

전력계통운전상황을 고려한 직접부하제어자원의 배분전략

조기선* · 이찬주* · 박종배* · 신중린* · 김희철**

*건국대학교 전기공학과 · **에너지관리공단 기술개발본부

An Allocation Strategy for Direct Load Control Program Resources in Power Systems

K.S.Cho* · C.J.Lee* · J.B.Park* · J.R.Shin* · H.C.Kim**

*Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ. · **Korea Energy Management Corporation

Abstract - This paper deals with an allocation strategy for the resources of direct load control program, which is considered the operating states in power systems. The existing approaches, load shedding priority algorithm, curtailment payback based algorithm and mixed curtailment algorithm, are based on the uniform allocation strategy. These approaches are not taken into account the operating states in power systems. So, under the critical operating condition, direct load control resource is evaluated by introducing the congestion factor.

배분의 목적이 상이해 질 수 있기 때문에, 먼저 자원배분을 시행하는 시행주체가 결정되어야 하며, 또한, 해당 시간대에 차단 가능한 부하에 대한 상태정보는 배분주체에게 알려져 있다고 가정한다. 이러한 가정은 수용가의 차단 의사 및 차단 불가능한 부하에 대한 상태정보는 상위에 일정 시간간격으로 보고토록 규정[4]하고 있어 유효하다고 볼 수 있다. 2장에서 직접부하제어자원의 배분주체에 따라 계통운용상황을 고려하는 경우와 고려하지 않는 상황에 대한 배분전략을 기술하고, 3장에서 부하특성을 반영한 부하관리사업자의 직접부하제어자원의 배분전략을 기술하였다. 4장에서는 단순모형계통에 대한 사례연구를 통해서 제안한 배분전략의 수행예제를 보였으며, 그 실효성을 검토하였다.

1. 서 론

에너지관리공단의 주관으로 정부에서 추진하고 있는 직접부하제어(Direct Load Control : DLC)사업은 2003년 말을 기점으로 상위의 부하관리센터와 하위의 직접부하제어장치 및 단말기의 개발이 완료단계에 접어들고 있으며, 이미 300개소 이상의 직접부하제어자원을 확보하여 시스템을 구축하였으며, 다양한 부하군을 통합 관리할 목적으로 부하관리사업자(Load Service Entity : LSE)가 출현한 상태이다. 막대한 설비투자가 소요된 본 DLC 사업의 효율 높이고, 경쟁적 전력시장 하에서 발전자원에 대응할 수 있는 부하자원으로서의 인식을 제고하기 위해서 본격적으로 직접부하제어자원이 전력시장에 진입하여 그 효용을 검증 받을 단계에 와있다. 현재 DLC 사업은 "전력계통의 긴급비상 상황에서 계통의 안정성을 확보하기 위한 일련"으로 KPX(Korea Power eXchange)의 지령에 의해 시행되고, 그에 따른 보조금을 지급하는 형태를 취하고 있으나, 보다 많은 DLC자원을 발굴하고 에너지 자원의 효용을 극대화하기 위해서, DLC자원이 전력시장에 다양한 방식으로 진입할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있으며, 이는 DLC사업의 본래 목적을 달성함과 동시에 경쟁적 전력시장환경에서 발전자원의 시장지배력에 대응한 부하자원의 역할을 담당할 수 있다는 점에서 무엇보다 중요하다 하겠다[1]. 전력시장에 부하자원이 다양한 형태로 진입하기 위해서는 무엇보다 부하자원의 특성(가격, 시간 등)을 파악하고 전력시장에 진입 가능하도록 부하자원의 내·외적 성능을 제고하는 중요한 과제가 선결되어야 한다. 또한, 발굴된 자원에 대해서는 그 효용가치를 전력시장에서 명확히 정의하고 인식할 필요가 있다.

