

Bid-based Direct Load Control Framework Under Electricity Markets

이 호 철[†] · 송 성 환* · 윤 용 태**
(Ho-Chul Lee · Sung-Hwan Song · Yong-Tae Yoon)

Abstract - This paper proposes Direct Load Control(DLC) operation scheme using a bidding system and the methodology to value proper quantity decided by the DLC program, which is a kind of resources for stabilization of electricity market price during peak times by managing consumer electricity demand. Since DLC program in Korea is based on the contract with the customers participating in this program, it is difficult to anticipate voluntary participation. That is, incentive for participants in DLC program is insufficient. To cope with this point, it is necessary to develop a new market mechanism and market compatible operation scheme for DLC programs. DLC market mechanism is deemed to be equipped with iterative bidding system, independent operation from energy market, and interactive with bidding information on energy market. With this market mechanism, it is important to find the optimal operation point of DLC allowing for the factors of stabilizing the electricity market price and compensating DLC implementation. This paper focuses on the mathematical approaches for the bid-based DLC operation scheme and examines several scenarios for the following technical justifications: 1) stabilization of electricity market price during peak times, 2) elasticity of demand.

Key Words : Direct Load Control(DLC), Compensation cost for DLC, Electricity market, Elasticity of demand

1. 서 론

현재 전력산업에서 전력 수요는 꾸준히 증가하는 추세이다. 그러나 이에 반해 발전력을 꾸준히 늘리기는 여러 가지 경제적인 문제, 사회적인 문제, 환경적인 문제 등에 의해 어려운 점이 많다. 그에 대한 대안으로 수요를 효과적으로 조절함으로써 전력 수급 균형 문제를 효율적 해결하고 있다.

수요를 조절하는 방법의 하나로 직접부하제어가 있는데, 직접부하제어는 크게 비상시와 상시에 활용될 수 있다. 비상시라고 함은 전력의 수요와 공급이 균형을 이루지 못해서 즉, 사용량이 생산량을 능가할 때 일부 사용량을 줄이는 방법으로 사용되는 것을 말한다. 이에 반해 상시는 앞의 비상시가 아닌 정상 상황에서 직접부하제어를 하는 것을 말한다. 상시에서 직접부하제어를 시행하는 가장 기본적인 이유는 시장의 전력가격이 급격하게 상승하여 시장 가격을 낮추게 하기 위함이다.

기존의 직접부하제어 연구는 주로 생산자측면에서 비용을 최소화하는데 집중하였다. 따라서 직접부하제어를 투입하여 피크 부하를 낮춤으로써 생산비용을 절감하거나[1], 발전, 송전, 배전 투자비용을 줄이는 연구가 주를 이루었다[2],[3]. 비

용 줄이는 방법론은 직접부하제어가 예비력의 일종으로 발전기와 같이 시스템에 투입하여 총 비용을 줄이 방식으로 이루어졌다[2],[3],[4]. 단순히 비용절감에서 벗어나 이윤을 최대화하는 방법론에서 접근하여 수요관리를 강조하는 연구도 있었다[5]. 그러나 이런 연구들이 대부분이 생산자 입장에서 비용최소화, 이윤 최대화하였다는 한계점이 있다. 전력산업이 시장 환경으로 변화하는 현실에 비추어 봤을 때 생산자 입장이 아닌 소비자 입장에서 직접부하제어의 효율적 활용에 관한 접근이 필요하다. 또한 시장 환경에서는 직접부하제어의 참여자는 입찰을 통해 자신이 원하는 차단량과 가격 보상받는 직접부하제어 시스템이 필요하다. 이런 시스템에서 직접부하제어의 차단량을 결정할 경우 단순히 수급균형만이 아닌 시장 가격이라는 측면의 고려가 반드시 이루어져야 한다. 본 논문에서는 전력시장환경에서 소비자측면에서 고려될 수 있는 직접부하제어의 적절하고 효율적인 방법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2장에서는 직접부하제어에 대한 배경에 대해 설명하고 직접부하제어의 필요성, 문제점, 개선방안에 대해 논의하고자 한다. 3장에서는 시장 환경에서 적합한 직접부하제어의 사용방안에 대해 제시하고 4장에서는 제안된 방법의 직접부하제어를 시나리오, 시뮬레이션을 통한 검증하고자 한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 전반적인 요약하고자 한다.

