

MIP를 이용한 수요입찰 Scheduling 프로그램 개발

김성수*, 문경섭**, 김두중**, 옥기열** 서남석***
 한국산업기술대학교*, 한국전력거래소**, 한국중부발전***

Development of Demand Response Scheduling Program Using MIP

SungSoo Kim*, KyeongSeob Moon**, DooJoong Kim**, KiYeol Ok**
 Korea Polytechnic University*, Korea Power Exchange**

Abstract - 전력거래소에서는 수요관리에 대한 지원금을 수요측의 입찰제도를 통하여 결정하는 시범사업을 실시하고 있다. 본 논문은 수요입찰에 의한 지원금의 결정에 관여하는 급전계획 프로그램에 대한 내용을 기술하고 있다. Scheduling 프로그램은 수요의 비선형 특성을 고려하기 위하여 혼합정수계획법(MIP)을 이용하여 작성하였으며 효율성을 입증하기 위한 사례검토를 수행하였다.

1. 서론

전력수요를 합리적으로 조정하여 전력공급을 위한 과도한 투자를 억제코자 하는 부하관리사업은 1985년 한국전력공사의 하계휴가 보수기간 조정 지원 제도를 시초로 현재 여러 가지 사업이 이루어지고 있다.[1] 지금까지 이루어졌던 하계휴가 조정이나 자율절전 또는 직접부하 제어와 같은 부하관리 사업은 대부분 지원금액이 미리 정해진 상태에서 소비자가 참여하는 형태로 사업이 수행되었다. 특히 직접부하제어는 미리 정해진 약정에 따라 소비자에게 일정한 보상을 하는 조건에서 예비력이 부족한 상황이 발생할 경우 부하를 강제적으로 차단하는 것으로 소비자의 자발적인 참여가 어려운 점이 있었다. 전력거래소에서 올해 시범사업으로 수행하는 지원금 입찰제도는 소비자가 제시하는 입찰가격에 따라 부하감축이 이루어지는 것이므로 자발적인 참여가 가능한 장점이 있다.

소비자가 제시하는 부하감축가격을 바탕으로 가장 경제적인 방법으로 적정한 예비력을 확보하기 위하여 수요입찰 Scheduling 프로그램을 개발하였다. 부하감축에 따르는 추가적인 제약이 없다면 입찰가격이 낮은 순으로 적정한 양을 선택하기만 하면 되므로 선형계획법(LP - Linear Pogram)만으로 프로그램을 개발할 수 있다. 그러나 부하감축의 지속시간과 관련된 여러 제약이 추가될 경우 이러한 비선형성을 고려하기 위해서는 혼합정수계획법(MIP - Mixed Integer Program)을 사용하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 부하감축 지속시간과 관련된 비선형형 특성을 고려한 scheduling 프로그램을 개발하는 내용을 기술하고 있다.[2] MIP의 solver로서는 dash optimization사의 Xpress-MP 프로그램을 사용하였다.[3] 논문의 구성은 크게 개발된 프로그램의 정식화를 기술하는 제 2장과 개발된 프로그램의 효율성을 입증하기 위한 검토사례를 설명하는 3장 그리고 결론으로 이루어져 있다.

2. 정식화

먼저 정식화를 위하여 설정된 변수를 설명하면 다음과 같다. 밑줄로 표시된 변수는 최적화문제의 제어변수를 나타낸다.

2.1 변수 설명

- i : 부하를 나타내는 첨자
- t : 시간을 나타내는 첨자
- b : 부하의 감축 구간을 나타내는 첨자
- MUT_i : 부하 i 의 최소 감축지속시간
- MDT_i : 부하 i 의 최소 감축정지시간
- MHR_i : 부하 i 의 최대 감축지속시간
- RR_i : 부하 i 의 Ramp Rate
- $BP_{i,t,b}$: 부하 i 의 t 시간 b 구간 입찰 가격
- $BQ_{i,t,b}$: 부하 i 의 t 시간 b 구간 입찰 용량
- $SP_{t,b}$: t 시간 시스템 수요 b 구간 가격
- $SQ_{t,b}$: t 시간 시스템 수요 b 구간 용량
- $\underline{u}_{i,t}$: 부하 i 의 t 시간 부하감축 여부 $\in \{0, 1\}$
- $\underline{v}_{i,t}$: 부하 i 의 t 시간 감축시작 여부 $\in \{0, 1\}$
- $\underline{w}_{i,t}$: 부하 i 의 t 시간 감축종료 여부 $\in \{0, 1\}$
- $\underline{v}_{i,t,b}$: 부하 i 의 t 시간 b 구간 감축 전력
- $\underline{w}_{i,t,b}$: t 시간 시스템 수요 b 구간 감축 전력

2.1.1 시스템 수요곡선

부하감축에 대한 시스템 수요는 감축부하를 구매하는 전력거래소의 수요곡선을 나타내며 각 시간별로 그림 1과 같은 형태로 주어진다.

