_q} \quad (11)$$

$$A_{l-k,g} = \frac{x_{lk}' - x_{kg}'}{x_{lk}} \quad (12)$$

$\sum_q G_q$: 슬랙을 제외한 나머지 발전기의 발전량의 합

$A_{l-k,g}$: $l-k$ 선로의 조류에 대한 g 번 모선의 발전량의 민감도 (GSDF) [4]

x_{lk} : $l-k$ 선로의 임피던스

x_{lk}' : 제로 어드미턴스행렬의 역행렬의 l 행 k 열의 값

그러므로, 거래 m 에 대한 모든 BTDF를 구할 수 있다. 이 BTDF는 발전의 변화량과 부하의 변화량을 포함하여 슬랙발전기의 발전량의 변화 없이 계통의 수급조건을 만족하며, 거래 m 에서의 p 번 발전기의 변화량이 $l-k$ 선로의 조류 변화에 얼마나 영향을 미치는가를 나타내는 계수이다.

2.4 혼잡처리

직거래 전력시장에서의 계통 운영자의 목적은 최대한 각각의 거래를 존중하는 것이다. 본 논문에서는 혼잡처리에 관한 목적함수를 모든 m 의 조정거래량인 $\Delta t^{(m)}$ 의 총 합을 최소화하는 문제로 설정하였다.

본 논문에서 고려한 목적함수와 제약조건은 거래물량의 차단량

($\Delta t^{(m)}$)의 값이 음(-)이라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min[-\Delta t^{(m)}], \quad m \in M \quad (13)$$

여기서,

$$\Delta t^{(m)} = \sum_{p \in N_b^{(m)}} \Delta G_p^{(m)} \quad (14)$$

제약조건은

$$F_{l-k}'' \leq \overline{F_{l-k}} \quad (15)$$

$$-G_p^{(m)} \leq \Delta G_p^{(m)} \leq 0 \quad (16)$$

여기서 $\overline{F_{l-k}}$ 는 l 번 모선과 k 번 모선 사이의 선로의 용량의 최대값이다.

이때, 직거래 모델에서의 혼잡처리를 위해 시장참여자의 차단된 거래물량에 대한 선로조류량은 식 (17)과 같이 나타낸다.

$$F_{l-k}'' = F_{l-k} + \Delta F_{l-k} \\ = F_{l-k} + \sum_{p \in N_b^{(m)}} \sum_{m \in M} (T_{l-k,p}^{(m)} \cdot \Delta G_p^{(m)}) \quad (17)$$

따라서, 식 (15)에 의한 선로 제약조건식은 다음과 같다.

$$\sum_{p \in N_b^{(m)}} \sum_{m \in M} (T_{l-k,p}^{(m)} \cdot \Delta G_p^{(m)}) \leq \overline{F_{l-k}} - F_{l-k} \quad (18)$$

식 (13)에서 (18)까지의 직거래 모델 시장에서의 혼잡처리를 위한 목적함수는 차단 거래량($\Delta t^{(m)}$)에 대한 선형방정식이 된다. 따라서, 기존의 선형계획법(Linear Programming)을 이용하여 식 (13)의 목적함수에 대한 시장참여자들의 차단 거래량을 도출할 수 있다.

2.5 본 논문에서 혼잡처리를 위한 방법론

직거래 모델 시장에서 혼잡을 처리하기 위한 본 연구에서 제안한 방법론은 그림 1과 같으며 이때 사례계통으로 정하여 선로의 제약조건을 입력하여 혼잡처리를 하였으며, 선형계획법 문제는 Matlab의 linprog함수를 이용하여 수행하였다[5].



그림 1. 혼잡처리 과정 순서도

3. 사례 연구

3.1 사례계통

본 논문에서 제안한 방법론에 의한 사례연구를 수행하기 위한 사례계통과 시장참여자들의 거래물량은 그림 2와 표 1과 같다. [6]

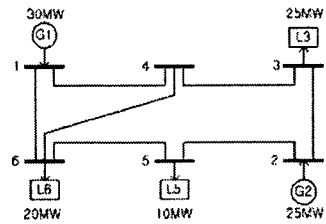


그림 1. 6모선 사례계통

표 1. 직거래시장 사례데이터

거래	거래량(MW)	모선 발전량(MW)		모선 부하량(MW)	
		$N_s^{(m)}$	$P_g^{(m)}$	$N_b^{(m)}$	$L_i^{(m)}$
1	25	1	15	3	10
		2	10	5	5
				6	10
2	30	1	15	3	15
		2	15	5	5
				6	10

위의 데이터를 이용하여 계산된 직류조류계산 결과는 표 2에서 제시된다.

표 2. 혼잡처리 이전의 선로의 조류

선로번호	시작모선	끝모선	선로조류량(MW)
1	1	4	16.4660
2	1	6	13.5340
3	2	3	10.7898
4	2	5	14.2102
5	4	3	14.2102
6	4	6	2.2559
7	5	6	4.2102

3.2 거래량 조절을 통한 혼잡처리
위와 같은 방법으로 계산된 BTDF는 다음과 같다.

표 3. 각 선로에 대한 발전모선만의 BTDF

선로 (i)	$T_{i,1}^1$	$T_{i,2}^1$	$T_{i,1}^2$	$T_{i,2}^2$
1	0.5333	-0.0110	0.5580	0.0137
2	0.4667	0.0110	0.4420	-0.0137
3	-0.0241	0.4350	-0.0028	0.4563
4	0.0241	0.5650	0.0028	0.5437
5	0.4241	-0.0350	0.5028	0.0437
6	0.1092	0.0240	0.0052	-0.0300
7	-0.1757	0.3650	-0.1639	0.3700

각 선로별 제약조류량은 표 4에서 제시된다.