2. 직접부하제어 배경

2.1 직접부하제어의 필요성

지속적으로 전력에 대한 수요가 증가하고 있는 반면 환경

[†] 교신저자, 정회원 : 서울대학 공대 전기·컴퓨터 박사과정
E-mail : hopang57@snu.ac.kr

* 정 회 원 : 한국전기연구원 전력시스템연구본부 선임연구원, 공학박사

** 정 회 원 : 서울대학 공대 전기·컴퓨터 부교수 · 공박
접수일자 : 2008년 11월 28일
최종완료 : 2009년 1월 19일

문제, 전원입지 확보의 어려움, 송변전설비 건설의 어려움, 연료비의 상승으로 전력수급문제가 발생할 여지가 존재한다. 따라서 기존의 설비를 이용해서 효율을 증가 시킬 수 있고 하절기 침두 부하시의 수급불안 문제를 해결할 수 있는 수요관리의 활용이 중요하다. 직접부하제어는 간접부하제어에 비해 상대적으로 많은 장점을 가진다. 부하제어 실행에 따라서 침두 수요 감소량을 명확하게 알 수 있으므로 장단기 수급계획을 수립하는데 보다 확실하게 이를 고려할 수 있고 부하차단의 주체가 전력회사이므로 수용가 부하차단의 불확실성이 낮아진다.

또한 전력산업이 민영화되어 상호경쟁과 시장원리를 도입하게 됨에 따라 공급자원 확보 불확실성, 전력가격 안정 불확실성 등의 문제가 발생한다. 공급자원 확보 불확실성은 전력 시장체제에서 발전사업자는 공급의무가 없고 자신 수익성만 추구하기 때문에 발생할 수 있다. 전력가격 안정 불확실성은 시장상황에서 공급부족으로 인해 전력가격이 상승하는 등의 문제를 의미한다. 이와 같은 문제를 해결하고 효율적인 부하관리를 통해 수용가 에너지 비용 절감을 유도함에 있어서 직접부하제어방식은 앞으로 효과적으로 이용될 수 있는 자원이다.

2.2 한국 직접부하제어 현황 및 문제점 [6]

한국의 경우 수용가와 한전이 약정 체결하여 계통이 불안정하거나 비상시에 체결된 약정을 통해 수용가의 부하를 직접적으로 제어하고 있다. 한국전력은 수용자와 사전 약정한 만큼의 부하(전력수요)를 접수받아 인터넷, 전화, 초고속통신망 등 각종 IT기술을 이용해 직접 제어한다. 여름철과 같은 특정 시기에 몰리는 전력수요의 효율적 분산을 취지로 개발된 직접부하제도의 활성화를 위해 정부는 수용가에 제어시스템 시설비 등을 지원하고 있다. 표 1은 국내에서 적용하고 있는 직접부하제어 내용과 문제점을 정리한 것이다.

표 1 국내 직접부하제어 방법 및 문제점
Table 1 Method and Problem of Direct Load Control in South Korea

직접부하제어 기준	국내 직접부하제어 내용
대상 수용가	○ 제어전력이 300kw 이상의 일반용, 교육용 및 산업용 고객
지원금	○ 기본지원금 - 제어 여부와 상관없이 계약한 수용가의 계약전력에 따라 지원 ○ 제어지원금 - 제어가 실행되었을 경우 통보시기와 계약이행률에 따라 지급
제어종류	○ 전일예고제어 : 시행 전일 17시 까지 통보 , 계약이행률이 100%이상 경우 600원/kWh 지급 ○ 당일예고제어 : 시행 전일 17시 이후~시행3시간 전까지 통보, 계약이행률이 100%이상 경우 1,200원/kWh 지급 ○ 긴급제어 : 통보 없이 제어할 경우 , 계약이행률이 100%이상 경우 600원/kWh 지급

문제점	○ 수용가 의지와 상관없이 일정 금액 지원해줌으로 인한 참여 인센티브 부족 → 정전비용이 높은 산업용, 상업용 수용가들의 참여 의지가 낮음
-----	---

표 1에서 나타나듯이 우리나라의 직접부하제어 프로그램은 참여수용가와 계약을 기반으로 하기 때문에 실제 수용가의 자발적인 참여를 기대하기 힘들다. 따라서 수용가들의 자발적인 참여를 유도하고 전력시장환경에 적합한 직접부하제어의 운영방안이 필요하다.

2.3 국외 직접부하제어 현황

국의 중 특히 미국의 경우 직접부하제어와 같은 형태의 수요관리가 이루어지고 있다. 미국의 경우는 전력 시장에서 다양한 형태의 수요의 참여가 활발히 이루어지고 있다. 그 중 직접부하제어와 가장 유사한 형태의 수요의 참여가 이루어지고 있는 곳으로 캘리포니아 전력거래소(CAISO)와 뉴욕 전력거래소(NYISO)의 경우를 볼 수 있다[7],[8].

