

지역별 한계가격제(LMP)의 개념과 도입 효과

강 대 영 한전경영연구원 선임연구원



1. 서론

탄소중립 달성이 시급한 과제로 다가오면서 국내 재생에너지의 보급이 빠르게 확대되고 있으나, 토지비가 저렴하고 일사량이 풍부한 지방으로 편중되어 분산 에너지¹⁾로서의 역할은 제한적인 실정이다. 반면, 대규모 전력 소비시설은 수도권에 집중되어 지역별 전력수급 불균형이 심화되고 있다. 발전자원과 수요와의 거리가 멀어지게 되면 전력을 이동시키기 위한 송전설비의 투자가 증가하며, 송전설비를 사용하면서 발생하는 전력손실도 커지는 등 비효율이 발생한다.

미국, 유럽 등 해외 전력도매시장에서는 LMP(Locational Marginal Price) 제도를 도입하여 지역별 발전단가를 차등화해 발전자원과 대규모 전력 소비시설의 효율적인 입지 선정을 유도할 수 있는 지역별 가격 신호를 제공하고 시장운영 측면의 효율화를 도모하고 있다. 이러한 관점에서 최근 국내 또한 학계와 연구계를 중심으로도 LMP 도입에 대한 논의가 이뤄지고 있다. 본 고에서는 LMP에 대한 이해를 돕기 위해 LMP 도입 논의 배경, LMP 개념 및 도입 효과에 관해 서술하고자 한다.

2. LMP 개념

현재 국내 전력시장의 계통한계가격(SMP, System Marginal Price)은 발전자원의 변동비만 고려하여 산정되며 제주를 제외한 모든 지역에서 동일하게 적용된다. 이에 반해 지역별 한계가격제인 LMP는 특정 지역의 수요 증가로 발생하는 전력계통의 혼잡, 전력손실을 고려하여 지역별로 분리되어 산정된다. <표 1>과 같이 LMP는 에너지 한계비용, 송전 혼잡비용, 송전 손실비용으로 구성된다.

표 1 LMP 구성 요소 및 상세 설명

LMP	=	에너지 한계비용 (Marginal Energy Component)	+	송전혼잡비용 (Marginal Congestion Component)	+	송전손실비용 (Marginal Losses Component)
에너지 한계비용		전력수급을 만족시키기 위해 발생하는 비용				
송전혼잡비용		송전제약(송전망 용량 한계등)으로 발생하는 비용				
송전손실비용		전력 흐름에 따라 자연적으로 발생하는 전력손실 비용				

다음은 LMP 구성요소의 개념과 예시에 대한 설명이다. LMP의 첫 번째 구성 요소인 에너지 한계비용(Marginal Energy Component)은 전력수급을 만족시키기 위해서 발생하는 비용으로, 기준지점(Reference bus)²⁾의 수요가 1MW 증가했을 때 전력수요와 전력 공급을 일치시키기 위해서 가장 마지막에 투입된 가장 비싼 발전기의 변동비(발전비용)가 에너지 한계비용이 된다.

1) 자가용 전기설비, 수요지 인근에 설치되어 송전선로 건설을 최소화 할 수 있는 발전기, 40MW 이하의 발전기, 집단에너지 사업법 시행령에 의해 규정된 용량의 집단에너지 사업자가 생산한 에너지를 의미함

2) LMP를 산정하기 위해서는 기준이며, 기준지점의 에너지 한계비용을 중심으로 하여 각 지역의 지역별 혼잡비용과 손실비용을 계산하여 LMP를 산출한다. 송전손실 및 혼잡비용은 기준지점을 중심으로 산정되므로 기준지점에서의 송전손실비용과 송전혼잡비용은 0이 된다. 본고의 예시에서는 지역B를 기준지점으로 하여 각 지역의 LMP를 산정한다.

[그림 1]은 지역B를 기준으로 에너지 한계비용을 산정하기 위해서 지역B의 전력 수요가 1MW 증가하였다고 가정한다. 송전선1의 송전용량 한계로 발전기1은 더 이상 발전량을 증가시키지 못하고, 발전기2가 발전량을 증가시켜 지역B의 수요를 충족시키기 때문에 발전기2의 변동비(발전비용)인 90원/kWh가 에너지 한계비용이 된다.

