

기동정지계획을 고려한 직접부하제어에 관한 연구

이 범* · 김용하** · 김형중** · 문학기** · 정현성** · 이영길** · 최상규***
 아수대 전기공학과* · 인천대 전기공학과** · 안양고려대 전기제어과***

Research of Direct Load Control Considering Unit Commitment

Lee, Buhm*, Kim, Y.H.**, Kim, H.J.**, Moon, H.K.**, Jung, H.S.**, Lee, Y.K.**, Choi, S.K.***
 Yosu National University*, Incheon University**, Anyang Technical College***

Abstract - This paper describes the optimizing method of direct load control (DLC) considering unit commitment which is based on dynamic programming. 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.

2. 직접부하제어

직접부하제어의 목적은 DLC에 참여하는 수용가의 냉방부하를 순차적으로 차단함으로써, 피크부하 및 연료비를 최소화하는데 있다. 우선, 전체 DLC 대상 수용가를 각각의 차단부하가 U_{DLC} 인 P 개로 나눈다. 이로써, t 시간대의 DLC량은 다음과 같이 계산된다.

$$DLC^t = P * U_{DLC} \quad (1)$$

DLC에 참여한 부하는 이 기간중 냉방부하가 차단됨에 따라, 냉방상태가 열악해지게 된다. 따라서, 이와 같은 부하차단은 DLC계획에서 정한 하나의 시간대동안 행해지게 되며, DLC 후 +1 시간대까지 60(%), +2 시간대까지 90(%), +3 시간대까지 100(%)를 보전(Payback)해 주어 수용가에 불편이 없도록 해야한다.

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

여기서,

- DLC^t : t 시간대에서의 DLC량 (MW)
- P : DLC에 참여하는 수용가 그룹의 수 (개)
- U_{DLC} : 각 수용가 그룹의 차단부하의 크기 (MW)
- T : 고찰기간 ($t=1 \sim T$)
- PB^t : t 시간대에서의 Payback (MW)

이와 같은 DLC 및 Payback에 따라 실제 계통에 걸리는 부하는 다음과 같이 나타내게 된다.

$$D^t = D_0^t - DLC^t + PB^{t-1} + PB^{t-2} + PB^{t-3} \quad (3)$$

여기서,

- D_0^t : t 시간대에서의 부하 (MW)
- D^t : DLC 및 Payback에 의해 실제로 걸리는 부하 (MW)

3. 기동정지계획을 고려한 직접부하제어

3.1 기동정지계획

기동정지계획은 다음과 같이 제약조건을 만족시키면서 목적함수인 총연료비를 최소화하도록 구성하였다.

(1) 목적함수

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

1. 서 론

우리나라는 산업의 발달과 함께 전력 소비가 증가하고 있으며, 특히 하계 냉방부하 등의 급증으로 피크부하와 기저부하의 차이가 두드러지는 특성을 나타내고 있다. 그러나, 전력은 저장할 수 없으므로, 항상 부하를 충분히 만족시킬 수 있는 용량의 발전설비를 확보하여야 한다. 최근, 부하를 직접 제어하여 피크부하를 줄임으로써 작은 규모의 발전설비로도 부하를 만족시킬 수 있는 직접부하제어(Direct Load Control; 이하 DLC)[1]기법이 개발되어, 이를 대체할 수 있게 되었다.

직접부하제어는 이미 미국과 같은 선진국에서는 1970년도에 검토 및 시행이 시작되어 1992년도에 4578(MW)의 DLC를 시행하는 등 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 경우에는 1990년 한국전력공사에서 필요성이 제기[2]된 이래, 1996년에는 무선통신방식에 의한 실증[3]실험이 실시되었고, 현재 최대부하억제를 위해 사용되고 있으며, 앞으로 보다 확대될 것으로 예상된다.