표 2 해외 직접부하제어 현황
Table 2 Direct Load control in other countries

	California ISO	New York ISO
제어 종류	○ Demand Relief Program(DRP) - 운전예비력이 5%~1.5%인 경우 사용, 공급 부족 시에 원하지 않는 부하차단 최소화목적 ○ Discretionary Load Curtailment Program(DLCP) - 운전예비력이 5%이상인 경우 사용, 전력계통 및 시장의 안정 유지 목적 ○ Participation Load Program(PLP) - 운전예비력이 7%이상인 경우 사용, 예비력형태로 보조서비스 시장에 입찰로 참여	○ Day-Ahead Demand Response Program (DADRP) - 전일시장에 부하절감 입찰 ○ Emergency Demand Response Program (EDRP) - 공급력 부족시 부하절감
대상 수용가	○ 매월 매시간 기준 1MW이상 부하감소 가능한 수용가 또는 수용가 집단	○ DADRP - 소매공급사업자나 100kw이상 부하 절감 가능한 수용가 ○ EDRP - LSE(Load Serving Entity) 나 부하집합자
지원금	○ DRP - 기본 : \$20,000/MW/월, 부하차단에 따라 \$500/MWh ○ DLCP - \$350/MWh ○ PLP - 예비력 시장에서 낙찰된 경우 용량금액 지급, 실제 차단 시 에너지지급액 지급	○ DADRP - 시장결제 가격(지역별 한계가격) ○ EDRP - \$500/MWh 또는 지역별 한계가격 중 높은 가격

note) CAISO, NYISO에서 시행하고 있는 직접부하제어 프로그램들에 대한 상세내용은 참고문헌 [7], [8] 수록되어 있음

표 2에서 캘리포니아 전력거래소(CAISO)와 뉴욕 전력거래소(NYISO)의 수요관리 프로그램 중 직접부하제어와 유사한 형태의 수요관리를 비교 정리하였다. CAISO는 PLP를 통해 하루 전 경매시장에서 낙찰을 받은 경우 용량 금액을 지급받고 실제 부하차단이 된 경우에는 에너지금액을 지급받는다. 또한 NYISO의 경우 차단 부하를 일종의 발전력 형태로 보고 발전력과 일종의 경쟁관계를 통해 저렴한 가격의 발전을 공급하게 될 수 있다는 측면에서 경제적이고 효율적인 계통운영을 하고 있다.

3. 시장 환경에서 직접부하제어의 방향

현재의 전력산업의 상황과 환경을 고려한다면 직접부하제어와 같은 수요자원의 활용이 더욱 절실히 필요하지만 실제로 효과적으로 사용되지 못하고 있다. 특히 한국의 경우에 참여자의 인센티브를 고려하지 않은 일방적인 사업 방향으로 인해 참여자들의 참여의지가 많이 부족하고 참여자의 수 또한 줄어들고 있는 추세이다.

현재 한국의 경우 전력시장의 활성화가 이루어지지 않은 상황이다. 전력시장은 다수의 공급자(발전회사)와 다수의 수요자(판매회사)간에 시장원리에 의해 거래를 실현함으로써 공급 측과 수요 측 모두 경쟁적이고 시장원리에 의한 거래가 이루어지게 된다. 따라서 직접부하제어도 기존의 일방적으로 정해진 금액을 통한 보상이 이루어지기 보다는 시장원리에 입각해 입찰과 경쟁을 통해 정해져야 할 것이다.

입찰에 참여하는 수용가는 자신의 정전비용 즉, 자신의 최소한의 인센티브를 적극적으로 반영할 수 있고 상황에 따라서는 입찰을 통한 어느 정도의 수익을 얻을 수 있게 된다. 따라서 참여자 참여의지가 높아질 뿐만 아니라 그런 입찰제도가 잘 운영된다면 참여자 또한 더욱 증가하게 될 것이다. 계통 운영자 입장에서도 참여자의 증가뿐만 아니라 수용가들의 경쟁으로 인한 가격 경쟁으로 효과를 볼 수 있게 될 것이다.

실제로 해외에서는 유사하게 직접부하를 입찰을 통한 방법으로 실행해오고 있다. CAISO의 PLP 프로그램의 경우 비순동예비력, 대체예비력 등의 형태로 보조서비스 시장에 참여하거나, 보조에너지 시장에 입찰하여 결정된 가격을 기초로 보상을 받는다. NYISO의 경우에는 발전 입찰과 같은 프로그램에 부하절감을 원하는 입찰이 함께 이루어진다. 이는 입찰을 통한 직접부하제어 실행을 통해 수용가의 경쟁이라는 장점과 더불어 전력 시장에서 수요의 탄력성을 부여할 수 있다는 이점을 얻을 수 있다.

CAISO나 NYISO의 경우 시장 환경에서 입찰을 통한 수요자원의 활용이 이루어지고 있지만 수요자원의 보다 더 활발한 활용을 위해서는 수요차단통보 시기라는 중요한 이슈를 고려할 필요가 있다. 다시 말해, 직접부하제어의 경우 부하차단의 시기를 통보해주는 시점이 매우 중요하다. 이는 수용가의 입장에서 부하차단의 시기를 일찍 알수록 그에 대비하여 수요 부하를 다른 시간대로 옮기거나 다른 계획들을 세울 수 있기 때문이다. 따라서 발전기 입찰과 동일한 입장에서 같은 시장에 참여하는 NYISO의 방법보다는 수요차단의 통보시기를 고려한 별도의 시장이 필요하다. 예를 들어,

부하 차단 시기를 미리 알고 있으면 그 시간대에 사용해야 할 전력을 다른 시간 때에 사용하여 자신의 손실을 줄일 수 있다. 차단의 통보의 시기는 빠르면 빠를수록 그를 대비하는 입장에서는 유리할 것이고 더욱 낮은 가격으로 수요자원으로 참여할 수 있는 것이다.

