

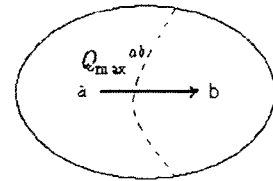
LMP형성에 송전혼잡이 미치는 영향과 그에 따른 공급자 입찰전략 연구

이상훈 김현웅 김진오
한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

The study of generator's bidding strategy and the impacts of transmission congestion in making an LMP

Sang Hoon Lee Hyun Woong Kim Jin O Kim

Abstract-송전망은 전력수송을 가능하게 함으로써, 경쟁적 전력시장을 지지하는 하부구조의 역할을 한다. 하지만 송전망은 여러 제약조건에 의해 수송 한계에 다다를 수 있고 이렇게 공급능력의 한계를 벗어남으로써 발생한 송전혼잡은 전체 계통운영에 있어서 비용 상승을 일으킨다. 본고에서는 송전선로 내 혼잡이 가격에 미치는 영향을 알고 그로 인한 각 모선의 LMP(Locational Marginal Price)형성에 대해 세부적으로 연구하였다. 그리고 입찰방법을 단순히 이상적인 상황이 아닌 송전 혼잡으로 인해 전력 공급자가 시장 지배력을 갖게 되었을 경우에 대하여 적절한 입찰전략의 필요성을 언급하고 가능한 방법을 생각해 보았다.



<그림 1> 혼잡지역의 개략도

1. 서론

송전망내의 혼잡은 전기 에너지 시장을 분리시키고 경쟁적 메카니즘의 제약을 가져오며, 그로 인해 새로운 시장 환경을 조성한다. 구체적으로, 송전혼잡은 각각의 모선에서 독립적인 가격인 Locational Marginal Price(이하 LMP)를 발생시킨다. 그 결과 LMP가 존재하는 계통에서 전력공급자들은 시장지배력을 갖게 되고, 부가적인 이익을 취할 수 있게 된다. 이처럼, 혼잡이 존재하는 곳은 소수의 발전자들만 존재하게 되고 그 소수의 시장지배자들로 인해 제한적인 경쟁시장이 된다. 따라서, 송전혼잡의 영향을 적절히 이해하고 관리하는 것은 공급자 입장에서 이윤증대와 직결되므로 공급자가 시장 지배력을 갖도록 만드는 송전혼잡은 그 연구가 상당히 중요하다. 본고에서는 혼잡의 유무에 따른 계통을 비교해본다. 그리고 혼잡으로 인해 발생한 시장지배력을 이용한 공급자 최적입찰전략을 모색해본다.

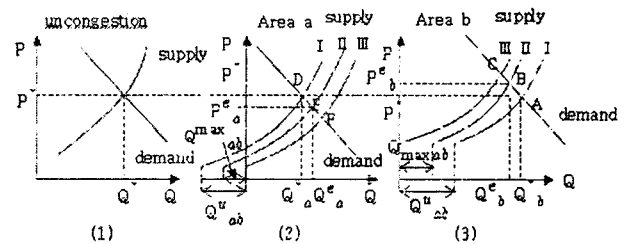
2. 본론

2.1 LMP(Locational Marginal Price)의 정의

송전망 내 혼잡의 영향으로 생기는 송전한계와 지리적인 제약으로 인해 원활한 전력 수송이 힘들어지게 되면, 전력 발전사업자들은 시장 지배력을 가지게 된다. 여기서 시장 지배력은 자신들이 최대이윤을 취할 수 있도록 임의로 시장을 조절할 수 있는 힘을 말한다. LMP란 이러한 시장 지배력으로 인하여 생긴 각각의 모선에서의 독립적인 전력 가격을 의미한다.

