

부하관리사업자의 부하배분 전략

이찬주* · 조기선* · 김희철** · 박종배* · 신중린* · 김성수***
 *건국대학교 전기공학과 · **에너지관리공단 기술개발본부 · ***한국전력거래소

Allocation Strategies of Controllable Loads for Load Aggregator in Power Market

C. J. Lee* · K. S. Cho* · H. C. Kim** · J. B. Park* · J. R. Shin* · S. S. Kim***
 *Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ. · Korea Energy Management Corporation (KEMCO) · Korea Power Exchange

Abstract - This paper describes allocation strategies of controllable loads for load aggregator in power market with the direct load control (DLC) program, which is carried out the two-way confirmation procedure. So, it is needed to the priority among the controllable loads to perform effectively and quickly the confirmation task. In this paper, allocation strategies for market operator and/or load aggregator are proposed, which are based on the basic load patterns defined in this paper. To verify the soundness of proposed strategies, case study on a sample system is performed.

1. 서 론

과거 수직통합형 전력산업 구조에서 에너지 이용 합리화의 일환으로 수요관리 프로그램이 수행되어왔다. 수요관리 프로그램 가운데 적극적인 에너지활용 정책으로 추진되어 왔던 직접부하제이 프로그램이 계약에 의거한 단방향 부하차단의 형태로 운용됨으로써, "부하차단 방식"이 프로그램 참여에 대한 중요한 의사결정 요소로 고려되어왔다. 최근 부하차단에 대한 프로그램 참여자의 의사를 반영하는 양방향 정보교환 형태의 제어방식으로서의 전환이 고려되고 있다. 직접부하제이 프로그램은 부하제어를 통한 전력시스템의 신뢰도 향상에 기여함과 동시에 양방향 입찰시장에서의 수요측 탄력성을 부과함으로써 시장가격결정에 수요측의 의사 반영 수단으로서 고려되고 있다[1-4]. 새로운 개념의 직접부하제어 시스템은 상위에 전력시장과의 연동을 위한 MOS(Market Operating System)와 연계하여 서버급 부하관리센터(Load Management Center)와 부하관리사업자(Load Aggregator)로 구성되며, 하위에 직접부하제어장치(Energy Management Device)와 부하제어단말장치(Load Control Unit)로 이루어진 계층적인 운용체계가 고려되고 있다[5].

부하관리사업자는 가능한 다양한 형태의 차단가능부하를 확보하고 상위 시스템에서 요구되는 차단 용량에 효과적으로 대응할 수 있는 능력을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위해서 개별 부하관리사업자는 보유하고 있는 다수의 차단가능부하에 대한 직접 배분전략을 수립하는 것이 급선무이다. 본 논문에서는 부하관리사업자가 확보하고 있는 부하를 3가지 형태의 부하특성으로 분류하고, 이들 부하를 다수 확보한 부하관리사업자가 MOS나 LMC에서 지령 받은 차단용량을 확보하기 위해서 자신의 부하를 어떻게 효율적으로 배분할 것인지에 대한 접근방법을 제시하였다. 2장에서는 부하관리사업자가 제출한 차단가능용량에 대해서 LMC가 시장에서 요구되는 차단용량을 각 사업자에게 효율적으로 배분하는 방법을 기술하고, 3장에서는 부하관리사업자가 LMC로부터 지령 받은 차단용량을 만족시키기 위해서 확보한 부하를 어떻게 효율적으로 배분할 것인지에 대한 접근방법을 제시하였으며, 제안한 접근방법의 타당성을 검토하기 위해서 샘플시스템을 구성하여 4장에서 사례연구를 수행하였다.