따라서 본 논문에서는 다음의 특징으로 대변되는 직접부하제어 시장이 필요함을 제시하고자 한다.

- Iterative(반복성): 직접부하시장은 수용가 입장에서 최적으로 차단할 수 있는 부하량 및 부하 차단 시기를 미리 알 수 있도록 일정시간을 두고 반복적으로 입찰할 수 있는 시스템을 갖추어야 함
- Independent(독립성): 에너지 시장과 독립적으로 운영되는 별도의 시장이 존재해야 함
- Interactive(상호성): 직접부하제어 시장에서 결정된 입찰량과 입찰가격 정보들이 에너지 시장의 입찰에 영향을 줄 수 있어야 함. 에너지 시장에서도 시스템의 요건이나 시장 운영 상황에서 요구되는 수요자원 정보들을 직접부하제어 시장에 반영시킬 수 있도록 해야 함

위의 특징들을 반영하는 수학적 모델링을 다음의 4장에서 기술하기로 한다.

4. 입찰기반의 직접부하제어 수식화

3장에서 언급했듯이 직접부하제어 시장이 발전 입찰 시장과는 별도로 존재한 경우 시장 운영자는 직접부하제어 최적 투입량과 가격을 결정해야 한다. 4장에서는 직접부하제어의 최적화된 활용방안을 제안한다.

직접부하제어의 상시 활용의 목적은 시장가격의 안정에 있다. 따라서 직접부하제어를 시행에 있어서 보상금 대비 시장가격 안정의 효율을 최적으로 하는 결정점을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 직접부하제어 투입으로 인해 시장의 전력 가격하락에 초점을 두어 소비자 측면에서 시장가격의 안정을 추구하였다. 또한 직접부하제어 투입으로 인한 보상비용을 소비자가 지불함으로써 시스템운영자 입장에서 손실없이 직접부하제어 자원을 활용하는 것을 제안한다. 직접부하제어 투입으로 인한 소비자 입장에서 최대 비용 절감을

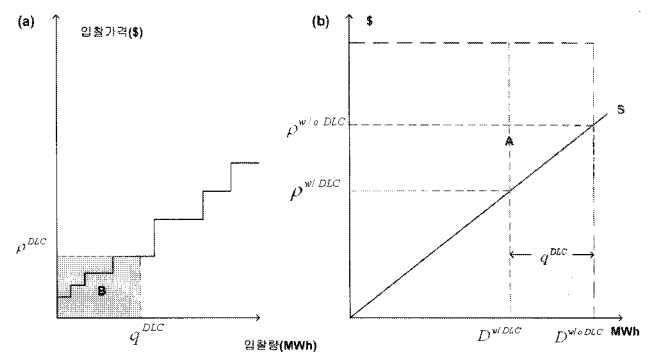


그림 1 직접부하제어 입찰과 전력시장에서 전력 가격 결정
Fig. 1 Direct Load Control bidding and decision on market price

위해서는 시장가격의 하락분과 직접부하제어 보상비용을 모두 고려하여야 한다. 이의 수식적인 전개는 아래에서 나타난다.

그림 1(a)는 직접부하제어 입찰 시장에서 직접부하제어의 입찰을 가정하여 나타낸 그래프이다. 직접부하제어 참여자는 제어가능한 부하량과 보상비용을 입찰하게 된다. 직접부하제어 시장에 입찰하는 입찰가격은 자신의 전력을 차단함으로써 발생하는 물리적인 비용손실 뿐만 아니라 정성적 효용손실도 포함된다. 또한 자신의 추가적인 인센티브 포함하여 입찰금액을 받을 경우 전력차단으로 인한 손실을 충분히 보상받을 수 있는 것이다. 직접부하제어 입찰 시장에서 q^{DLC} 만큼의 직접부하제어가 낙찰이 되고 ρ^{DLC} 의 한계가격으로 직접부하제어 가격이 결정된다. 오른쪽 그림은 전력시장에서 직접부하제어 투입되기 전후의 시장 가격의 변화를 나타낸 그래프이다.

그림 1(b)에서 S 선은 예상되는 발전 공급 곡선을 의미한다. 직접부하제어가 없는 경우 수요는 $D^{w/o DLC}$ 이고 공급 곡선과 만나는 점에 의해 시장 가격은 $\rho^{w/o DLC}$ 으로 결정될 것이다. 직접부하제어가 있는 경우 수요는 $D^{w/ DLC}$ 이고 시장 가격은 $\rho^{w/ DLC}$ 로 결정되는 것을 알 수 있다.