2.2 시장 지배력에 미치는 송전혼잡의 영향

시장 지배력에 미치는 혼잡의 영향을 조사할 때, 본고에서는 그림 1과 2에 나타난 것처럼 발전기의 settlement prices, 수입과 이득에 미치는 송전혼잡의 영향에 주안점을 둘 것이다. 그림 1에서는 시스템 내에 송전제약이 존재한다고 가정하고, a지역에서 b지역까지 최대 송전용량을 Q_{max}^{ab} 라고 나타내었다. 한편, 송전혼잡을 고려하지 않은 총수요공급 곡선은 그림 2 (1)에 도시하였다. 이 경우, 전체 시스템의 수요공급 곡선은 (P^*, Q^*) 에서 교차하고, a지역에서 b지역으로 흐르는 에너지는 Q_{ab}^u 이며, Q_{ab}^u 는 Q_{max}^{ab} 보다 크다. 하지만, 실제 시장에서는 송전혼잡이 고려되어야 하며, 이 경우 두 지역의 수요공급 곡선은 각각 그림 2 (2), (3)과 같다. 이 두 그림에서 공급곡선 I은 송전혼잡을 고려하지 않은 경우로써, P^* 와 각각 A, D 점에서 만난다. 한편, 공급곡선 II는 송전혼잡이 고려된 경우이다. 이때는 각각의 경우 새로운 시장청산가격(Market Clearing Price 이하 MCP)이 형성되는데, 그림 2에서 보듯이 b지역의 MCP는 혼잡이 고려되지 않았을 때의 가격보다 큰 값을 가지게 된다. 즉, P_b^c 는 P^* 보다 큰 값을 가진다. 마찬가지로 $P_a^c < P^*$ 이다. 그에 맞는 교차점은 각각 B, E점이 된다. 즉, 공급자들은 혼잡이 존재하는 지역에서 부가적인 이익을 취할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 혼잡으로 인해 전력발전자들은 전력의 시장가격을 조절할 수 있는 시장지배력을 갖게 된다.



<그림 2> 수요-공급곡선과 청산가격에 송전혼잡이 미치는 영향

2.3 LMP형성에 미치는 송전혼잡의 영향

유효전력손실을 고려한 전력시스템에서, 유효전력 평형방정식은 아래 식과 같다.

$$e^T(Q_P - D_P) - Q_{P,LOSS}(V, \theta) = 0 \quad (1)$$

여기서 e 는 모든 원소가 1인 열벡터; Q_P 는 유효전력출력; D_P 는 유효전력부하; V, θ 는 각각 전압의 크기와 위상각; $Q_{P,LOSS}$ 는 유효전력손실을 나타낸다.

한편, 유효전력손실을 고려한 실시간 발송 모델은 다음과 같이 표현 될 수 있다:

$$\text{Min}_{Q_p} c(Q_p) \quad (2)$$

$$\text{Subject to, } e^T(Q_P - D_P) - Q_{P,LOSS}(V, \theta) = 0 \quad (3)$$

$$Q_l^{\min} \leq Q_l(V, \theta) \leq Q_l^{\max} \quad (4)$$

$$Q_p^{\min} \leq Q_p \leq Q_p^{\max} \quad (5)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad (6)$$

여기서 $c(Q_p)$ 는 시장의 구매가격; Q_l 은 조류; Q_l^{\min}, Q_l^{\max} 는 선로의 한계용량; Q_p^{\min}, Q_p^{\max} 는 유효전력한계; V^{\min}, V^{\max} 는 모선의 한계전압이다.

Lagrange Function은 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} L = & c(Q_p) + \lambda [e^T(Q_P - D_P) - Q_{P,LOSS}(V, \theta)] \\ & + \tilde{\mu}^T [Q_l^{\min} - Q_l(V, \theta)] + \hat{\mu}^T [Q_l(V, \theta) - Q_l^{\max}] \\ & + \tilde{\tau}^T [Q_p^{\min} - Q_p] + \hat{\tau}^T [Q_p - Q_p^{\max}] \\ & + \tilde{v}^T [V^{\min} - V] + \hat{v}^T [V - V^{\max}] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\lambda, \tilde{\mu}, \hat{\mu}, \tilde{\tau}, \hat{\tau}, \tilde{v}, \hat{v}$ 는 각각 제약조건과 연관된 Lagrange multipliers 이다.