본 연구에서는 먼저 DLC 자원의 효용가치를 전력계통의 운용상황을 고려한 접근방법으로, DLC 자원이 KPX의 지령에 의해 서만 활용되는 시장상황하에서 DLC자원들 간의 효용가치를 어떻게 부과할 것인지에 관하여 논할 것이며, 이를 본 연구에서는 DLC자원의 배분전략이라 정의하였다. 기존의 DLC자원 배분전략으로는 계약용량에 의한 배분전략, 보조금 수준에 의한 배분전략, 이를 혼용한 혼합전략 등이 보고된 바 있으며[2], DLC자원의 개별 운전특성을 고려한 배분전략도 보고된 바 있다[3]. 기존의 접근방법에서는 DLC 자원이 전력계통의 운전상황을 개선할 수 있다는 즉, 계통혼잡(congestion)과 같은 특수한 계통상황에 기여할 수 있다는 점은 전혀 고려되고 있지 못하며, 단지 부하실적을 줄일 수 있는 능력에 의해서만 부하를 배분하고 있다. 본 연구에서는 DLC 자원들이 계통의 운전상황을 개선할 수 있는 정도를 반영하는 평가지표를 개발하여 이를 배분전략에 고려함으로써 통합배분전략을 수립하였다.

DLC자원의 배분전략을 수립함에 있어서, 시행주체에 따라서

2. 직접부하제어자원의 배분전략

2.1 부하관리센터의 부하배분전략

부하관리센터가 계통운용상황을 고려하지 않고 단지 MOS (Market Operating System)로 부터 지령받은 차단용량을 부하관리사업자별로 실제 차단용량을 배분함에 있어서, 공평배분의 원리에 입각해 차단 가능 용량에 대한 비례배분을 통해 배분할 수 있다. t 시간대에 i 번째 부하관리사업자에게 분배할 실제 차단용량은 (1)과 같이 정식화할 수 있다.

$$P'_{LA,i} = P'_c \cdot \frac{P'_{LA,i}}{\sum_j P'_{LA,i}} \quad (1)$$

여기서, P'_c 는 t 시간대에 MOS로부터 지령받은 부하관리센터의 차단용량을 나타내며, $P'_{LA,i}$ 는 t 시간대에 i 번째 부하관리사업자의 차단 가능 용량(계약용량이 아닌 차단가능한 용량)이며, $P'_{LA,i}$ 는 i 번째 부하관리사업자가 t 시간대에 차단해야 될 실제 차단용량이다. MOS의 지령용량이 확보한 차단가능용량을 상회할 경우($\sum P'_{LA,i} > P'_c$)에는 전체 사업자의 부하를 제어하며, 부족분에 대해서는 부하관리센터에서 별도로 개설한 경쟁입찰시장에서 부하관리사업자들이 경쟁함으로써 자원을 확보할 수 있다. DLC 자원을 위험관리(Risk Management)수단으로서 확보하고 있는 사업자는 이러한 별도의 경쟁입찰시장에 DLC자원 물량을 제공하고 사업을 영위할 수 있다.

2.2 계통운전상황을 고려한 부하배분전략

전술한 부하관리센터의 부하배분전략은 계통의 운전상황이 고려되어 있지 않은 배분전략으로, 여기에 계통의 운전상황을 고려하기 위해서는 계통운전상황 정보를 직접적으로 확보하는 것은 KPX가 배분의 주체가 되는 것이 합당할 것이다. 허나, KPX에서 다양한 부하자원을 발굴·육성하는 정책까지 수행한다는 것은 역량의 분산화를 초래할 우려가 있으며, 이미 국내에 부하자원의 역할·육성을 전담하는 기관이 있으므로 이를 활용할 경우 정책의 추진에 있어서나 성과에 있어서 더 실효성이 있을 것으로 사려된다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 부하관리센터의 모든 DLC자원정보가 MOS와 연계되어 MOS에서 계통운전상황을 개선할 수 있는 DLC 부하자원을 우선적으로 선별하여 DLC자원간의 차별성을 부여하고 이 정보(가능한 차단해야 할 자원)를 부하관리센터에 지령함으로써 부하자원을 배분할 수 있다. DLC자원들이 특정관심선로의 전력조류에 미치는 영향은 선로의 전력조류 민감도해석을 통해서 정식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_{i,k}^{j,k} = \frac{\partial P_{i,k}}{\partial D_i} \quad (2)$$

