

DLC와 기동정지계획의 연계방법에 관한 연구

이 범^{*}, 김용하^{**}, 최상규^{***}, 김형중^{****}

*여수대학교, **인천대학교, ***안양과학대학교, ****에너지관리공단

A Study on Direct Load Control including Unit Commitment

Lee, Buhm^{*}, Kim, Yong-ha^{**}, Choi, Sang-kyu^{***}, Kim, Hyung-jung^{****}

* Yosun National Univ., ** Incheon Univ., *** Anyang Technical College, **** Energy Corp.

E-mail : buhmlee@yosun.ac.kr

요 약

본 연구에서는 전력시스템의 경제적인 운용의 일환으로 DLC와 기동정지계획을 연계하여, DLC에 의해 조절되는 부하에 대응할 수 있는 기동정지계획을 수립할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로, 동적계획법에서의 State를 DLC에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 확장하는 3차원 동적계획법을 구성함으로써 DLC와의 연계를 가능토록 한 것이다.

ABSTRACT

This paper describes Direct load control(DLC) method including unit commitment. To consider the unit commitment on DLC, 3-Dimensional dynamic programming as a new unit commitment method is developed. And, this method is applied to DLC. As a result, optimization of operating schedule with DLC is possible. This method is applied to the test system, and usefulness of the method is verified.

키워드

Direct Load Control, 기동정지계획(Unit Commitment), 3차원 동적계획법(3-Dimensional D.P.), 최적화(Optimize)

I. 서 론

지금까지의 DLC[1]는 전체부하를 분산하는 개념으로 예비율을 확보하기 위하여 시행하고 있다. 그러나, 전력시스템은 안정적인 운용[2,3] 외에도 경제적인 운용도 필요로 하기 때문에, 기동정지계획 등 ELD(경제부하배분)를 포함하여 DLC의 계획을 수립하여야만 안정적이면서도 보다 경제적인 운전계획을 얻을 수 있다. 그러나, 기동정지계획은 부하가 결정된 후에 시행되기 때문에, 지금까지는 DLC를 결정한 후에 기동정지계획을 시행하고 있어 이들을 연계하지 못하고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 보다 경제적인 운전을 할 수 있도록 하기 위하여 DLC와 기동정지계획을 연계할 수 있도록 하였으며, 이의 방법으로 정해진 부하에 대해 운전계획을 수립할 수 있는 종래의 기동정지계획법에서 더 나아가, DLC에 의해 조절되는 부하에 대응할 수 있는 기동정지계획을 수립할 수 있도록 한 것이다. 우선, 기동정지계획의 방법으로 동적계획법(Dynamic Programming)[4]

을 도입하였다. 종래의 동적계획법에 의한 기동정지계획은 발전가능출력별로 State를 정하고 가장 경제적으로 부하를 만족시키는 시간대별 State를 결정하는 것인 반면, 제안한 방법은 이 State를 DLC에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 DLC와의 연계를 가능토록 한 것이다.

II. DLC 와 기동정지계획

2.1 DLC

DLC의 목적은 DLC에 참여하는 수용가의 부하를 차단하여 피크부하를 줄이고, 연료비를 최소화 하는데 있다. 이와 같은 DLC를 효율적으로 하기 위하여는 제어대상 부하를 그룹별로 묶은 다음, 각 그룹의 부하를 순차적으로 차단하게 된다. 이의 방법으로, 각 그룹의 차단가능한 부하의 크기를 단위 부하라 할 수 있는 U_{DLC} 로 구성한 다

음, P' 개의 그룹을 차단시켜 t 시간대의 DLC를 시행하며, 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$DLC^t = P' * U_{DLC} \quad (1)$$

여기서,

DLC^t : t 시간대에서의 DLC량 [MW]

P' : DLC에 참여하는 수용가 그룹의 수 [개]
 $(0 \leq P' \leq P^{max}, 1 \leq t \leq T)$

U_{DLC} : 각 수용가 그룹의 차단부하의 크기 [MW]

이때 DLC에 참여한 부하는 부하차단에 의해 열악한 상태가 되기 때문에, 이와 같은 종류의 부하차단은 DLC 계획에서 정한 하나의 시간대동안 행해지게 되며, DLC 후 +1 시간대까지 60[%], +2 시간대까지 90[%], +3 시간대까지 100[%]를 보전(Payback)해 주어 수용가에 불편이 없도록 해야 한다. 이를 정식화하면 다음과 같으며, PB^{t+1} 은 부하제어 구간인 단계 이후 t 단계 이후 $(t+1)$ 단계에서의 순보상 수요를 의미하게 된다.

$$\begin{aligned} PB^{t+1} &= 0.6 * DLC^t \\ PB^{t+2} &= 0.3 * DLC^t \\ PB^{t+3} &= 0.1 * DLC^t \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