2. 부하관리사업자의 차단가능부하 용량 산정

새로운 개념의 직접부하제어 시스템은 상위의 MOS와 연계하여 양방향 정보교환 형태의 제어방식으로 차단 가능한 부하를 제

어함으로써 계통의 수급균형을 유지하고 신뢰도를 향상시킬 뿐만 아니라 경쟁적 전력시장에서 수요측의 능동적 대응이라는 점에서 중요하다. 이러한 부하관리시스템은 전력거래소의 부하사감 명령에 따라 부하관리사업자에게 지령을 내리는 부하관리센터와 직접 부하제어 프로그램에 참여하는 다수의 수요가의 부하를 관리하며 감독해주는 부하관리사업자로 구성된다[5]. 부하관리센터는 상위로부터 내려온 부하차단량에 대해서 시장에 참여중인 다수의 부하관리사업자에게 어떻게 분배하느냐에 따라 프로그램의 성패가 가능될 수 있다. 따라서 본 장에서는 다수의 부하관리사업자를 보유하고 있는 부하관리센터가 상위로부터 내려온 부하차단량에 대해서 개별 부하관리사업자의 차단가능부하의 용량을 산정하는 방법을 제안하였다.

다수의 부하관리사업자를 지닌 부하관리센터가 상위 시스템의 MOS로부터 내려온 차단용량을 특정 t 시간대에 i 번째 부하관리사업자에게 분배할 실제 차단용량은 정식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{LA,i}^t = P_{LA,i}^t - \left(\sum_{i=1}^n P_{LA,i}^t - P_c^t \right) \cdot \frac{P_{LA,i}^t}{\sum_{i=1}^n P_{LA,i}^t} \tag{1}$$

$$= P_c^t \cdot \frac{P_{LA,i}^t}{\sum_{i=1}^n P_{LA,i}^t}$$

여기서, P_c^t 는 t 시간대에 MOS로부터 지령받은 부하관리센터의 차단용량을 나타내며, $P_{LA,i}^t$ 는 t 시간대에 i 번째 부하관리사업자의 차단 가능한 용량이다. 정식(1)을 통해서 계산된 실제 차단가능 용량에 따라 부하관리센터는 아래와 같은 두 가지 경우에 대해서 서로 다른 전략을 세울 수 있다.

- (i) $\sum_{i=1}^n P_{LA,i}^t \geq P_c^t$: 개별 부하관리사업자에게 용량에 따라 비례 배분하여 부하차단량을 산정하고, 차단량의 잉여분에 대해서는 수요입찰(Demand Side Bidding)하거나 차단량을 만족하지 못하는 부하관리사업자에게 판매할 수 있다.
- (ii) $\sum_{i=1}^n P_{LA,i}^t < P_c^t$: 개별 부하관리사업자에게 차단가능한 부하량에 대해서 재통보하고, 차단 가능한 모든 부하를 제어한다.

정식(1)에서 개별 부하관리사업자의 차단 가능한 용량산정은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{LA,i}^t = \alpha_i^t \sum_{j=1}^n \mu_j^t P_{EMD,j}^t \tag{2}$$

여기서, α_i^t 는 t 시간대에 i 번째 부하관리사업자의 참여의 사로서 2진 상태량으로 표현된다. 그리고 μ_j^t 는 t 시간대에 부하관리사업자가 보유하고 있는 EMD의 제어 가능여부를 나타내고, EMD의 차단 가능한 부하 용량은 $P_{EMD,j}^t$ 로 표현하였다. 본 연구에서 제시한 정식(2)는 부하관리센터로부터 내려온 부하차단 명령을 부하관리사업자의 수행인자(a)와 EMD의 상태인자(w)를 통해서 제시하였으며, 이는 부하관리센터와 부하관리사업자간의 양방향 정보교환의 형태를 반영한 것이라 할 수 있다. 본 장에서는

부하관리센터가 상위로부터 받은 차단명령에 대해서 자신이 관리하는 부하관리사업자의 차단가능부하에 대한 용량을 산정하는 방법을 제안하였다. 차단 가능한 부하의 용량산정에 있어서 전체 부하관리사업자의 차단 가능한 용량보다 부하관리센터가 받은 차단 용량이 많은 경우 개별 부하관리사업자의 차단순위 결정에 관한 보다 많은 연구가 필요하다.