여기에 Kuhn-Tucker condition을 적용하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial Q_P} &= \frac{\partial c(Q_P)}{\partial Q_P} - \tilde{\tau} + \hat{\tau} - \tilde{v} + \hat{v} + \lambda e \\ -\lambda \frac{\partial Q_{P, LOSS}}{\partial Q_P} - \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \tilde{\mu} \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \hat{\mu} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 LMP, ρ , 는

$$\begin{aligned} \rho &= \lambda e - \lambda \frac{\partial Q_{P, LOSS}}{\partial Q_P} - \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \tilde{\mu} \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \hat{\mu} \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다. 식 (9)로부터, LMP는 에너지 가격과 송전망 손실 그리고 혼잡비용 등의 요소들에 의해 결정됨을 알 수 있다. 송전 혼잡이 없을 때, 모든 모선에서의 LMP는 동일하다.

2.4 LMP를 고려하지 않은 전력시장

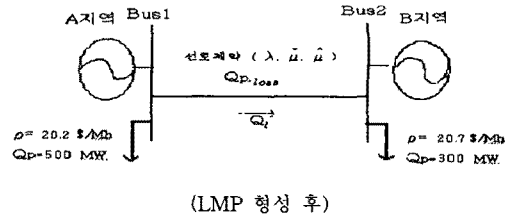
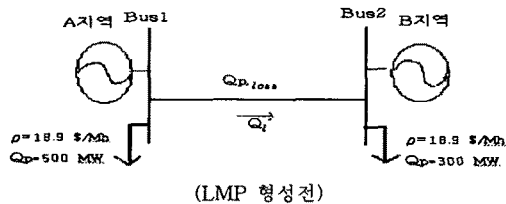
국내 전력 도매시장의 경우, 송전혼잡을 고려하지 않은 입찰 전략으로써 전문가들의 토의를 거쳐 시장참여자들에게 단일 MCP를 적용하는 단일가격체계를 채택하고 있다. 이러한 체계 하에서는 각 모선에서 형성된 LMP를 기준으로 입찰을 받아서 전력가격을 결정하는 것이 아니라 수요예측용량에 대한 비계약 급전방법에 의해서 계통한계가격(SMP, System Marginal Price)으로 단일 MCP를 결정한다. 여기서 SMP란, 각 시간대별 수요를 충족시키기 위하여 발전이 할당된 발전기별 발전가격(변동비)중 가장 비싼 값을 의미한다.

이 때, 계약 급전계획 결과와 비계약 급전계획 결과가 같은 경우에는 송전제약이 실제급전에 영향을 미치지 않게 되고 한계가격이 시장가격이 되지만, 계약 급전 계획 결과가 비계약 급전계획 결과와 다른 경우에는 한계가격보다 높은 가격의 발전기가 제약에 의해 급전하게 되며, 한계가격보다 낮은 발전기는 급전대상에서 제외된다. 이 때, 제약에 의해 증발하는 발전기(constrained on generators)는 제약발전비용을, 제약에 의해 감발하는 발전기(constrained off generators)는 제약비발전비용을 기회비용으로 보상받게 된다. 이러한 방식은 송전혼잡으로 인한 시장지배력이 형성되지 않는다고 가정할 때, 기회비용을 보상한다는 측면에서 별다른 변수 없이 시장을 유지한다.

2.5 LMP를 고려한 공급자 입찰전략

LMP가 발생할 경우에 전력가격은 비계약 급전방법에 의해 책정된 시장가격보다 비싸진다. 즉, 공급자는 입찰시 LMP를 이용하여 더 큰 이익을 취할 수 있다. 이제 송전혼잡의 유무에 따른 전력 가격 비교를 해본다.

2.3절의 LMP(ρ)를 구한 식 (9)에서 송전혼잡이 없는 경우인 LMP 형성 전의 상태를 보면, (단, 이때 유효전력 손실, $Q_{P, LOSS}$ 는 없다고 가정) 송전 혼잡이 없으므로 " $\tilde{\mu}, \hat{\mu} = 0$ " 이 된다. 그러므로 식 (9)는 " $\rho = \lambda e$ " 로 간략하게 표현할 수 있다.