직접부하제어를 투입하면서 드는 손실과 투입으로 인해 발행하는 효과는 어떤 관계를 가지는지 파악할 필요가 있다. 먼저 직접부하제어를 투입하면서 발생하는 직접부하제어 보상비용은 $\rho^{DLC} \times q^{DLC}$ 가 된다. 즉, B 부분의 면적이 된다. 반대로 직접부하제어 투입으로 인해 향상되는 부분은 시장가격은 하락으로 생각할 수 있다. 소비자들은 직접부하제어 전에서는 $\rho^{w/o DLC}$ 의 높은 가격으로 전력을 구입하여야 하지만 직접부하제어가 투입됨으로써 $\rho^{w/ DLC}$ 의 낮은 가격으로 전력을 구입할 수 있는 것이다. 따라서 직접부하제어 투입되기 전에 소비자들이 전력 구입하기 위한 전체 비용은 $\rho^{w/o DLC} \times D^{w/o DLC}$ 이고 직접부하제어 투입 후 소비자들이 전력을 구입하기 위해 사용하는 전체 비용은 $\rho^{w/ DLC} \times D^{w/ DLC}$ 이다. 즉, 직접부하제어를 실행함으로써 소비자들은 $(\rho^{w/o DLC} \times D^{w/o DLC}) - (\rho^{w/ DLC} \times D^{w/ DLC})$ 의 비용 만큼을 절감하게 되는 것이다. 따라서 절감되는 비용은 그림 1(b)의 A부분의 면적과 같다.

$$\text{직접부하제어 보상비용} : \rho^{DLC} \times q^{DLC}$$

$$\text{직접부하제어로 인한 소비자 입장에서 전력구입 절감 비용} : (\rho^{w/o DLC} \times D^{w/o DLC}) - (\rho^{w/ DLC} \times D^{w/ DLC})$$

따라서 비용 절감효과를 최대화하는 목적으로 수식을 정리하면 다음과 같다.

목적함수

$$\text{Max } E[(\rho^{w/o DLC} \times D^{w/o DLC}) - (\rho^{w/ DLC} \times D^{w/ DLC}) - (\rho^{DLC} \times q^{DLC})] \quad (1)$$

제약조건

$$(\rho^{w/o DLC} \times D^{w/o DLC}) - (\rho^{w/ DLC} \times D^{w/ DLC}) \geq (\rho^{DLC} \times q^{DLC}) \quad (2)$$

여기서,

- q^{DLC} - 직접부하시장에서 결정되는 직접부하제어 낙찰량
- ρ^{DLC} - 직접부하시장에서 결정되는 직접부하제어 낙찰가격
- $D^{w/o DLC}$ - 직접부하제어가 적용되지 않는 경우 전력 전체 수요
- $D^{w/ DLC}$ - 직접부하제어가 적용된 경우의 전력 전체 수요
- $\rho^{w/o DLC}$ - 직접부하제어가 적용되지 않는 경우 전력 시장에서 전력가격
- $\rho^{w/ DLC}$ - 직접부하제어가 적용된 경우의 전력 시장에서 전력가격

위 식에서 미래의 시장가격과 수요는 우리가 정확하게 알 수 있을 수는 없다. 하지만 본 수식에서 과거의 데이터와 앞으로 예측을 통해 실제에 가까운 값을 얻을 수는 있다고 가정하였다. 따라서 목적함수는 결정론적인 값이 아닌 기대값으로 나타난다. 수식의 목적함수는 직접부하제어를 실행함으로써 소비자들이 전력 구매 들어가는 비용을 최대한으로 줄이는데 이와 함께 소비자들이 지불해야 되는 직접부하제어 보상비용을 고려하여야 한다는 것이다. 즉, 전력 구매비용의 감소하는 부분(직접부하제어 실행으로 발생하는 이익)과 직접부하제어의 보상비용(직접부하제어 실행으로 발생하는 손실)의 차이를 최대화해서 소비자의 이익을 극대화 하는 것이다. 제약조건은 전력 구입비용을 줄이기 위해 그 이상을 직접부하제어 보상금으로 사용하는 것은 의미를 없음을 말하는 것이다. 직접부하제어를 많이 할수록 전력 구입비용은 감소폭은 크게 될 것이고 보상금 또한 더욱 증가하게 된다.

5. 사례 연구

시뮬레이션에서는 각기 다른 입찰량과 입찰 가격을 가진 직접부하제어 참여 수용가를 가정하였다. 그리고 시장에서 전력 가격은 수요가 증가함에 따라 크게 증가하는 점을 감안하여 지수 함수 형태로 가정하였다. 이와 같은 가정을 바탕으로 시장 전력 가격의 안정 유도하는 최적 직접부하제어의 결정을 테스트 했다.