3. 부하 특성을 반영한 차단가능 용량의 산정

부하관리사업자가 계약에 의해서 소유하고 있는 EMD는 다양한 부하 특성을 지닌 부하로 구성된다. 현재까지 개발된 직접제어 가능부하 뿐만 아니라 향후 직접부하제어 사업의 활성화 및 전력시장에서의 수요측 의사가 효과적으로 반영될 수 있도록 다양한 형태의 부하가 개발될 것이다. 본 연구에서는 기 개발된 부하와 향후에 개발될 부하를 대비하여 3가지 기본 부하형태를 정의하고 이를 통해서 효율적으로 차단 가능한 부하 용량을 산정하는 접근법을 제안하였다.

3.1. 직접제어가능부하의 부하 특성

본 연구에서 직접제어가능부하의 부하특성은 3가지 기본 부하형태로 규정하였다. 물론, 정의한 부하특성들을 혼용하여 복합된 부하형태로 손쉽게 확장할 수 있으며, 가장 기본적인 부하형태만을 고려하였다. 본 연구에서 규정한 기본 부하형태는 다음과 같다.

- Type A : 균등분포 부하(uniform distribution load)
- Type B : 구형분포 부하(pulse distribution load)
- Type C : 삼각분포 부하(triangular distribution load)

기본 부하형태는 부하관리사업자가 수용가와 체결한 계약이나 해당 부하의 일간 부하실적(daily load curve)을 통해서 정의할 수 있는데, 본 연구에서는 전자인 계약에 의한 부하형태를 기본 부하형태로 정의하였다. 그림 1은 정의한 기본 부하 형태를 도시하였으며, 식(3)과 같이 정식화할 수 있다.

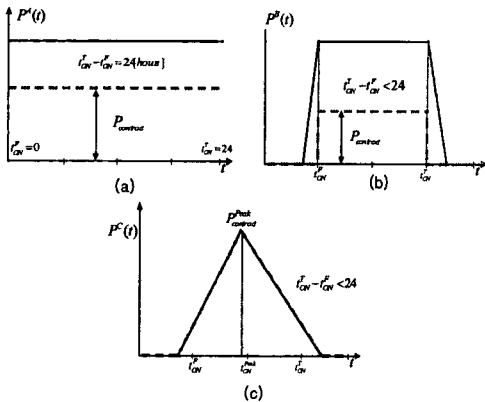


그림 1 DLC 시행가능 부하의 특성
Fig. 1 Properties of DLC Loads

$$\begin{aligned}
 P^A(t) &= P_{contract} \cdot u(t) \\
 P^B(t) &= P_{contract} \cdot [u(t - t_{ON}^F) - u(t - t_{ON}^T)] \\
 P^C(t) &= K_1 \cdot [(t - t_{ON}^F)u(t - t_{ON}^F) - (t - t_{ON}^{Peak})u(t - t_{ON}^{Peak})] \\
 &\quad - K_2 \cdot [(t - t_{ON}^{Peak})u(t - t_{ON}^{Peak}) + u(t - t_{ON}^{Peak}) \\
 &\quad \quad \quad + (t - t_{ON}^T)u(t - t_{ON}^T)] \\
 K_1 &= \frac{P_{contract}^{Peak}}{t_{ON}^{Peak} - t_{ON}^F}, \quad K_2 = \frac{P_{contract}^{Peak}}{t_{ON}^T - t_{ON}^{Peak}}
 \end{aligned} \quad (3)$$

그림 1에서 실선은 부하의 시간에 대한 실제 부하실적이고, 점

선은 부하관리사업자와 체결한 계약에 의한 차단 가능 용량과 그 시간 특성을 보이고 있다. 그림 1(a)의 균등분포부하는 시행업체에서 소유한 비상발전기와 같은 대체 수단을 통해서 일간 일정량의 부하실적을 줄일 수 있는 부하형태로 현재 개발된 주요 부하 특성 중에 하나이다. 또한, 구형분포(그림 1(b))는 하루 중에서 일정 시간대의 부하실적을 일정량 줄일 수 있는 부하형태로 실제 부하실적은 경사구형(skew-pulse)분포를 따르고 있으나 계약은 경사(skew) 부분을 제외한 구형(pulse) 부분만을 취한 형태의 부하이다. 마지막으로 삼각분포(그림 1(c))는 일간 단조 증감소하는 부하의 형태로 실제 부하실적과 동일하게 계약이 체결된 부하형태를 고려하였다. 이들 부하형태를 각각 A, B, C로 표현하였으며, 식(3)과 같이 정식화되었다.