지금까지의 DLC는 전체부하를 분산하는 개념으로 예비율을 확보하기 위하여 시행하고 있다. 그러나, 전력계통은 안정적인 운용 외에도 경제적인 운용도 필요로 하기 때문에, 기동정지계획 등 ELD를 포함하여 DLC의 계획을 수립하여야만 안정적이면서도 보다 경제적인 운전계획을 얻을 수 있다. 그러나, 부하가 결정된 후에 ELD를 시행하여야 하는 특성상, 지금까지는 DLC를 결정 한 후에 기동정지계획을 시행하고 있어 이들을 연계하지 못하고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 보다 경제적인 운전을 할 수 있도록 하기 위하여 DLC와 기동정지계획을 연계할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로 정해진 부하에 대해 운전계획을 수립할 수 있는 종래의 기동정지계획법에서 더 나아가, DLC에 의해 조절되는 부하에 대응할 수 있는 기동정지계획을 수립할 수 있도록 하였다. 우선, 기동정지계획의 방법으로 동적계획법(Dynamic Programming)을 도입하였는데, 종래의 DP에 의한 기동정지계획이 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.

제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 연구의 유용성을 검증하였다.

여기서,

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

a_i, β_i, γ_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 ($i=1 \cdots N$)

S_i^t : t 시간대에서의 발전기 i 의 기동 또는 정지비용 [천원]

(2) 제약조건

① 수급제약조건

$$\sum_{i=1}^N U_i^t P_i^t = D^t \quad (5)$$

$$= D_0^t - DLC^t + PB^{t-1} + PB^{t-2} + PB^{t-3}$$

② 운전예비력 제약조건

$$\sum_{i=1}^N U_i^t P_i^{Rt} \geq D^t + R^t \quad (6)$$

③ 출력 상하한치

$$P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

④ 최소 운전 및 정지시간

$$T_{i \text{ up}} \geq T_{i \text{ up}}^{\min}, T_{i \text{ dn}} \geq T_{i \text{ dn}}^{\min} \quad (8)$$

⑤ 단위시간당 출력 증감발을

$$P_i^{t-1} - \Delta P_{i \text{ dn}}^{\max} \leq P_i^t \leq P_i^{t-1} + \Delta P_{i \text{ up}}^{\max} \quad (9)$$

여기서,

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

R^t : t 시간대에서의 운전예비력 [MW]

$\Delta P_{i \text{ up}}^{\max}$: i 발전기의 단위시간당 발전출력 증발을 [MW/h]

P_i^{\max} : i 발전기의 최대출력 [MW]

$T_{i \text{ *}}$: i 발전기의 운전 또는 정지시간 [h]

$T_{i \text{ *}}^{\min}$: i 발전기의 최소운전 또는 정지시간 [h]

$\Delta P_{i \text{ dn}}^{\max}$: i 발전기의 단위시간당 발전출력 감발을 [MW/h]

(3) 기동정지계획 문제의 해법

수급 및 운전예비력 제약조건에서 사용되는 각 시간대별 부하 및 운전예비력을 만족하고, 각 발전기의 개별 제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 운전계획을 수립한다. 이의 해법으로는 동적계획법과 L.R.법을 대표로 들 수 있는데, 본 연구에서는 동적계획법을 사용하였다. 동적계획법에 의한 기동정지계획(4)은 전체 발전기의 다양한 조합으로 여러개의 State를 시간대별로 구성한 다음, 제약조건을 만족하면서 총 연료비를 최소화하는 발전기의 조합을 시간대별로 구하는 방법이다.

3.2 기동정지계획을 고려한 직접부하제어

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

따라서, 본 연구에서는 DLC에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 기존의 동적계획법을 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 DLC와의 연계를 가능토록 하였다.

(1) 3차원 기동정지계획기법

제안된 방법은 기동정지계획 State만 갖고 있는 기존 동적계획법을 DLC에 의해 변화하는 부하에 따라 새로운 State (이

하 DLC State)를 확장하여 3차원으로 구성하였다. 이들 DLC State는 DLC 및 Payback에 의해 계통에 실제로 걸리는 부하의 크기로 구성하였다.

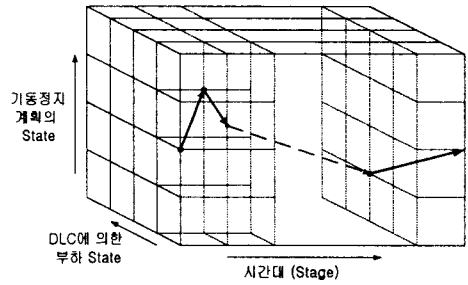


그림 1. 동적계획법을 사용한 제안된 기동정지계획

와 같은 3차원 동적계획법을 구성함에 따라, 부하를 변화시키면서 최적화된 기동정지계획을 얻을 수 있게 되었다.