그림 1 에너지 한계비용 산정 예시



에너지비용(지역B) = (6,009만 원-6,000만 원)/MWh = 90원/kWh

두 번째 구성 요소인 송전혼잡비용은 송전망 용량 한계(송전혼잡)로 인한 송전 혼잡이 발생하지 않았다면 저렴한 발전기가 전력을 생산할 수 있는 상황에서 송전혼잡 발생으로 인해 더 비싼 발전기가 전력을 생산하여 발생하는 추가 비용이며 Shadow price와 PTDF를 곱하여 산정할 수 있다. Shadow price란 특정(송전제약이 발생한) 송전선로의 용량 한계가 1MW 증가(송전제약 완화)할 때 총 발전비용 변동분을 뜻한다. PTDF(Power Transfer Distribution Factor)는 특정 지점의 발전량을 1MW 증가시키고 Reference bus에서 수요를 1MW 증가시켰을 때 송전선로별 조류(전력흐름)의 변화 비율을 뜻한다.

[그림 2]는 송전혼잡비용 산정의 예시이다. 송전선1의 송전용량 한계가 400MW에서 401MW로 증가하였다고 가정할 때, 더 저렴한 발전기의 발전기1의 발전량이 1MW 증가하고, 비싼 발전기2의 발전량은 1MW 감소하여 총 발전비용은 6,000만 원에서 5,997만 원으로 감소하기 때문에 송전선1의 Shadow price는 -30원/kWh가 되며, PTDF(지역A, 송전선1)을 1.0으로 가정하면 지역A의 송전혼잡비용은 -30원/kWh가 된다.

그림 2 송전혼잡비용 산정 예시

1. Shadow Price



Shadow price(송전선1) = -(6,000만 원-5,997만 원)/MWh = -30원/kWh

2. PTDF

지역B(기준지점)의 수요가 1MW 증가하고 지역A의 발전량이 1MW 증가할 때 송전선1의 송전량이 1MW 증가한다고 가정한다.

▶ PTDF(지역A, 송전선1) = 1.0

송전 혼잡비용(지역A) = Shadowprice (-30원/kWh) × DFAX (1.0) = -30원/kWh

송전 혼잡비용(지역B) = 0원/kWh (기준지점)

LMP의 마지막 요소인 송전손실비용은 송전선을 통해 전력이 흐를 때 송전선의 저항 때문에 발생하는 전력손실에 의한 비용이다. 송전손실비용은 특정 지점에서 발전량이 변화(ΔP)했을 때 변화하는 전력손실(ΔP_L)의 비율($-\frac{\Delta P_L}{\Delta P}$)에 에너지 한계비용을 곱하여 산정할 수 있다. [그림 3]은 송전손실비용 산정의 예시이다. 그림과 같이 발전기1의 발전량이 1MW 감소했을 때 송전손실이 0.03MW 감소한다고 가정하면 송전손실비용은 에너지 한계비용인 90원/kWh에 -0.03을 곱한 -2.7원/kWh가 된다.

그림 3 송전손실비용 산정 예시



지역 A에서 발전량이 1MW 감소하면 송전손실이 0.03MW 감소

지역 A의 손실비용 = 90원/kWh × -0.03 = -2.7원/kWh

지역 B의 손실비용 = 0원 (기준지점)

지금까지 설명한 각 예시의 LMP요소를 바탕으로 지역A, 지역B의 LMP를 계산하면 다음과 같다.