3.2. 차단가능 용량의 산정 및 우선 순위

전술한 부하형태를 지닌 다수의 부하를 소유한 EMD_i가 특정 t 시간대에 차단 가능한 부하 용량은 부하의 형태에 따라 분리하여 정식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{EMD,i}^t &= \sum_{k=a_1}^{a_m} \rho_{ka}^t P_{ka}^A(t) \\
 &\quad + \sum_{k=b_1}^{b_m} \rho_{kb}^t P_{kb}^B(t) + \sum_{k=c_1}^{c_m} \rho_{kc}^t P_{kc}^C(t) \quad (4) \\
 &\{a_1, a_2, \dots, a_m, \quad b_1, b_2, \dots, b_m, \quad c_1, c_2, \dots, c_m\}
 \end{aligned}$$

여기서 ρ_{ka}^t 는 A 형태의 a 번째 부하의 t 시간대 차단 가능여부를 나타내는 2진 상태량으로 EMD나 개별 LCU에 설정된다. DLC는 시행기관 및 시행규칙에 따라서 달라질 수는 있으나, 1회 차단시의 지속시간과 연간 제한된 시행횟수에 있어서는 유사한 규칙을 도입하고 있다[5]. 이러한 1회 시행의 지속시간을 고려하여 t 시간대에 차단 가능한 용량은 향후 지속시간 동안 얻을 수 있는 차단 가능한 부하용량을 각 부하의 가점요소(incentive factor:IF)로 고려하여 $IF_{A,B,C}$ 를 정의할 수 있으며 정식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{LCU,k}^t &= \rho_{ka}^t \cdot P_k(t) \cdot IF_k^t \\
 IF_k^t &= \frac{1}{\max(P_k)} \int_t^{DT} P_k(t) dt \quad (5) \\
 DT &= \text{지속시간} / 15 \text{ minutes}
 \end{aligned}$$

정식 (5)에서 DT는 1회 시행의 지속시간을 나타내며, 부하관리사업자가 수용가측에 요구하는 제어시행여부 확인 절차가 매 15분당 시행하는 것으로 설정하고 15분당 시간으로 환산한 것이다. 이는 시장규칙에 의해서 변경될 수 있다. $\max(P_k)$ 는 해당 LCU에 대한 DT 기간동안의 전력량[MWh]을 의미한다. 따라서, 가점요소는 향후에 지속시간 동안 최대 부하량으로 차단하였을 때의 차단 부하용량[kWh]에 대한 실제 차단 가능한 부하용량[kWh]의 비율로서 나타나며, 개별 LCU간의 우선 순위를 부여하는 데에 사용한다.

종합하면, EMD의 차단 가능한 용량은 개별 LCU의 우선 순위가 평가되는 정식(5)를 수행하여 $P_{LCU,k}^t$ 가 양의 값을 가지는 LCU를 선별하고 그 계약 용량의 합이 바로 EMD의 차단 가능한 용량이 된다. 만일 부하관리사업자에 의해서 해당 EMD에 요구되는 차단용량이 실제 차단 가능한 용량보다 적을 경우는 정식(5)의 우선 순위에 의해서 차단할 LCU를 선정하게 된다. 부하형태별 IF를 보면, 균등분포, 구형분포, 그리고 삼각분포는 순으로 가점이 부여되며, 삼각분포부하는 적용시점 [t_{ON}^{Peak}, t_{ON}^T]인 경우에 불리하게 작용되며, 차단 가능한 시간간격에 의해서도 불리하게 작용할 수 있다.