여기서, $T_{i,k}^{j,k}$ 는 i 번째 DLC자원에 대한 $j-k$ 선로의 전력조류 민감도, D_i 는 i 번째 DLC자원, $P_{i,k}$ 는 $j-k$ 선로의 전력조류를 나타낸다. KPX는 MOS의 계통데이터를 활용하여 각 DLC자원이 관심대상선로에 미치는 감도를 정의하고, 차단할 DLC자원의 선정은 관심대상선로에서 요구되는 전력조류여유도에 의거하여 정식(3)과 같이 수행될 수 있다.

$$\{A \mid P_{i,k}^{margin} \leq \sum_{a=1}^n T_a^{i,k} \cdot T_a^{j,k} > T_{th}, \forall a \in I\} \quad (3)$$

KPX는 (3)에 의해서 우선적으로 차단할 부하를 선정하고, 이를 부하관리센터에 통보함으로써 부하관리센터는 정식(1)을 수정하여 (4)와 같은 통합 배분전략을 수립할 수 있다.

$$P_{LA,i}^{*} = P_{LA,i}^{Sch} + (P_c^i - P_{Sch}^i) \cdot \frac{P_{LA,i}^{Non}}{\sum_{i=1}^I P_{LA,i}^{Non}} \quad (4)$$

여기서 위첨자 Sch, Non 는 각각 KPX에 의해서 선정 및 미선정된 DLC자원을 의미한다. 이를 통해서 계통의 혼잡이 예상되는 선로의 혼잡을 완화할 수 있는 DLC자원을 우선적으로 제어하고 남은 용량에 대해서는 이전의 부하관리센터가 수행한 균등배분 방식으로 제어대상 부하를 선정하게 된다.

3. 부하관리사업자의 부하배분전략

3.1 DLC자원의 부하특성 분류

부하관리사업자가 계약에 의거하여 다양한 부하특성을 가진 부하군을 보유하게 되므로, 부하의 특성을 최대한 활용하여 DLC자원의 효율가치를 제고하도록 부하배분전략을 수립할 필요가 있다. 다양한 부하특성을 갖는 부하에 대해서 3가지 형태의 부하특성을 규정하여, 규정된 부하특성을 갖는 부하는 혼용한 복합 배분전략을 수립함으로써 전반적인 부하제어의 효율성을 제고할 수 있다. 본 연구에서 규정한 기본 부하군은 균등분포, 구형분포, 삼각분포 부하로 그림 1과 같은 형태의 부하로 정의하였다. 그림 1에서 실선은 시간에 따른 부하 특성을 나타내고, 점선은 시간에 따른 계약용량을 나타낸다. 이들 부하특성을 갖는 부하를 각각 A, B, C로 표기하여 정식화하면 정식(5)와 같다.

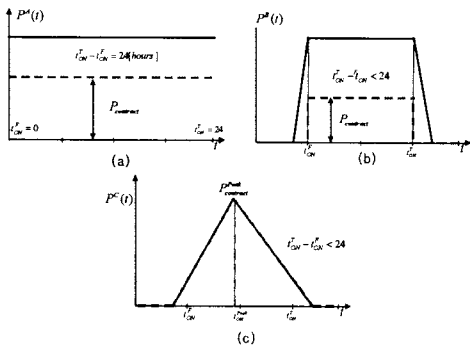


Fig. 1 Properties of the Fundamental DLC resources

$$\begin{aligned} P^A(t) &= P_{contract} \cdot u(t) \\ P^B(t) &= P_{contract} \cdot [u(t-t_{ON}^B) - u(t-t_{OFF}^B)] \\ P^C(t) &= K_1 \cdot [(t-t_{ON}^C)u(t-t_{ON}^C) - (t-t_{ON}^C)u(t-t_{peak}^C)] \\ &\quad - K_2 \cdot [(t-t_{peak}^C)u(t-t_{peak}^C) + u(t-t_{peak}^C) \\ &\quad \quad + (t-t_{OFF}^C)u(t-t_{OFF}^C)] \\ K_1 &= \frac{P_{contract}^{Peak}}{t_{ON}^C - t_{ON}^C}, \quad K_2 = \frac{P_{contract}^{Peak}}{t_{ON}^C - t_{ON}^C} \end{aligned} \quad (5)$$