표 2 지역별 LMP 산정 예시

	에너지 한계비용	송전혼잡비용	송전손실비용	LMP
지역A	90원/kWh	-30원/kWh	-2.7원/kWh	57.3원/kWh
지역B	90원/kWh	0원/kWh	0원/kWh	90원/kWh

가. 지역별 전력 수급 불균형 심화

국내 전력 소비 중 1/3 이상이 서울 및 경기도에서 소비³⁾되고 있지만, 발전설비는 비수도권에 집중되어 있어 절반 이상의 전력을 외부 지역에서 충당하고 있다(2021년 기준). 게다가, 최근 빠르게 증가하고 있는 태양광 등 재생에너지의 입지는 저렴한 토지비용 등으로 비수도권으로 집중되고 있는 반면에 데이터센터, 반도체 공장 등 전력 다소비 설비는 수도권으로 편중되고 있어 지역별 전력 수급 불균형이 심화될 것으로 전망된다.

표 3 지역별 전력공급 자립도(2021년 기준)

지역	발전량(TWh)	사용량(TWh)	전력공급 자립도 (%)
서울	5.3	47.3	11%
인천	60.5	24.9	243%
경기	82.2	133.4	62%
부산	40.4	21.1	192%
대구	2.8	15.4	18%
광주	0.6	9.0	7%
대전	0.2	9.7	2%
울산	31.5	33.6	94%
세종	3.8	4.3	88%
강원	30.6	16.8	182%
충북	2.2	28.4	8%
충남	111.2	48.8	228%
전북	14.3	21.5	67%
전남	61.8	33.5	185%
경북	81.4	44.3	184%
경남	43.9	35.7	123%
제주	4.0	5.7	70%

출처: 전력통계정보시스템의 지역별 발전량, 지역별 판매량 재구성

3) 전력통계정보시스템 시도별 용도별 판매전력량 (2021) 참조



지역별 전력 수급 불균형이 발생하면 송전망을 통한 전력의 이동(비수도권→수도권)이 일어난다. 수급 불균형이 심화되면 송전망 용량의 한계 등으로 신규 송전망 건설이 요구되며, 신규 송전망 건설에는 비용적 부담뿐만 아니라 주민 수용성 등의 어려움이 존재하기 때문에 많은 해외 국가에서는 지역별 도매비용 차등화(지역별 가격신호)를 통해 발전설비 및 대규모 전력 소비시설의 효율적인 입지를 유도하고 과도한 송전선 건설 부담을 완화하고 있다.

현재, 국내 전력시장에서는 송전손실계수(TLF)등을 통해 지역별 차등 효과⁴⁾를 제공하고 있지만, 그 차이가 미미하여 유의미한 지역별 가격신호를 제공하고 있지 못하기 때문에 효과적인 지역별 가격신호 제공 방안 중 하나인 LMP 도입에 대한 논의가 진행되고 있다.

나. 시장운영 비효율 발생

국내 전력시장은 '22년 9월 “실계통기반 하루전시장” 도입으로 시장 운영 및 가격(SMP, System Marginal Price) 책정 방식에 변화가 있었다. 이전에는 발전기의 발전량과 SMP를 결정하는 가격결정계획을 수립할 때 발전기의 출력 상·하한 제약과 전력계통의 송전제약 및 운영예비력 제약 등을 고려하지 않고

4) 부하집중지역인 수도권에 위치한 발전기의 TLF는 1보다 큰 값으로, 비수도권 내 발전기의 TLF는 1보다 작은 값으로 산정하여, 발전비용이 동일한 발전기라 하더라도 수도권에 위치한 발전기의 급전 순위가 비수도권 발전기보다 높아짐

발전기의 출력을 결정하기 때문에 실제 계통운영과 차이가 발생하여 부가정산금⁵⁾이 증가하는 문제가 빈번히 발생했다. 이를 해결하기 위해 “실계통기반 하루전시장”을 도입하여 송전선 한계 등의 계통제약을 반영하여 실제 계통 운영에서 투입할 수 있는 발전기를 결정하고 이를 기반으로 SMP를 결정하여 가격결정계획과 실제 계통 운영의 차이가 줄어들어 부가정산금이 감소하게 되었다.