표 4. 각 선로의 조류 제약량

선로번호	1	2	3	4	5	6	7
제약량 (MW)	14	14	12	13	15	10	10

3.3 최적화결과

앞의 입력값을 Matlab의 linprog함수에 적용하여 도출한 결과값은 다음과 같다.

표 5. 각 발전기의 발전감소량 계산결과

1번거래의1번발전감소량 ΔG_1^1	-0.000000000784
1번거래의2번발전감소량 ΔG_2^1	-0.000000001093
2번거래의1번발전감소량 ΔG_1^2	-4.364987256702
2번거래의2번발전감소량 ΔG_2^2	-2.203136638708

식 (5)에 의하여 결정된 각 부하의 감소량은 다음과 같다.

표 6. 각 부하의 부하감소량 계산결과

1번거래의3번부하감소량 ΔL_3^1	-0.000000000751
1번거래의5번부하감소량 ΔL_5^1	-0.000000000375
1번거래의6번부하감소량 ΔL_6^1	-0.000000000751
2번거래의3번부하감소량 ΔL_3^2	-3.284061947705
2번거래의5번부하감소량 ΔL_5^2	-1.094687315901
2번거래의6번부하감소량 ΔL_6^2	-2.189374631803

혼잡처리 이전과 이후의 각 모선별 발전, 부하량은 다음과 같다.

표 7. 혼잡처리 이후의 각 모선별 발전량과 부하량 비교

모선	혼잡처리 이전		혼잡처리 이후	
	발전량(MW)	부하량(MW)	발전량(MW)	부하량(MW)
1	35.0000	0	25.6350	0
2	25.0000	0	22.7970	0
3	0	25.0000	0	21.7160
4	0	0	0	0
5	0	10.0000	0	-8.9053
6	0	20.0000	0	-17.8110

혼잡처리 이전과 이후의 각 선로별 조류량은 다음과 같다.

표 8. 혼잡처리 이후의 각 선로별 조류량 비교

선로번호	혼잡처리 이전		선로제약량(MW)
	선로조류량(MW)	혼잡처리 이후	
1	16.4660	14.0000	14.0000
2	13.5340	11.6350	14.0000
3	10.7898	9.7969	12.0000
4	14.2102	13.0000	13.0000
5	14.2102	11.9191	15.0000
6	2.2559	2.0809	10.0000
7	4.2102	4.0947	10.0000

위의 결과를 검증하기 위하여 식(17)에서 BTDF를 이용하여 구한 선로조류값과 직류조류계산법을 이용한 선로조류값을 비교한 결과는 다음과 같다.

표 9. BTDF와 DC조류계산을 이용한 선로조류 계산

선로번호	BTDF		DC조류계산	
	선로조류량(MW)		선로조류량(MW)	
1	13.9999999999888	13.9999999999888	13.9999999999888	13.9999999999888
2	11.63501274251359	11.63501274251358	11.63501274251358	11.63501274251358
3	9.79686336019860	9.79686336019860	9.79686336019860	9.79686336019860
4	12.9999999999884	12.9999999999885	12.9999999999885	12.9999999999885
5	11.91907469134419	11.91907469134420	11.91907469134420	11.91907469134420
6	2.08092530865467	2.08092530865466	2.08092530865466	2.08092530865466
7	4.09468731627648	4.09468731627648	4.09468731627648	4.09468731627648

3.4 고찰

표 8에서 나타나듯이 혼잡처리 후 선로의 조류는 주어진 제약과 정확히 일치하여 제약이 걸린 선로의 이용율을 최대로 하여 선로의 혼잡을 해소하게 된다. 단, 다른 선로의 조류도 감소하게 되는데 이는 BTDF에서 나타나듯이 각 거래차단량은 각 선로에 대해 영향을 미치지 때문이다. 향후 연구에서는 각 거래 사이의 스왑과 BTDF에서 음(-)으로 나타나는 영향인 역조류도 고려하여 모든 선로의 사용율을 보다 개선하여 혼잡처리를 하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 직거래 전력시장에서의 혼잡처리를 위하여 각 거래에 대한 선로의 조류민감도를 나타내는 BTDF를 제안하였다. BTDF를 이용하게 되므로 본 논문에서 이용한 목적 외에도 각 시장의 상황에 맞는 다양한 목적에 대하여 추가적인 조류계산 없이 바로 결과를 도출할 수 있기 때문에 빠른 결과도출이 가능하다.

본 연구에서 제시된 방법론은 향후 우리나라 전력시장에서의 직거래 모델이 도입될 경우에 혼잡처리와 관련된 기준을 선택할 때 하나의 대안을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 등장하게 될 다양한 형태의 시장에 관한 혼잡처리 방법으로서의 확장도 용이할 것이다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박만근, 김발호, 박종배, 정만호, "게임이론을 적용한 전력거래 해석" *전기학회논문지 A*, 제 49 권, 제 6 호, pp. 266-271, 2000
- [2] M. Shahidehpour and M. Alomoush, "Restructured Electrical Power Systems: Operation, Trading, and Volatility", New York : Marcel Dekker, INC., 2001
- [3] Wai Y. Ng, "Generalized Generation Distribution Factors For Power System Security Evaluations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, pp. 1001-1005, 1981
- [4] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", New York : Wiley, pp. 410-426, 1984
- [5] Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill, 1989
- [6] Shu Tao and George Gross, "A Congestion Management Allocation Mechanism for Multiple Transaction Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, pp. 826-833, 2002