3.2. 부하관리사업자의 부하배분전략

상이한 부하특성을 지닌 다수의 부하를 소유한 직접제어부하장치(EMD_j)가 특정 t 시간대에 차단 가능한 부하 용량은 부하의 형태에 따라 분리하여 정식(6)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{EMD,j}^t &= \sum_{ka=a_1}^{a_2} \rho_{ka}^t P_{ka}^A(t) \\ &\quad + \sum_{kb=b_1}^{b_2} \rho_{kb}^t P_{kb}^B(t) + \sum_{kc=c_1}^{c_2} \rho_{kc}^t P_{kc}^C(t) \quad (6) \\ &\{a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_m, c_1, c_2, \dots, c_m\} \end{aligned}$$

여기서 ρ_{ka}^t 는 균등분포부하(a 번째)의 t 시간대에 차단 가능여부를 나타내는 상태량으로 EMD/LCU 에 2진 상태로 설정된다. DLC 사업은 제한된 부하차단횟수 및 지속시간을 규정하고 있으므로, 이를 최대한 활용하여 부하배분 전략을 수립할 수 있다. 1회 시행의 지속시간을 고려하여 t 시간대에 차단 가능한 용량은 향후 지속시간 동안 얻을 수 있는 차단 가능한 부하용량을 각 부하의 가점 요소(incentive factor: λ)로 반영하여 $\lambda_{A,B,C}$ 를 정식(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{LCU,k}^t &= \rho_k^t \cdot P_k(t) \cdot \lambda_k' \\ \lambda_k' &= \frac{1}{\max(P_k)} \int_t^{DT} P_k(t) dt \quad (7) \\ DT &= \text{지속시간[per 15 min]} \end{aligned}$$

여기서, DT 는 1회 시행의 지속시간, $\max(P_k)$ 는 해당 LCU에 대한 DT 기간동안의 전력량[Mwh]을 의미한다. 따라서, λ 는 향후에 지속시간 동안 최대 부하량으로 차단하였을 때의 차단 부하용량[kWh]에 대한 실제 차단 가능한 부하용량[kWh]의 비율로써 나타나며, 개별 LCU간의 우선 순위를 부여하는 데에 사용할 수 있다.

본 장에서는 부하관리사업자가 보유한 부하자원의 특성을 반영한 개별 부하들의 차단 가능용량의 산정을 위해서 지속시간과 시행횟수를 고려한 배분전략을 수립하였다. 덧붙여, 부하관리사업자가 사업의 위험관리를 위해서 확보하고 있는 DLC자원이 있는 경우에는 이를 활용하여 사업의 위험을 회피함과 동시에 부가적인 용량을 시장에 제시함으로써 사업성을 제고할 수 있다.

4. 사례연구

4.1 부하관리센터의 부하배분전략

계통운전상황을 고려한 DLC자원의 부하배분전략의 타당성을 검토하기 위해서 본 연구에서는 그림 2와 같은 표본계통에 대해서 사례연구를 수행하였다(입력자료: 표 1).

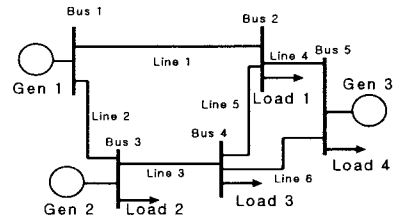


Fig. 2 Sample system 1

Table 1 Input data on sample system 1

모선	전압	위상각	P_L	Q_L	P_G
1	1.040	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.998	0.0	700.0	70.0	0.0
3	1.030	0.0	250.0	25.0	300.0
4	1.01	0.0	250.0	25.0	0.0
5	1.00	0.0	300.0	30.0	200.0

표본계통 1에 대한 임의 모선에서의 단위 부하 감소에 대한 특정 선로의 조류변화를 모의한 결과는 표 2와 같다. 본 표본계통에서 관심선로는 1-2와 1-3번 선로를 대상으로 삼았다.