그림 2(a)는 직접부하제어 참여 수용가의 직접부하제어 입찰시장에서 입찰을 나타낸 그래프이다. 입찰 그래프에서 x축은 입찰량이고 y축은 입찰가격이므로 가격 낮은 순으로 누적입찰을 나타냈다. 그림 2(b)는 실시간 전력시장에서 수요에 따른 시장 가격의 변화를 예측하여 나타낸 것이다.

시장에서 전력의 수요가 4,500MWh일 때 시장에서 전력 가격은 5318 \$/MWh 으로 높은 가격을 형성한다. 따라서 시장의 전력 가격 안정화를 위해 직접부하제어를 투입한다.

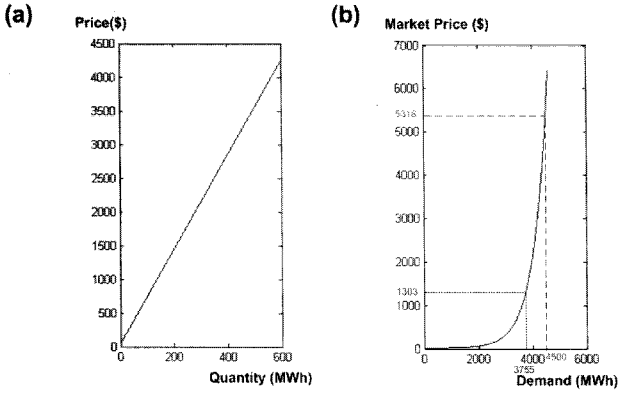


그림 2 시물레이션을 위한 직접부하제어 입찰과 전력시장 가격 곡선
 Fig. 2 Direct Load Control bidding curve and market supply price curve

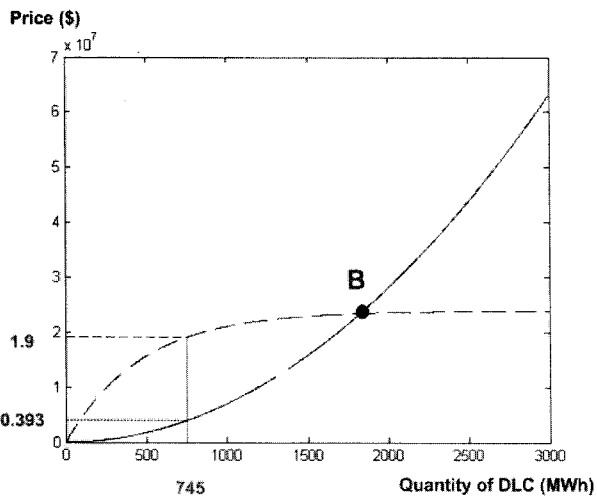


그림 3 직접부하제어 투입으로 인한 보상비용과 시장전력 구입비용의 감소
 Fig. 3 compensation cost curve and purchase cost decrement curve

그림 3은 직접부하제어를 실행함으로써 전력 시장에서 소비자가 전력 구입하는 전체 비용이 감소하는 부분과 직접부하제어에 대한 보상비용 부분을 그래프로 나타낸 것이다. x축은 직접부하제어 투입량이고 y축은 직접부하제어 투입에 따른 전력구입감소 비용 및 직접부하제어 보상비용이다. 그림 3에서 지수함수 형태의 실선은 직접부하제어 투입량에 따른 직접부하제어 보상비용을 나타내는 함수이고 점선은 직접부하제어 투입량에 따른 전력시장에서 전체 전력 구입비용의 하락을 나타낸 것이다.

그림에서 직접부하제어의 투입량이 증가할수록 그에 따른 직접부하제어 보상비용은 크게 증가하지만 전력시장에서 전체 전력구입비용의 하락은 눈에 띄게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. B점은 보상금이 전력 구매 가격을 넘지 않는

선에서 최대를 시장가격을 많이 낮추는 점이 된다. 따라서 직접부하제어 투입으로 손실이 없는 한계 내에서 전력시장에서 전력 가격을 최대한 낮출 수 있지만 직접부하제어의 가장 효율적인 운영인이라는 부분에 대한 해답은 아니다. 즉, 4장에서 제안 수식을 바탕으로 직접부하제어 투입으로 시장에서 전력 구매 비용의 감소와 직접부하제어 투입으로 인한 보상비용의 차이를 가장 크게 하는 부분이 소비자측면에서 가장 효율적인 직접부하제어의 운영이라고 할 수 있다. 그림에서 745MWh의 직접부하제어가 투입되면 소비자들이 전체 전력구입하기 위해 들어가는 비용은 \$19,043,000 감소한다. 그리고 소비자들이 지불해야 할 직접부하제어에 대한 보상비용은 \$3,925,100 가 된다. 직접부하제어로 인한 손익을 따져보면 $\$19,043,000 - \$3,925,100 = \$15,117,900$ 의 이익을 얻을 수 있다. 745MWh 직접부하제어의 실행으로 소비자입장에서 최대한의 시장 이익을 가져올 수 있다.