본 장에서는 부하특성을 반영한 개별 EMD의 차단 가능한 용량의 산정 기법을 제안하였다. 부하특성이 차단 지속시간 동안에 차단상태를 얼마나 유지할 수 있는냐에 의해서 우선순위를 부여하였다. 차단상태를 일정시간 지속하는 것은 DLC 시행으로 지급 받게 되는 리베이트 수준과 밀접하게 관련되어 있기 때문에, 적정 리베이트 수준의 결정과 더불어 DLC 시행 가능한 부하의 개발에 보다 많은 연구가 요구된다 하겠다.

4. 사례연구

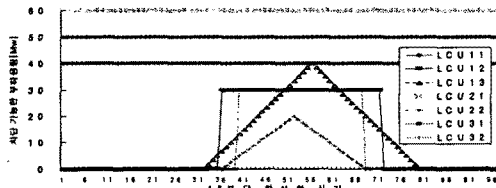
본 논문에서는 직접부하제어 프로그램에 관한 일련의 부하배분 전략을 제시하였으며, 제한한 전략의 타당성을 검토하기 위해서 샘플시스템에 대한 사례연구를 수행하였다. 사례연구를 위해 샘플 시스템에 관한 기본 가정은 다음과 같다.

- 직접부하제어의 제어형태-“전일예고, 당일예고, 긴급”-는 고려하지 않는다. 제한한 전략은 단시간 내에 수행될 수 있어 시간에 대한 제약이 따르지 않으므로 사례연구에서는 고려하지 않았다.
- 상위 시스템에서 지령 받은 부하 차단량 : 450[MW].
- 시장에 참여한 부하관리사업자(LA)는 3개 사업자.
- 개별 부하관리사업자는 부하특성이 다른 다수의 직접 제어 가능한 부하를 보유.
- 1회 부하제어 시행시 지속시간은 4시간으로 설정.

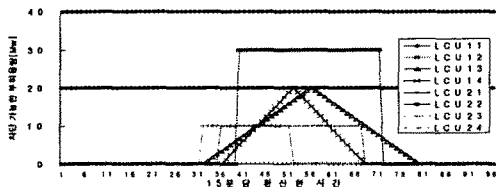
전술한 가정을 고려하여 선정된 샘플시스템은 다음과 같다.

- LA_1 : $EMD_1(A, B, C)$, $EMD_2(A, B)$, $EMD_3(A, C)$
- LA_2 : $EMD_1(A, B, C, C)$, $EMD_2(A, A, B, B)$
- LA_3 : $EMD_1(B, B, B)$, $EMD_2(A, A)$
where $\alpha_i = \mu_j = \rho_k = 1 \forall i, j, k$

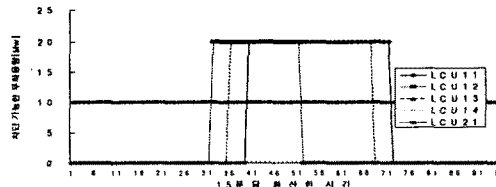
여기서 괄호 안의 기호는 각 EMD가 소유하고 있는 LCU의 부하형태를 나타내며, 문제를 단순화하기 위해서 부하관리사업자, EMD 및 LCU는 모두 제어 가능한 상태에 있는 것으로 설정하였다. 각 부하관리사업자가 보유한 전체 LCU의 특성은 그림 2와 같으며, 직접부하제어 시행시간은 11시($t=44$)로 선정하였다.



(a) LA1이 보유한 LCU의 부하특성



(a) LA2가 보유한 LCU의 부하특성



(c) LA3이 보유한 LCU의 부하특성

그림 2 샘플시스템의 사양
Fig. 2 Configuration of a Sample System

본 논문에서 제시한 배분 알고리즘을 적용하여 지정된 시각에 계산된 개별 EMD와 부하관리사업자의 차단 가능한 부하용량은 다음과 같이 나타났다.