Table 2 Power flow sensitivity on DLC resources

Line No.	Bus		1	2	3	4	5
	from	to					
1	1	2	0.000	0.885	0.311	0.533	0.733
2	1	3	0.000	0.729	0.538		0.360
3	3	4	0.000	0.210	-0.299	0.518	0.346
4	2	5	0.000	-0.052	0.074	0.127	0.614
5	2	4	0.000	-0.152	0.215	0.369	0.068
6	4	5	0.000	0.052	-0.074	-0.127	0.404

표 2에 나타난 바와 같이, 2번과 5번 모선에서 부하의 단위 감소는 1번 선로(1-2)가 가장 많은 조류의 변화를 가져왔으며, 3번과 4번 모선에서 부하의 단위 감소는 2번 선로(1-3)가 가장 많은 조류의 변화를 가져왔다. 그리고 상기 표에서 음의 값을 갖는 조류변화값은 기존 조류의 방향에 대해서 역조류 방향을 나타낸다. 따라서, 상위시스템에서는 이를 반영한 관심선로에 대한 민감도를 통해서 2번 모선에 위치한 DLC자원과 5번 모선에 위치한 DLC자원을 우선적으로 차단하도록 지령하게 된다.

국내 전력계통의 경우에 있어서는 혼잡이 발생될 경우가 주로 복잡조류에 의한 것으로 인식되고 있으므로, 이러한 관점에서 보면 서울 경기권에 DLC자원 개발이 요구되며, 이 지역의 DLC자원은 우선적으로 제어시행대상부하로써 인식되고, 향후, 이러한 형태의 부하가 다량 발굴될 경우에 전력시장에서는 새로운 장의 시장으로의 발전까지 꾀할 수 있을 것으로 사려된다.

4.2 부하관리사업자의 배분전략

본 연구에서 제안한 부하관리사업자의 부하배분전략의 타당성을 검토하기 위해서 일련의 가정을 도입하고 계통운전상황을 고려하여 가능한 차단해야되는 부하를 제외한 잔여자원에 대한 부하배분 전략을 수행하였다. 사례연구를 위해 샘플시스템에 취한 기본 가정은 다음과 같다.

- 직접부하제어의 제어형태는 고려하지 않는다.
- 계통혼잡에 기여하는 부하자원을 제외한 지령 부하 차단량 : 450[MW].
- 시장에 참여한 부하관리사업자(LSE)는 3개 사업자.
- 개별 부하관리사업자는 부하특성이 다른 다수의 직접 제어 가능한 부하를 보유.
- 1회 부하제어 시행시 지속시간은 4시간으로 설정.

전술한 가정을 고려하여 선정된 표본계통(그림3)은 다음과 같다.

- LSE₁: EMD₁ (A, B, C), EMD₂ (A, B), EMD₃ (A, C)
 - LSE₂: EMD₁ (A, B, C, C), EMD₂ (A, A, B, B)
 - LSE₃: EMD₁ (B, B, B), EMD₂ (A, A)
- where $\alpha_i = \mu_j = \rho_k = 0 \forall i, j, k$

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 3과 같으며, 직접부하제어 시행시간은 11시(t=44)로 선정하였다.

상위시스템에서 지령 받은 부하 차단량을 만족시키는 개별 부하관리사업자의 실제 차단해야 할 부하량은 다음과 같이 나타났다.