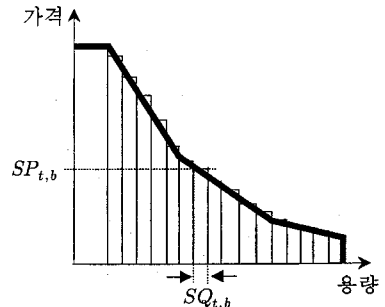


그림 1. t 시간 시스템 수요곡선

시스템 운영자가 굵은 선과 같은 형태로 수요곡선을 지정하면 프로그램에서 내부적으로 이를 여러 구간으로 나누어 선형화 하게 된다.

2.1.2 수요 입찰

수요측의 입찰은 크게 일별입찰과 시간별 입찰 두 종류로 구성된다. 일별 입찰자료에는 부하의 최소 감축 지

속/정지 시간이나 최대 감축지속시간과 출력증가속도 (Ramp Rate)와 같은 기술적인 내용이 포함된다. 시간별 입찰자료는 그림 2와 같은 부하의 수요곡선으로부터 구성된다. 그림에서 시장가격이 $BP_{i,t,2}$ 와 $BP_{i,t,3}$ 사이에서 결정된다면 해당 부하는 $BQ_{i,t,1} + BQ_{i,t,2}$ 에 해당하는 만큼 부하를 감축하게 된다.

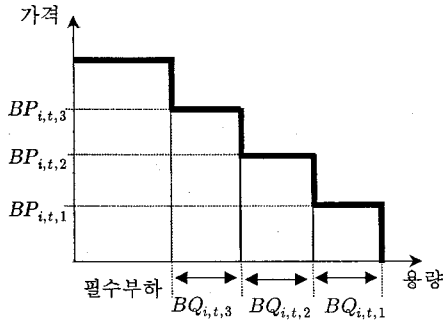


그림 2. 부하 i의 t시간 수요입찰 특성

2.2 최적화 문제의 구성

수요입찰 scheduling 프로그램은 여러 제약조건을 고려하면서 사회적 후생을 극대화하는 최적화 문제로 정식화된다.

2.2.1 목적함수

최적화 문제의 목적함수는 다음과 같이 전체 시간동안 시스템 수요의 수요곡선과 부하입찰곡선의 차이인 사회후생을 극대화 하는 문제로 주어진다.

$$\max_{p,g} \left(\sum_t \left(\sum_b SP_{t,b} \cdot g_{t,b} - \sum_i \sum_b BP_{i,t,b} \cdot p_{i,t,b} \right) \right) \quad (1)$$

여기서 결정변수는 시스템에서 구매하는 부하($g_{t,b}$)와 각 부하의 감축량($p_{i,t,b}$)이다.

2.2.2 제약조건

먼저 시스템 전체에 적용되는 제약으로 시스템수요곡선과 입찰부하의 감축량의 합이 같다는 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_i \sum_b p_{i,t,b} = \sum_b g_{t,b} \quad (2)$$

시스템수요의 b 구간 감축전력량 상한은 수요곡선으로부터 다음과 같이 정해진다.

$$0 \leq g_{t,b} \leq SQ_{t,b} \quad (3)$$

입찰부하 개별로 적용되는 제약조건은 여러 가지가 있다. 부하감축 지속시간과 관련된 제약을 고려하기 위하여 3가지 이진변수를 정의하였으므로 이들 변수와 부하감축량의 상관관계가 필요하다. 부하감축 여부($\gamma_{i,t}$)에 따라 부하감축량($\gamma_{i,t,b}$)은 다음과 같이 제한된다.

$$0 \leq p_{i,t,b} \leq BQ_{i,t,b} \cdot \gamma_{i,t} \quad (4)$$

또한 부하감축 여부($\gamma_{i,t}$)는 시작($\gamma_{i,t}$) 및 종료($\gamma_{i,t}$) 변수와 다음과 같은 관계로 표현된다.