T : 고찰기간 ($t=1 \dots T$)

PB^t : t 시간대에서의 Payback [MW]

그러므로 이와 같은 DLC 및 Payback에 따라 실제 계통에 걸리는 부하는 다음과 같이 결정된다.

$$D^t = D_o^t - DLC^t + PB^{t-1} + PB^{t-2} + PB^{t-3} \quad (3)$$

여기서,

D_o^t : t 시간대에서의 부하 [MW]

D^t : DLC 및 Payback에 의해 실제 걸리는 부하 [MW]

2.2 기동정지계획

기동정지계획의 목적은 전체 화력발전기의 총 연료비를 최소화하는 것이라 할 수 있다. 따라서 계통 및 각 화력발전기의 제약조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화하도록 구성한다.

(1) 목적함수

화력발전기를 운전하는 데에는 발전을 위한 연료비 및 기동 또는 정지를 위한 기동정지비용을 더하여 다음과 같이 목적함수를 구성한다.

$$Min F = Min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (C_i^t U_i^t + S_i^t) \text{ [천원]} \quad (4)$$

여기서,

$$C_i^t = \alpha_i (P_i^t)^2 + \beta_i P_i^t + \gamma_i \text{ [천원]}$$

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: i 화력발전기의 연료비의 계수

P_i^t : t 시간대에서의 발전기 i 의 출력 [MW]

U_i^t : t 시간대에서의 발전기 i 의 상태 ($U_i^t=1$:운전, 0 :정지)

N : 기동정지대상 발전기 수 ($i=1 \dots N$)

S_i^t : t 시간대에서의 발전기 i 의 기동·정지비용 [천원]

(2) 제약조건

기동정지계획의 제약조건으로는 계통전체에 영향을 미치는 수급제약과 운전예비력제약을 들 수 있으며, 개개 화력발전기에만 영향을 미치는 제약이 있다.

① 수급제약조건

본 연구에는 DLC를 함에 따라, 계통의 원래부하에서 DLC를 하는 량 DLC^t 만큼 부하를 감축시키며, 전 시간대의 DLC에 의한 Payback $PB^{t-1}, PB^{t-2}, PB^{t-3}$ 만큼을 보전해 준 량을 만족시킬 수 있도록 각 발전기는 식(5)와 같이 출력을 내야한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N U_i^t P_i^t &= D^t \\ &= D_o^t - DLC^t + PB^{t-1} + PB^{t-2} + PB^{t-3} \end{aligned} \quad (5)$$

② 운전예비력 제약조건

수급제약조건과 마찬가지로, 운전예비력제약도 DLC와 관계가 되기 때문에, 식(6)과 같이 DLC와 Payback를 감안한 량을 만족시킬 수 있도록 운전예비력을 확보할 수 있도록 한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N U_i^t P_i^{Rt} &\geq D^t + R^t \\ &= D_o^t - DLC^t + PB^{t-1} + PB^{t-2} + PB^{t-3} + R^t \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$P_i^{Rt} = \text{Min}(P_i^{t-1} + \Delta P_{i,up}^{max}, P_i^{max}) \text{ [Mw]}$$

R^t : t 시간대에서의 운전예비력 [Mw]

③ 화력발전기의 제약조건

화력발전기의 제약조건으로는 출력 상하한제약, 최소운전·정지제약, 단위시간당 출력증감발율의 제약이 있다. 이와 같은 제약조건은 발전기 개개에만 영향을 미친다.

III. DLC를 고려한 기동정지계획

기동정지계획은 시간대별로 정해진 부하 및 운전예비율에 대해 시행하는 반면, DLC는 부하를 변화시키면서 결정하기 때문에, DLC와 연계된 기동정지계획을 구하기 위하여는 DLC의 특성을 따르는 부하를 감안하여야 한다. 따라서, 본 연구

에서는 DLC에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 기존의 동적계획법을 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 DLC와의 연계를 가능토록 하였다.

(1) 3차원 동적계획법

본 연구에서는 DLC에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 기존의 동적계획법을 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 기동정지계획과 DLC와의 연계를 가능토록 하였다. 여기서, DLC는 부하를 변화시키면서 결정하기 때문에, DLC와 연계된 기동정지계획을 구하기 위하여는 DLC 및 Payback의 특성을 따르는 부하를 감안하여야 한다. 동적계획법에 의한 기동정지계획이 발전가능출력별로 State를 정하고 가장 경제적으로 부하를 만족시키는 시간대별 State를 결정하는 것인 반면, 제안한 방법은 기동정지계획 State만 갖고 있는 기존 동적계획법을 DLC에 의해 변화하는 부하에 따른 State (이하 DLC State)를 확장하여 그림 1과 같이 3차원으로 구성하였다. 이들 DLC State는 DLC 및 Payback에 의해 계통에 실제로 걸리는 부하의 크기로 구성하였다.