(2) 기동정지계획을 고려한 직접부하제어

직접부하제어를 하기 위해서는 DLC와 Payback을 얼마로 하는가가 관건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 식(1)에서와 같이 DLC가 이루어지고, 이와 같이 시행된 DLC는 식(2)와 같이 Payback되는 것으로 구성하였다.

이와 같은 DLC와 Payback을 가능케하는 기동정지계획을 하기 위해서는 이에 적합한 DLC State를 구성하여야 한다. 본 연구에서는 이들 DLC는 100[%]가 이루어지고, Payback은 60[%], 30[%], 10[%]로 이루어지는 문제를 해결하기 위하여 DLC State의 갯수를 식(10)과 같이 구성하였다. 또한, DLC에 의해 차단된 부하는 100[%] Payback에 의해 보전되므로, 시간대별 전체 부하의 합은 DLC의 여부와 관계없이 식(11)과 같이 일정하도록 하였다.

$$DLC \text{에 의한 부하 State} = P * 10 \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T D^t = \sum_{t=1}^T D_0^t \quad (11)$$

이와 같은 DLC에 의한 부하 State를 가변시키면서 기동정지계획을 수행하면, 피크부하가 줄어드는 운전계획을 얻을 수 있으나, DLC와 Payback의 특성을 잘 살리지 못한다.

따라서, 본 연구에서는 이들 State중 DLC가 이루어지는 부분 및 Payback이 이루어지는 부분만을 수행 가능한 경로로 제한하여 그림 2와 같이 DLC를 결정할 수 있도록 하였다. 여기서 그림 2는 $P=1$ 인 경우에 대해 경로를 설명한 것이다. 또한, Payback이 이루어지는 중에도 새로운 DLC가 이루어질 수 있다. 따라서, 전 State에 대한 정보만을 저장되는 데에서 더 나아가, 본 연구에서는 3시간대전까지의 정보를 저장하여 이러한 문제를 해결하였다.

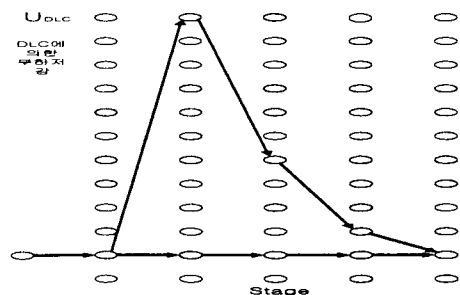


그림 2. DLC State의 경로

4. 사례연구

4.1 대상계통

본 연구에서는 표1과 같은 계통 및 그림 3와 같은 부하를 대상으로 기동정지계획을 고려한 DLC를 구하였으며, U_{DLC} 는 200(MW), $P=5$ 로 계산하였다. 여기서, 부하는 1주일을 대상으로 하였으며, 금요일 24시 - 금요일 24시로 하였다.

또한, 일반적으로 기동정지계획의 시간대는 1시간으로 하나, DLC의 특성을 감안하여 각 시간대를 30분으로 하였다.

표. 1 대상계통

Unit Num	발전기의 연료비			P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	기동 비용	항시 기동
	A	B	C				
1	0.4546	33.5132	13.6986	3.50	35.0	350.	0
2	0.4546	33.5132	13.6986	3.50	35.0	350.	0
3	0.0523	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
4	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
5	0.0375	17.9156	86.7580	4.50	50.0	500.	0
6	0.0375	17.9156	86.7580	4.50	45.0	450.	0
7	0.0144	25.5631	112.4429	14.00	140.0	1400.	0
8	0.0144	25.5631	112.4429	14.00	140.0	1400.	0
9	0.0523	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
10	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
11	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
12	0.0026	12.9551	179.7945	3.00	600.0	6000.	1
13	0.0026	12.9551	179.7945	3.50	700.0	7000.	1
14	0.0026	12.9551	179.7945	2.50	500.0	5000.	1
15	0.3750	55.9998	0.6849	1.50	15.0	150.	0
16	0.3750	55.9998	0.6849	1.50	15.0	150.	0
17	0.3750	55.9998	0.6849	1.50	15.0	150.	0
18	0.3750	55.9998	0.6849	1.50	15.0	150.	0
19	0.3750	55.9998	0.6849	1.50	15.0	150.	0
20	0.0126	14.2923	123.8585	20.00	200.0	2000.	0
21	0.0126	14.2923	123.8585	20.00	200.0	2000.	0
22	0.0026	12.9551	179.7945	40.00	400.0	4000.	0
23	0.0026	12.9551	179.7945	40.00	400.0	4000.	0
24	0.0523	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
25	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
26	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
27	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
28	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
29	0.0524	28.7204	97.0320	10.00	100.0	1000.	0
30	0.0126	14.2923	123.8585	20.00	200.0	2000.	0
31	0.0126	14.2923	123.8585	20.00	200.0	2000.	0
32	0.0026	12.9551	179.7945	40.00	400.0	4000.	0