$LA_1=240$	$P_{EMD,1}=100$, $P_{EMD,2}=90$, $P_{EMD,3}=50$
$LA_2=150$	$P_{EMD,1}=90$, $P_{EMD,2}=60$
$LA_3=80$	$P_{EMD,1}=60$, $P_{EMD,2}=20$

상위시스템에서 지령 받은 부하 차단량(450[MW])을 만족시키기 위해 개별 부하관리사업자의 실제 차단해야 할 부하량은 다음과 같이 나타났다.

$$P_{LA,1}^* = 229.78, P_{LA,2}^* = 143.61, P_{LA,3}^* = 76.59$$

즉, 개별 부하관리사업자는 차단 가능한 용량에 따른 비례 배분된 실제 차단용량을 할당받게 된다. 각 부하관리사업자는 할당받은 차단 용량을 만족하는 부하조합을 구하기 위해서 (5)에 정식화된 가정요소에 의한 우선순위를 결정한다.

- LA_1 : $\langle 21 \rangle, \langle 11 \rangle, \langle 31 \rangle, \langle 12 \rangle, \langle 22 \rangle, \langle 13 \rangle, \langle 32 \rangle$
- LA_2 : $\langle 11 \rangle, \langle 21 \rangle, \langle 12 \rangle, \langle 22 \rangle, \langle 13 \rangle, \langle 14 \rangle, \langle 24 \rangle, \langle 23 \rangle$
- LA_3 : $\langle 11 \rangle, \langle 13 \rangle, \langle 21 \rangle, \langle 22 \rangle, \langle 12 \rangle$

여기서 $\langle * \rangle$ 는 LCU의 첨가만 표시한 것이다. 우선순위에 따라 실제 차단용량을 만족하기 위한 LCU의 조합을 구성하고 개별 EMD의 실제차단용량을 산정하면 다음과 같다.

- LA_1 : 229.78[MW]
: $EMD_1(100)$, $EMD_2(90)$, $EMD_3(39.78)$
- LA_2 : 143.61[MW]
: $EMD_1(90)$, $EMD_2(53.61)$
- LA_3 : 76.59[MW]
: $EMD_1(56.59)$, $EMD_2(20)$

LA_1 의 경우에는 LUC_{32} 가 제어대상에서 제외되며, $LA_{2,3}$ 에서는 각각 LUC_{23} , LCU_{12} 가 선정된 차단 용량 보다 적은 양의 차단용량으로 프로그램에 참여하게 된다.

본 연구에서는 MOS나 LMC에서 요구되는 차단용량에 비해 부하관리사업자가 더 많은 부하용량을 확보하고 있을 때의 효율적인 부하배분 전략으로 부하형태에 따라 그 우선순위가 효율적으로 선정되고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 직접부하제어 프로그램에서 요구되는 일련의 부하 배분 전략에 대해서 논의하였다. 전력시장에서 요구되는 부하 차단용량을 시장에 참여하고 있는 부하관리사업자에게 적절히 분배하고, 개별 부하관리사업자는 자신이 확보한 부하의 특성을 고려하여 지령 받은 차단용량을 만족하도록 효율적으로 차단할 부하를 선정할 수 있는 전략을 제시하였다. 본 연구의 결과를 통해서 부하관리사업자는 확보한 부하의 효율적인 배분 전략을 수립하는 데 기초자료로 활용될 수 있으며, 향후 본 프로그램의 활성화를 위해 다양한 부하특성을 갖는 부하를 개발할 필요가 있으며, 전력 수요측 의사반영의 수단으로써 본 프로그램이 시장에 미치는 영향에 대한 정량적 분석이 부하개발과 병행되어야 할 것으로 사려된다.

감사의 글
이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[참고 문헌]

- [1] California Public Utilities Commission, California Energy Commission, Economic Analysis of Demand-Side Management Programs: Standard Practice Manual, Dec. 1987.
- [2] Peak Load Management Alliance, Demand Response: Principle for Regulatory Guidance, Feb. 2002.
- [3] PJM, PJM 2001-2002 Load Responsive Pilot Program, 2001.
- [4] INO-NE, Load Response Program Manual, July 17, 2001.
- [5] 에너지관리공단, 2003년 에너지관리공단 직접부하제어운영기준 및 사용자 직접부하제어시스템 기술규격서, 2003. 3