<그림 3> 송전혼잡의 유무에 따른 계통 모델

반면에, 송전혼잡이 있을 경우 (LMP 형성 후) 식 (9)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho &= \lambda e - \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \tilde{\mu} + \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \hat{\mu} \\ &= \lambda e + \left[\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta) \right]^T \cdot (\hat{\mu} - \tilde{\mu}) \end{aligned}$$

여기서, $\frac{\partial}{\partial Q_P} Q_i(V, \theta)$ 는 크기가 "1"인 벡터로 가정하였다.

표 1의 수치를 이용하여 LMP 형성 전에는 λ (계통한계비용)이 같아져서 모든 모선의 LMP는 동일해 짐을 알 수 있다. 표 2에서는 모선 1과 모선 2에서의 발전기 A, B에서 송전혼잡이 존재할 때와 존재하지 않을 때, 각 경우에 발생하는 LMP의 차이로 인한 이익의 차이를 나타내었다. 표 3은 표 2에서 사용된 A, B 지역의 발전비용 데이터이다.

<표 1> 사례연구 가정치

λ (계통한계비용)	$\hat{\mu}$	$\tilde{\mu}$	ρ
18.9	2.0	0.7	20.2
18.9	2.4	0.6	20.7

<표 2> 송전유무에 따른 LMP 및 이익차이

case		A	B
un congestion	ρ (\$/MWh)	18.9	18.9
	Q_p /MW	500	300
	Cost/(\$/h)	7250	5000
congestion	profit/(\$/h)	2200	670
	ρ (\$/MWh)	20.2	20.7
	Q_p /MW	500	300
congestion	Cost/(\$/h)	7250	5000
	profit/(\$/h)	2850	1210

<표 3> 발전기 cost data

Generator	b constant	a constant	Min /WM	Max /WM
GA	12	0.005	0	500
GB	15	0.006	0	300

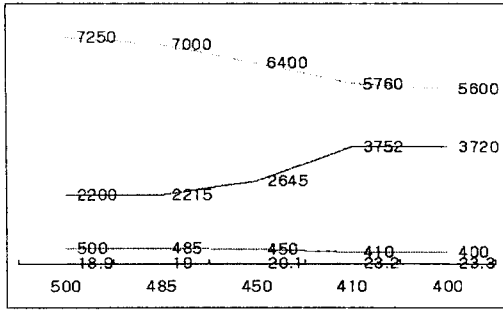
즉, 공급자는 지역적 이점을 가졌을 때,

① 높은 가격으로 입찰을 하거나

② 발전 용량을 억제

하는 등, 전략적으로 송전혼잡을 생성하여, 더 높게 형성된 LMP를 이용해서 이익을 극대화 할 수 있다.

아래의 그림 4는 이 사실을 뒷받침 해준다.



<그림 4> GA발전기에서 발전용량 조절을 통한 LMP변화 및 발전비용, 이윤 변화 추이

즉, 발전량이 감소함에 따라 발전비용은 감소하고 이에 따라 LMP와 이윤의 증가폭은 더욱 커지는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

송전혼잡은 전기 에너지 시장을 분리 시킴으로써, 각 지역의 LMP를 서로 다르게 형성시킨다. 그리고 높은 LMP는 해당 지역의(해당 모선의) 발전자에게 더 많은 이윤을 줄 수 있다. 발전자는 송전혼잡과 발전용량 등 LMP 형성에 영향을 미치는 요소들을 활용하고 가장 높은 LMP를 형성시키기 위한 최적 입찰을 함으로써 더 많은 이윤을 얻을 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.Gan and D. V.Bourcier, "Locational market power screening and congestion management: experience and suggestions," IEEE Trans. on Power System, vol.17, pp.180-185, Feb. 2002.
- [2] Gerald B.Sheble, "Computational auction mechanisms for restructured power industry operation," Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3] Steven Stoft, "Power System Economics- Designing Markets for Electricity," Wiley-IEEE Press, 2002.
- [4] G. B. Shrestha, S. Kai, and L. Goel, "Strategic bidding for minimum power output in the competition market," IEEE Trans. Power Syst., vol.16, pp.813-818, Nov. 2001.
- [5] T. W. Geda, "On transmission congestion and pricing," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, pp.241-248, 1999.