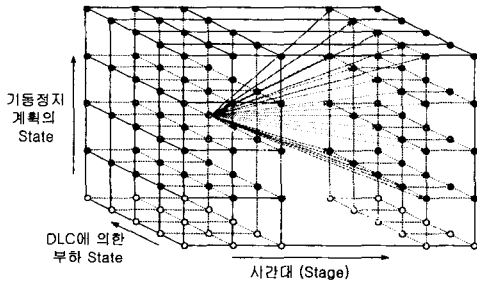


그림 1. 3차원 동적계획법

즉, 종래에는 시간대(Stage) - 기동정지 조합(기동정지계획State)의 2차원에 의한 동적계획법에 의해 그 해가 산출되어 부하가 결정된 상황에서만 문제 해결이 가능하였던 것을, DLC에 의한 부하 State라는 State를 추가하여 부하의 변화까지도 고려할 수 있도록 새로이 구성한 것이다.

(2) 3차원 동적계획법에 의한 DLC의 해법

DLC를 하기 위하여는 DLC와 Payback을 얼마로 하는가가 관건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 DLC와 Payback을 가능케하는 기동정지계획을 하기 위하여, DLC는 100[%]가 이루어지고, Payback은 60[%], 30[%], 10[%]로 이루어지는 문제를 해결하기 위하여 DLC State의 갯수를 다음과 같이 구성하였다.

$$DLC에\ 의한\ 부하\ State = P' * 10 \quad (7)$$

그림 1에서 식(7)과 같이 State를 구성하고 운전계획을 수립하면, DLC 계획과는 맞지 않는 운전

계획이 수립되게 되기 때문에, 이를 해결하기 위하여 다음과 같은 방법을 강구하였다.

① 종래의 기동정지계획에서는 제약조건을 위반하는 경로를 제거함으로써, 운전계획을 수립하였다. 그러나 DLC는 Payback이 순차적으로 이루어지는 특성상 이와 같은 방법으로 운전계획을 수립하기 힘들기 때문에 본 연구에서는 제약조건을 만족하는 경로로만 운전계획을 수립할 수 있도록 끌고 나가며, 나머지 경로는 모두 제거함으로써 이러한 문제를 해결하였다.

② 종래의 기동정지계획 수립시, 각 시간대에서 전 시간대의 상태 및 누적 총연료비만을 기억하여 DLC특성을 반영할 수 없었다. 이에, 본 연구에서는 3번째 전 시간대까지의 경로와 비용을 모두 기억하여 DLC의 운전특성을 감안할 수 있도록 하였다.

IV 사례연구

시험계통을 대상으로 RTS-24계통을 사용하였으며, 그림 2와 같은 부하중 일간분석은 화요일을, 주간분석은 전체를 사용하여 DLC와 기동정지계획의 연계특성을 분석하였다. 이때 운전예비력은 300[MW]로 하였다.

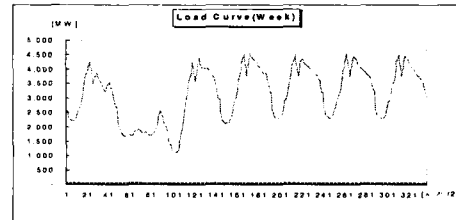


그림 2. 주간 부하

여기서 DLC 적용에 따른 효과를 산출함에 있어, 1개 그룹의 제어용량 U_{DLC} 는 100[MW]로 하였고, DLC에 참여하는 그룹의 수를 5로 정하였다. 또한, 부하제어는 제어시간을 침투부하를 억제하도록 매일 11시에서 16시까지로 하였다.

4.1 일간 분석

그림에서 DLC전 14:30 시간대는 4,524[MW]를 기록하였으나, DLC후 Peak가 이동하여 16:00 시간대에 4,428[MW]를 기록하여 다음 그림과 같이 약 2.12%의 피크 경감율을 보였다.

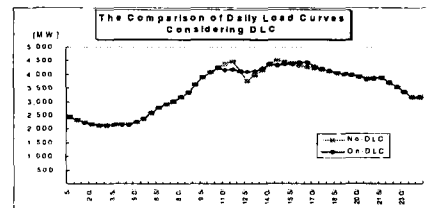


그림 3. DLC 전후의 부하곡선

DLC를 실시함으로써 그림에서 나타난 바와 같이 전체적으로 부하는 평균화된 부하양상으로 보이고 있어, 피크관리에 유리하다 할 수 있다. 기동정지계획을 비교해보면 다음과 같다.