그러나, 계통제약을 고려하면서 더 비싼 발전기가 SMP를 결정⁶⁾하게 되었으며, 시장가격은 여전히 단일 가격제를 유지하고 있어 송전제약이 발생하지 않은 지역의 발전기도 송전제약으로 인해 증가한 SMP로 정산받는 비효율이 발생하고 있다. 이러한 비효율을 개선하는 방안 중 하나로 송전제약이 발생하면 도매시장 가격을 지역별로 차등화하는 LMP제도 도입에 대한 논의가 진행되고 있다.

표 4 실계통기반 하루전시장 도입 전후 제약 반영 여부

제약 사항		기존시장 (제약미반영)	현재시장 (제약반영)
발전기 자기제약	기술적특성 제약	○	○
	상한/하한/고정 제약	△(수량만 하한제약 반영)	○(모든 발전기로 확대)
계통제약	송전 제약	X	○
	운영예비력 제약	X	○

4. LMP 도입효과

가. 장기 : 수요 및 공급의 효율적인 입지 유도

앞서 언급한 바와 같이 현재 국내 전력시장 제도는 충분한 가격신호를 제공하고 있지 못하고 있다. 지금과 같이 충분한 지역신호를 제공하지 못하는 상황이 지속되면 향후 지역별 전력 수급 불균형이 심화될 것으로 예상되며, LMP를 도입하면 지역별 전력 수급에 따라 차등화된 전력도매시장 요금을 통해 효과적인 지역신호를 제공할 수 있는 것으로 예상된다.

에너지경제연구원에서 진행된 연구⁷⁾에서는 향후 국내 전력 공급의 30%를 재생에너지가 차지하는 상황을 가정하여 LMP가 적용되면 도매가격이 높은 곳(서울, 경기)과 낮은 곳(전남, 경남)의 도매가격 차이가 약 16원/kWh 수준으로 커져 수도권과 비수도권의 토지가격 차이를 상쇄할 수 있는 수준의 지역별 가격신호를 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

5) 가격결정계획에서 정해진 발전기 출력과 실제 계통 운영에서의 발전기 출력이 다를 때 발생하는 사후 정산금

6) 지방에 더 저렴한 발전기가 존재하지만, 송전망 제약 때문에 수도권의 비싼 발전기가 SMP를 결정함

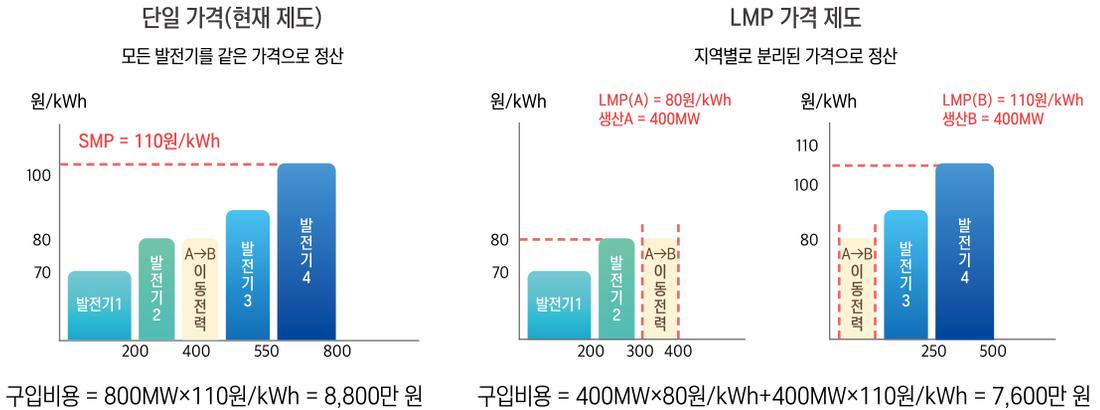
7) 에너지경제연구원, 효과적인 분산형 전원 보급 및 활용을 위한 송배전요금제 도입방안 연구(2021.8), p.67.

LMP 도입을 통해 지역신호를 제공하여 전력수요가 많은 수도권에 태양광 등 발전자원 건설을 유도하고 전력 공급이 많은 지방에 대규모 전력 소비시설을 유인하는 등 효율적인 자원 배분을 유도할 수 있으며, 이를 통해 송전망 건설비용 절감 및 전력손실 감소 등의 효과가 있을 것으로 기대된다.