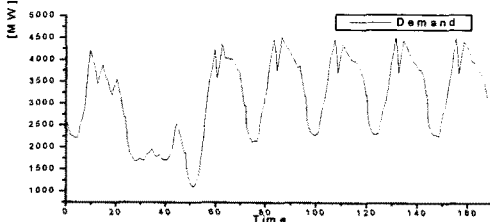


그림. 3 계통의 부하

4.2 계산 결과

대상계통에 대해 DLC를 계산한 결과중 총발전출력의 변화를 그림 4에, 이로 인한 최대수요의 크기 및 총연료비의 변화를 표 2에 나타내었다.

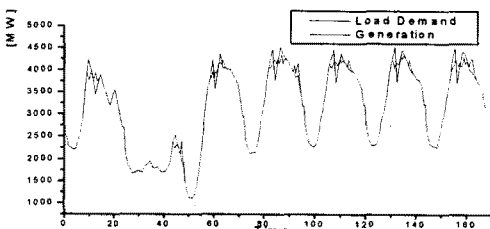


그림. 4 DLC로 인한 총발전출력의 변화

표. 2 DLC에 의해 변화하는 최대수요 및 총연료비

일차	피크 부하		총 연료비	
	No DLC	DLC	No DLC	DLC
1	4226.	3937.	1159720	1151317
2	2538.	2396.	654732	654657
3	4368.	4232.	1138700	1131910
4	4524.	4352.	1328815	1318802
5	4474.	4250.	1330737	1321737
6	4531.	4338.	1337456	1328492
7	4513.	4304.	1318135	1308161
합계			8,268,295	8,215,076

그림 3의 부하는 피크부하가 상당히 크게 나타나고 있으며, 12-13시에는 점심시간 등의 영향으로 부하가 급속히 감소하는 특성을 나타내고 있다. 그림 4와 같이 DLC를 시행함에 따라 피크부하가 감소하고 있음을 알 수 있으며, 특히 12-13시에는 Payback에 의해 부하가 오히려 커지고 있어 운전예유리한 특성을 나타내고 있다.

그림 4에서 DLC가 이루어지기 이전에는 부하의 변동은 없으며($D'_0 = D^0$), DLC가 시작함에 따라 부하 D'_0 는 DLC량만큼 감소한 D' 로 변화하며, Payback이 시작하면서 DLC량과 Payback량인 PB' 를 감안한 D' 로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 DLC는 냉방부하를 차단하고, 이 부분을 Payback하기 때문에, 차단시간대 이전부터 부하를 늘리거나 하지는 못하기 때문이다. 이에 따라 표 2와 같이 피크부하가 약 4.0[%] 감소하고 있으며, 이는 총 발전출력의 4[%]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 0.65[%] 절약되고 있어 경제적인 운전이 되고 있음을 알 수 있다. 여기서, 발전소의 연료비는 대단히 큼을 감안할 때 이와 같은 연료비의 저감은 피크부하의 감소와 함께 매우 바람직하다 할 수 있다.

5. 결론

본 연구의 중요한 결론은 다음과 같다.

1. 종래의 예비력확보라는 개념의 DLC에서 더 나아가 기동정지계획과의 연계를 시도함으로써, 안정적인 운전과 함께 경제적인 운전이 가능하도록 하였다.
2. 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.
3. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 기동정지계획을 감안한 DLC를 시행하였을 때, 피크부하를 저감시키는 물론, 경제적인 운전이 가능함을 알 수 있었다.

(참고 문헌)

- (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 원격부하제어시스템 개발 및 적용에 관한 연구", 1996.12
- (4) A.J.Wood, B.F.Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, 1984