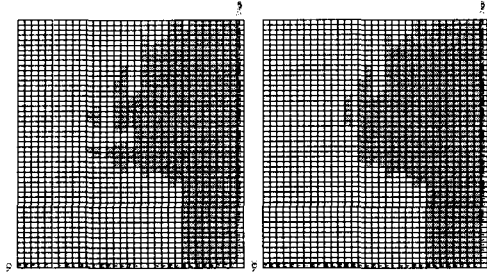


그림 4. DLC 전후의 기동정지계획의 변화

DLC를 실시함으로써 발전기의 기동/정지가 변하게 되므로 이의 특성을 살펴 보면,

- ① DLC가 이루어지기 이전에는 부하의 변동은 없으며, DLC가 시작함에 따라 부하가 변화하고 있음을 알 수 있다.
- ② 3, 9, 24번 발전기는 12~13시를 전후로 하여 잠시 가동을 중지하였다가 1~2시간 후에 재가동해야 되므로 기동비용이 발생하는 등 운전비용의 상승요인이 되는 발전기였으나, DLC 후 지속적으로 운전되어 발전기의 가동율이 상승하여 계통 운전비용의 저감요인으로 작용하고 있다.
- ③ 10, 27번 발전기의 경우 DLC 전에는 1~2시간의 간헐운전이 이루어지나, DLC를 실시하게 됨에 따라 가동이 정지되고 그 대신에 28번 발전기가 3시간 가동되어 양호한 운전특성을 보이고 있다.

이의 결과로, DLC전에는 1,328,815[천원] 만큼의 연료비에 비해 DLC 실시 후 연료비는 1,322,259[천원]의 연료비로 약 0.49% 경감된 것으로 나타났다. 즉, DLC를 실시함으로써 그림에서 나타난 바와 같이 전체적으로 부하는 평균화된 부하양상으로 보이고 있어 바람직한 부하곡선으로 판단된다.

4.2 주간 분석

주간단위로 부하제어를 실시한 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 DLC 전후의 피크부하 및 총연료비

요일	피크 부하 [MW]		총 연료비 [천원]	
	No DLC	DLC	No DLC	DLC
Sat	4,226	4,047	1,159,542.88	1,151,884.50
Sun	2,538	2,538	654,731.49	654,726.28
Mon	4,368	4,168	1,138,700.14	1,130,690.20
Tue	4,524	4,428	1,328,815.05	1,322,258.91
Wed	4,474	4,276	1,330,736.61	1,323,080.32
Thu	4,531	4,364	1,337,455.74	1,328,669.69
Fri	4,513	4,364	1,318,135.02	1,310,116.72
합계			8,268,116.93	8,221,426.62

주간 운용에서도 전 요일에 걸쳐 피크부하가 줄어들고, 총연료비가 감소하는 효과가 나타나고 있다. 이에 따라 피크부하가 약 2.27[%] 감소하고 있으며, 이는 총 발전출력의 2.27[%]에 해당되는 운전예비율을 늘리거나, 발전설비를 신규로 건설하지 않을 수 있어 매우 바람직한 운전이 되고 있다 할 수 있다. 특히, 12-13시의 부하가 급속히 감소하는 증상이 상당히 줄어들어, 계통을 운전하기가 용이하다 할 수 있다. 또한 총연료비도 약 0.56[%] 절약되고 있어 경제적인 운전이 되고 있음을 알 수 있다. 여기서, 발전소의 연료비는 대단히 크를 감안할 때 이와 같은 연료비의 저감은 피크부하의 감소와 함께 매우 바람직하다 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 DLC와 기동정지계획을 연계할 시도함으로써, 종래의 예비력확보라는 개념의 DLC에서 더 나아가 안정적인 운전과 함께 경제적인 운전이 가능하도록 하였다. 이의 방법으로 3차원 기동정지계획기법을 개발하고, 이 기법 중 DLC의 운전특성을 반영하여 동적계획법의 경로를 설정할 수 있도록 함으로써, 종래의 부하결정후 기동정지계획을 하는 방법을 탈피하여, DLC와 연계된 기동정지계획을 수립할 수 있도록 하였다. 이와 같이 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 피크부하를 저감시키는 물론 경제적인 운전이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] C.O.B.A., "The Direct Load Control Industry Report", 1993-1994
- [2] 한국전력공사, "최대부하 직접부하제어방식 실용화를 위한 연구", 1990.12
- [3] 전력연구원, "첨두부하억제를 위한 원격부하 제어시스템 개발 및 적용에 관한 연구", 1996.12
- [4] A.J.Wood, B.F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, 1984
- [5] Yuan-Yih Hsu, "Dispatch of Direct Load Control using Dynamic Programming", 1991
- [6] North American Electric Reliability Council, 2000 Summer Assesment
- [7] 한국전력공사, "중장기 부문별 전력수요관리 방안 연구"
- [8] 한국전력공사, "대형건물 냉방부하 직접제어 실증연구", 2000.10
- [9] 한국전력공사, "전력경제론", 1995