$$u_{i,t} - u_{i,t-1} = s_{i,t} - d_{i,t} \quad (5)$$

최소 감축시간은 한번 감축이 시작되었을 ($\gamma_{i,t} = 1$) 경우 적어도 부하 i의 최소 감축지속시간(MUT_i) 이내에는 정지될($\gamma_{i,t} = 0$) 수 없다는 특성을 이용하여 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$s_{i,t} + d_{i,t} + d_{i,t+1} + \dots + d_{i,t+MUT_i} \leq 1 \quad (6)$$

마찬가지로 부하감축 후 다시 부하감축이 시작될 때까지 부하감축을 중단해야 하는 최소 정지시간(MDT_i)에 대한 제약은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$d_{i,t} + s_{i,t} + s_{i,t+1} + \dots + s_{i,t+MDT_i} \leq 1 \quad (7)$$

부하감축 최대지속시간(MHR_i)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma_{i,t} + \gamma_{i,t+1} + \dots + \gamma_{i,t+MHR_i} \leq 1 \quad (8)$$

Ramp Rate(RR_i)는 출력 증가 및 감소 조건에 대하여 각각 다음과 같이 표현된다. 여기서 Ramp Rate는 1시간 동안 부하 감축량의 변동 범위로 표현된다.

$$\sum_b p_{i,t+1,b} - \sum_b p_{i,t,b} \leq RR_i \quad (9)$$

$$\sum_b p_{i,t,b} - \sum_b p_{i,t+1,b} \leq RR_i \quad (10)$$

3. 사례 연구

개발 프로그램의 효율성을 검증하기 위하여 다음과 같은 사례계통에 대하여 검토하였다.

3.1 사례계통

사례검토는 10시간 동안에 대하여 이루어지며 각 시간별 수요곡선은 그림 3과 같은 형태로 주어진다. 각 시간별 최대가격 및 최대 구매량은 표 1과 같다.

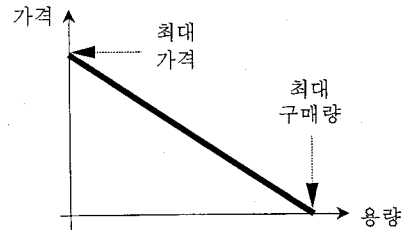


그림 3. 시스템 수요곡선의 형태

표 1. 시간별 시스템 수요

시간	최대가격 (원/kWh)	최대구매량 (kW)
1h	4000	2000
2h	4000	4000
3h	4000	6000
4h	4000	8000
5h	4000	1000
6h	4000	4000
7h	4000	7000
8h	4000	10000
9h	4000	6000
10h	4000	2000

사례계통에는 표 2와 같은 기술적 특성이 있는 4 부하가 있다고 가정한다.

표 2. 부하의 기술적인 특성

부하	MUT (시간)	MDT (시간)	MHR (시간)	RR (kW)
L1	4	2	6	1500
L2	1	1	6	1500
L3	1	2	6	1500
L4	3	3	6	1500

또한 각 부하의 시간별 입찰내용은 시간에 따라 달라지지 않으며 표 3과 같이 주어졌다고 가정한다.

표 3. 부하의 입찰 내역

구간별 입찰 가격 (원/kWh)		L1	L2	L3	L4
		BP_1	500	600	700
BP_2	1200	1500	1300	1100	
BP_3	2100	2300	1900	2000	
BP_4	2500	3100	2800	2700	
BP_5	3000	3500	3200	3400	
구간별 입찰 용량 (kW)	BQ_1	500	200	300	1000
	BQ_2	750	500	500	700
	BQ_3	750	500	700	500
	BQ_4	500	300	1000	300
	BQ_5	500	500	1500	200

3.2 검토 결과

사례계통의 내용을 개발된 프로그램에 적용한 결과, 그림 4 및 표 4에 나타난 바와 같이 약 30초가 경과하여 최적해를 도출하였다.