직접부하제어가 투입되기 전에는 전력수요는 4,500MWh가 되고 시장가격은 5,318 \$/MWh이 된다. 그러나 직접부하제어가 745MWh 투입된 후 전력수요는 3,755MWh로 낮아지고 수요에 따른 시장가격은 1,303 \$/MWh가 된다.(그림 2. b 참조) 1,303 \$/MWh의 시장가격은 직접부하제어의 보상비용을 고려하지 않은 것이다. 따라서 소비자가 직접부하제어 비용을 지불하는 것을 고려할 경우 \$3,925,100의 직접부하제어 보상금이 소비자들의 전력 가격에 추가 되어야 된다. 이를 계산해보면 $\$3,925,100 / 3,755\text{MWh} + 1,303 \text{ $/MWh}$ 이 되어 시장 가격은 2,348 \$/MWh가 된다. 직접부하제어 투입전의 시장가격에 비해 크게 안정됨을 알 수 있다.

전력의 수요가 2,500~5,500MWh로 변하는 상황에 대하여 위와 같이 직접부하제어의 적정 투입량에 대해 시물레이션 하였고 그림 4의 그래프는 그 결과를 나타낸다.

- 그림 4(a)는 수요가 2,500MWh에서 5,500MWh로 변하는 동안 직접부하제어가 투입되지 않았을 경우에 전력시장에서 가격을 나타낸 것이다. 수요가 2,500MWh일 경우 시장에서 전력 가격은 133 \$/MWh 이고 수요가 5,500MWh로 증가한 경우 시장에서 전력가격은 35,471\$/MWh로 급격하게 상승하게 된다.

- 그림 4(b)는 제시된 방법대로 직접부하제어를 실행한 경우에 수요의 증가에 따라 직접부하제어 또한 증가하는 것을 보여준다. 수요가 2,500MWh일 경우 직접부하제어는 41MWh에서 최적 투입량이 결정 되고 수요가 5,500MWh로 증가한 경우 직접부하제어 최적 투입량은 1,437MWh로 증가하게 된다.

- 그림 4(c)에서 실제 수요가 6,000MWh이었다고 가정할 경우 시장의 가격에 의해 직접부하제어 투입량의 변화하게 된다. 따라서 직접부하제어가 투입된 만큼 수요는 감소하게 되어 결국엔 시장가격에 따른 수요의 변화를 보여준다. 즉, x축은 초기 수요(6,000MWh)에서 시장가격에 따라 나타나는 직접부하제어의 양을 뺀 것을 의미한다. 직접부하제어가 투입되면 시장가격이 증가함에 따라 수요가 급격히 감소하는 것을 잘 보여준다. 시장가격에 따른 수요의 변화를 보여 주면서 수요의 탄력성을 드러낸다.

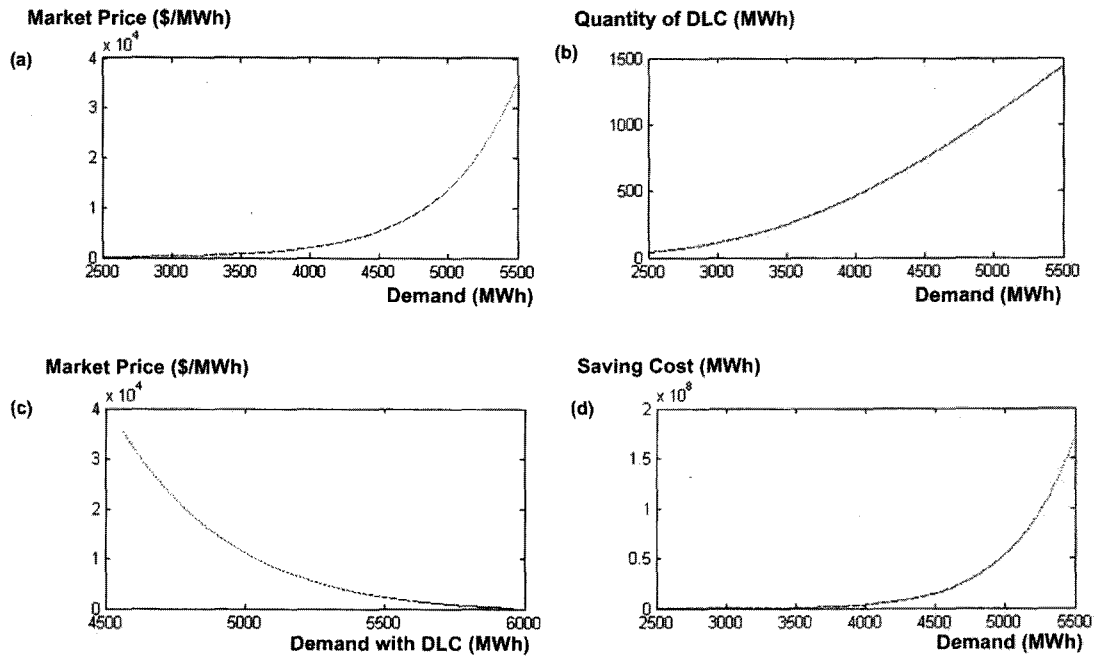


그림 4 수요에 따른 직접부하제어 투입량 결정
Fig. 4 Decision of Direct Load Control

· 그림 4(d)는 직접부하제어를 실행하는 경우에 시장 수요의 변화에 따른 직접부하제어의 효과(시장에서 전력 감소된 구입비용에서 보상비용을 뺀 이익) 보여주는 것이다. 수요가 증가함에 따라서 직접부하제어의 효과가 크게 나타난다. 즉, 직접부하제어의 사용의 타당성을 보여준다고 할 수 있다.