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

즉, 개별 부하관리사업자는 차단 가능한 용량에 따른 비례 배분된 실제 차단용량을 할당받게 된다. 각 부하관리사업자는 할당받은 차단 용량을 만족하는 부하조합을 구하기 위해서 (7)에 정식화된 가점요소에 의한 우선순위를 결정하고, 이에 따라 실제 차단용량 만족하기 위한 LCU의 조합을 구성하고 개별 EMD의 실제차단용량을 산정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} LSE_1: 229.78[MW] \rightarrow EMD_1(100), EMD_2(90), EMD_3(39.78) \\ LSE_2: 143.61[MW] \rightarrow EMD_1(90), EMD_2(53.61) \\ LSE_3: 76.59[MW] \rightarrow EMD_1(56.59), EMD_2(20) \end{aligned}$$

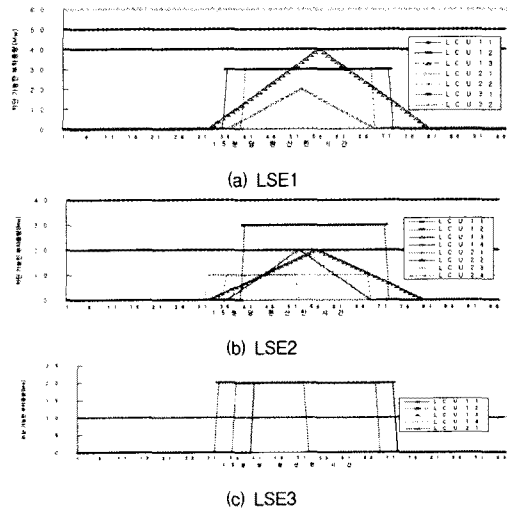


Fig. 3 Configuration of Sample System 2

4.3 고찰

- 계통운전상황을 제고할 수 있는 부하자원의 확보는 향후 전력시장의 가격결정을 비롯한 안정성 확보에 지대한 공헌을 할 수 있을 것으로 평가되나, 현재까지 발굴된 DLC자원이 지리적으로 주로 경기이남 지역에 편중되어 있어, 그 효과를 기대하기는 어려운 상황이다. 따라서, 부하자원의 내·외적 성능을 제고하여 부하집중지역에 DLC자원을 개발하는 것이 급선무이며, 이에 대한 지속적인 연구가 요구된다.
- 계통운전상황에 긍정적 효과를 발휘하는 다양한 형태의 DLC자원의 발굴과 육성을 위한 심도 있는 연구가 요구된다.
- DLC부하자원의 특성을 명확히 파악하여 부하관리사업자가 사업을 영위함에 있어서 위험을 관리하고, 보다 효율적인 부하자원의 운용을 통한 사업영역의 확장방안을 마련할 필요가 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통의 운용상황을 고려한 DLC자원의 효용 가치를 평가하는 접근방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 접근방법을 통해서 DLC자원이 단지 전력수급안정화에 기여하는 특수한 형태의 부하자원으로서만 인지하고 있는 상황에 대한 인식을 제고하고, 보다 많은 연구개발을 통하여, DLC자원이 전력시장에 진입하는 다양한 방안 모색의 기반을 형성할 수 있으며, 더 나아가 전력시장에서 발전자원의 시장지배력에 대응하는 부하자원으로 발전될 수 있도록 지속적인 관심과 연구개발이 요구되며, 향후, DLC자원을 계통운용상황을 개선하는 긍정적인 측면과 보조금을 지급해야되는 부정적 측면을 동시에 고려한 최적화 기법에 관한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 한국전력연구원의 대학전력센터 지원 프로그램에 의하여 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Peak Load Management Alliance, "Demand Response: Principle for Regulatory Guidance", Feb. 2002.
- [2] 기초전력공학공동연구소, "직접부하제어(DLC) 상위시스템 구축", 한전KDN, pp.243-310, 2002.12.31
- [3] 이찬주, 조기선, 김희철, 박종배, 신중린, "부하관리사업자의 부하배분전략", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A), pp.559-561, 2003.7.21-23
- [4] 에너지관리공단, "수용가용 직접부하제어시스템 기술규격서", 2003.3
- [5] 박종배, 이찬주, 신중린, 김희철, "전력계통 선로조류 민감도 분석에 관한 연구", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A), pp.630-632, 2001.7.18-20