나. 단기: 전력시장 운영 효율화⁸⁾

앞서 1절에서 언급한 내용과 같이 '22년 9월 “실계통기반 하루전시장” 도입 이후 국내 전력시장에서는 송전제약이 발생하지 않은 지역의 발전기도 송전제약에 의해 증가한 비용으로 정산받는 비효율이 발생하고 있다. 지역별로 도매가격 산정이 가능한 LMP를 도입하면 [그림 4]에서 볼 수 있듯이 송전제약이 발생하는 지역과 발생하지 않는 지역 간 전력 도매가격 차등화가 이루어진다. 결과적으로, 송전제약에 의해 증가한 전력 구매단가가 더 이상 송전제약이 발생하지 않는 지역의 전력 구매단가에 영향을 끼치지 않기 때문에 현재 국내 전력시장 상황과 비교했을 때 전력구입비가 감소하고 소비자 부담 완화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 4 LMP 도입에 따른 전력구입비 감소 효과 예시



8) FTI(23.10)은 영국 전력시장에 LMP 도입시 단기적인 시장운영 효율화 영향을 도매시장 가격 변화, 혼잡관리 비용 축소, 양방향 자원(저장설비, 해외연계선로)에 대한 효율적 급전 신호 제공 등으로 제시하고 있음.

5. 결론

LMP는 현재 국내 전력시장에 적용 중인 SMP와 달리 위치에 따라 발생하는 송전혼잡에 의한 비용과 송전손실에 의한 비용을 고려한 지역별 한계가격제이다. 일반적으로 LMP 도입을 통해 단기적으로는 시장가격 왜곡 해소, 혼잡관리 비용 축소, 효율적 급전 신호 제공 등의 효과가 있으며, 장기적으로는 자원의 효율적인 입지 선정 유도의 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 국내 시장 상황에서는 단기적으로는 시장가격 왜곡 해소를 통한 시장 운영효율성 증대 효과가 있을 것으로 예상되며, 장기적으로는 지역별 도매시장 가격 차등화를 통해 수요 및 공급자원의 효율적인 입지 선정을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

앞서 LMP 개념에서 살펴보았듯이 LMP는 현재의 단일 SMP 체계보다 복잡한 가격결정 알고리즘이 요구되며, 이 때문에 해외 전력시장에서도 LMP 도입을 위해 오랜 기간이 소요된 사례가 존재한다. 국내 또한, 국내 환경에 적합한 방식의 LMP를 도입하기 위해서 많은 준비과정이 필요할 것으로 예상된다. 특히, 기존 전력시장 제도에 미치는 영향을 고려함과 함께 현재 전력거래소 중심으로 추진 중인 중장기 전력시장 개편방안⁹⁾ 방향과의 정합성을 고려하여 추진할 필요가 있다.

9) 단계적 가격입찰 전환, 실시간보조서비스시장 도입 등이 위원회, 워킹 그룹을 중심으로 논의 중이거나 시범사업이 진행 중

참고문헌

국내 문헌

- 국회 입법조사처, 분산에너지 활성화 특별법 제정의 의의와 향후 과제, 2023.8
- 안재균, 효과적인 분산형 전원 보급 및 활용을 위한 송배전요금제 도입방안 연구, 에너지경제연구원, 2021.8
- 전력거래소, 2017년 해외 전력산업 동향(PJM), 2017.11
- 한국전력공사, 2023 EPRI-경영연구원 전력시장 전문가 초청 국제워크숍, 2023.6

외국 문헌

- EPRI, Wholesale Electricity Market Design in North America. Reference Guide, 2023
- FTI, Assessment of locational wholesale electricity market design options in GB, 2023
- MITeI, Fighting the wrong battle? A critical assessment of arguments against nodal electricity prices in the European debate, 2022.2
- PJM, Locational Marginal Pricing Components, 2017

웹사이트

- EPSIS 전력통계정보시스템, <http://epsis.kpx.or.kr>