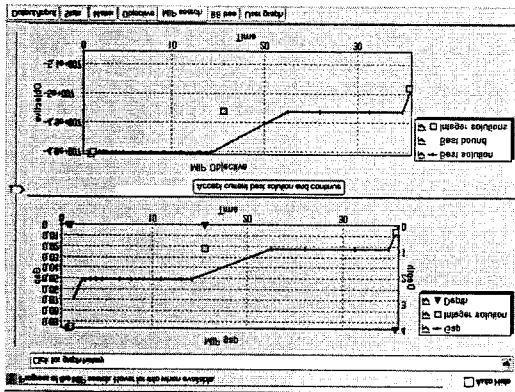


그림 4. 수렴 특성

표 4. 최적 부하감축 계획량(kW) 및 가격(원/kWh)

시간	L1	L2	L3	L4	합계	가격
1h	0	450	800	0	1250	1500
2h	0	700	1400	0	2100	1900
3h	1250	700	1200	0	3150	1900
4h	1250	700	800	1500	4250	1875
5h	500	0	0	300	800	800
6h	1100	0	0	1700	2800	1200
7h	1250	700	0	1700	3650	1914
8h	1250	700	1500	1700	5150	1940
9h	0	700	950	1500	3150	1900
10h	0	450	800	0	1250	1500

표 4의 마지막 열에 표시된 가격은 이진변수가 고정된 상태에서 식 (2)에 대한 잠재가격을 나타낸 것이다.

3.3 결과 분석

표 4에 나타나 있는 Scheduling의 결과는 표 2와 있는 각 부하의 기술적 특성을 만족한다. 각 부하는 모두 6시간의 최대 부하감축 지속시간을 초과하지 않으며 최소 부하감축 지속/정지 시간이 만족한다. 또한 부하 L4의 경우 4h와 9h에 Ramp Rate를 만족시키기 위하여 부하감축량이 1500kW로 제한됨을 알 수 있다.

표 4의 맨 오른쪽 열에 표시된 가격은 각 시간별로 그림 3의 시스템 수요곡선에서 부하감축 총량(표 4의 6번째 열)에 해당되는 가격과 동일하다. 따라서 이 가격을 부하감축에 대한 시장가격으로 고려할 수도 있다. 이 경우 부하감축여부가 결정된 상태에서 시장의 균형을 도출하는 일반적인 시장가격의 기능을 갖추고 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 부하 L1은 시장가격이 BP_2 와 BP_3 사이인 3h, 4h, 7h, 8h에는 BQ_1 과 BQ_2 를 더한 1250 kW를 감축하고 시장가격이 BP_1 과 BP_2 사이인 5h에는 BQ_1 인 500kW를 줄이게 된다. 시장가격이 입찰가격인 BP_2 와 동일한 6h에는 BQ_2 구간의 수익이 0이므로 500kW와 1250kW 사이의 부하감축이 모두 가능하다. 즉, 표 4의 결과가 주어진 시장가격 하에서 각 부하가 자신의 이득을 극대화하려고 할 때 나타나는 부하감축량과 같게 된다.

그러나 부하감축여부를 결정하는 이진변수까지 고려할 경우에는 시장가격이 시장균형을 유도하지 못하게 된다. 예를 들어, 부하 L1이 자신의 이득을 극대화하기 위하여 부하감축 시간을 선택한다면 시장가격이 낮은 5h, 6h에 부하감축을 중단하고 나머지 시간에 부하감축을 수행할 것이다. 이렇게 하는 방안이 최소 부하감축 지속/정지 시간을 모두 만족시키면서도 수익을 더욱 높일 수 있을 것이다. 물론 이와 같이 부하 L1이 다른 전략을 선택하게 되면 시장가격이 변하게 될 것이므로 시장균형이 이루어지지 않는다. 이와 같이 시장균형이 도출되지 않는 이유는 비선형 특성이 있는 부하감축 지속시간과 관련된 이진변수의 영향 때문이다. 이러한 경향은 발전기 기동정지 문제에서도 나타나는 것으로 비선형 최적화 문제의 일반적인 특징이다. 따라서 현재 발전경쟁시장(CBP)과 유사한 정산규칙이 필요할 수도 있다.

4. 결론

본 연구에서는 부하감축 지속시간과 관련된 비선형 특성을 고려하기 위하여 혼합정수계획법(MIP)을 이용한 수요입찰 Scheduling 프로그램을 개발하였다. MIP solver는 상용프로그램인 Xpress-MP를 사용하였으며 사례연구를 통하여 프로그램을 유용성을 입증하였다. 또한 별도의 정산규칙이 가정된 상태에서는 최적화 결과에서 유도되는 잠재가격이 수요자원시장의 시장가격으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 향후 최적화 과정에 공급측 자원을 포함시킴으로써 시스템 수요곡선을 대체함으로써 전체자원을 효율적으로 관리하는 방안도 모색할 필요성이 있다.

[참고 문헌]

- [1] www.kepco.co.kr/dsm/
- [2] 전력거래소, "전력수요자원시장운영규칙"
- [3] dash optimization, "Xpress-Mosel User guide"