높은 전력 수요로 인해 시장가격이 높은 경우 직접부하제어를 통해 시장가격이 안정됨을 본 시뮬레이션을 통해 알 수 있었고 직접부하제어를 통해 소비자 입장에서 전력 구입에 들어가는 비용을 크게 줄이는 것을 보여 주었다. 또한 시장 가격에 따라 직접부하제어의 투입량이 달라지는 것을 통해 시장가격에 따른 수요의 변화를 얻을 수 있었다. 다시 말해, 직접부하제어를 통해 전력산업에서 수요의 탄력성을 보여줄 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 전력시장 환경하에서 입찰을 통한 직접부하제어의 운영방안과 수용가측면에서 적절한 직접부하제어 투입량을 결정하는 방안을 제안하였다. 제안한 입찰 시장을 바탕으로 소비자측면에서 비용 최소화하는 직접부하제어의 운영은 사례연구를 통해 증명하였다. 시나리오를 바탕으로 시뮬레이션한 결과 직접부하제어의 투입으로 인해 높은 시장가격이 안정적으로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 또한 소비자가 전력 구입하는 비용과 직접부하제어의 보상비용을 고려한 최적의 직접부하제어 투입지점을 찾을 수 있다. 시장 전력 가격에 따라 변화하는 직접부하제어의 투입량은 수요의 변화를 보여줌으로 수요의 가격에 대한 탄력성을 보여 줄 수도 있게 되었다.

이와 같은 직접부하제어의 운영이 이루어지기 위해서는

무엇보다 직접부하제어 입찰시장이 적절하게 구성되어 있어야 한다. 3장에서 언급한 것처럼 직접부하제어 입찰시장은 에너지시장과 독립적이고 상호영향을 고려할 수 있어야 할 뿐만 아니라 반복적인 입찰시장의 구성이 있어야 한다. 본 논문은 시장환경에 적합한 직접부하제어의 운영방안에 대해 중점적으로 다루었으며 직접부하제어 시장설계(Market Design)에 대해서는 구체적인 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며, 관련 기관 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K.D.Le, R.F.Boyle, M.D.Hunter, and K.D.Jones, "A Procedure for Coordinating Direct-Load-Control Strategies to Minimize System Production Cost", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1843-1849, June 1983.
- [2] H.Salehfar, and A.D.Patton, "A Production Costing Methodology for Evaluation of Direct Load Control", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 278-284, February 1991.
- [3] F.N.Lee, and A.M.Breipohl, "Operational Cost Saving of Direct Load Control", IEEE Transactions on Power

Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 5, pp. 988-993, May 1984.

- [4] Jianming Chen, Fred N.Lee, Arthur M.Breipohl, and Rambabu Adapa, "Scheduling Direct Load Control to Minimize System Operational Cost", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 1994-2001, November 1995.
- [5] Kah-Hoe Ng, and Gerald B Sheble, "Direct Load Control - A Profit-Based Load Management using Linear Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 688-695, May 1998.
- [6] 송경빈, 김규호, 김진호, 김선교, 김동현, 백주영, "전력 수요관리 직접부하제어사업의 합리적 개선방안 연구", 산업자원부, 2007년, 3월
- [7] Miller, Peter M., Joseph H. Eto and Howard S. Geller, "The Potential for Electricity Conservation in New York State", prepared for the New York State Energy Research and Development Authority Albany, N.Y. September 1989.
- [8] Demand Response in California, online available www.caiso.com

저 자 소 개



이 호 철 (李昊澈)

1981년 12월 5일 생. 2005년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2005~현재 서울대 대학원 전기·컴퓨터 공학부 박사과정.



송 성 환 (宋成煥)

1978년 5월 30일 생. 2001년 2월 부산대 공대 전기공학부 졸업(학사). 2003년 2월 서울대 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(석사). 2007년 2월 서울대 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(박사). 2006년 12월~현재한국전기연구원 전력 시스템 연구본부 선임연구원



윤 용 태 (尹容兌)

1971년 4월 20일 생. 1995년 M.I.T 전기 컴퓨터 공학부 졸업. 1997년 M.I.T 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(박사). 2002~2003 University of Oklahoma 전기 컴퓨터 공학부 조교수. 2004~현재 서울대 전기·컴퓨터 공학부 부교수