

Energy Payback을 고려한 직접부하제어의 경제성 분석

김형중* · 김인수* · 김용하** · 이범*** · 최상규**** · 문정호** · 이형노**

에너지관리공단* · 인천대학교 전기공학과** · 여수대학교 전기공학과*** · 안양과학기술대학교 전기전자통신공학부****

A Study on Economic Analyse for Direct Load Control considering Energy Payback

Kim, H.J.* · Kim, I.S.* · Kim, Y.H.** · LEE, Buhm*** · Choi, S.K.**** · Moon, J.H.** · Lee, H.N.**

KEMCO(Korea Management Corporation)* Incheon University** ·

Yosu National 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 solve DLC problem considering unit commitment, 3-dimensional dynamic programming as a new unit commitment method is developed. And, energy payback is concerned for 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.

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

DLC에 참여한 부하는 이 기간 중 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 보상 (Payback)해 주어 수용가에 불편이 없도록 해야한다.

1. 서 론

최근 하절기 냉방부하의 증가로 인해 전력사용량이 크게 증가되어 전원설비의 확충은 물론 안정적인 전력공급이 요구되고 있다. 이에 어느 때보다도 효율적이고 탄력적인 수요관리방안이 요구되고 있어, 본 연구에서는 직접부하제어를 전력계통에 적용에 따른 신뢰성과 경제성을 검토하고자 한다.

지금까지의 직접부하제어는 전체부하를 분산하는 개념으로 예비율을 확보하기 위하여 시행하고 있다. 그러나, 전력계통은 안정적인 운용 외에도 경제적인 운용도 필요로 하기 때문에, 기동정지계획 등 경제부하배분을 포함하여 직접부하제어의 계획을 수립하여야 안정적이면서도 보다 경제적인 운전계획을 얻을 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 보다 경제적인 운전을 할 수 있도록 직접부하제어와 기동정지계획을 연계하였으며, 이의 방법으로 직접부하제어에 의해 조절되는 부하에 대응할 수 있는 기동정지계획을 수립할 수 있도록 한 것이다. 우선, 기동정지계획의 방법으로 동적계획법을 도입하였다. 종래의 동적계획법에 의한 기동정지계획은 발전가중출력별 State를 정하고 가장 경제적으로 부하를 만족시키는 시간대별 State를 결정하는 것인 반면, 제안한 방법은 이 State를 직접부하제어에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 직접부하제어와의 연계가 가능토록 한 것이다.

따라서 본 연구에서는 IEEE rts-24 계통의 주간별 가중치를 고려한 부하에 대해 직접부하제어를 실시하여 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.

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.

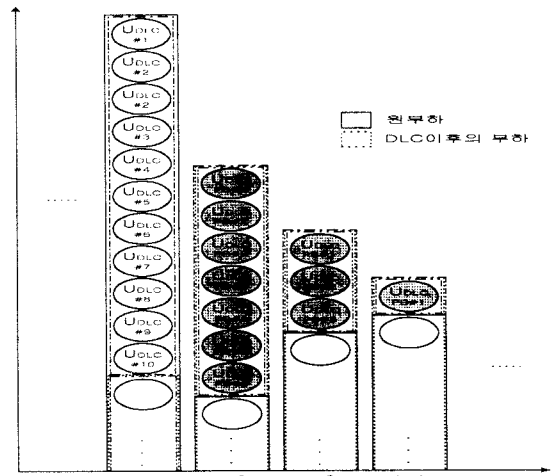


그림 1. 에너지보상(Energy Payback)의 개념도

$$\begin{aligned} PB^{t+1} &= 0.6 * DLC' \\ PB^{t+2} &= 0.3 * DLC' \\ PB^{t+3} &= 0.1 * DLC' \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

- DLC' : t시간대에서의 DLC량 [MW]
- P : DLC에 참여하는 수용가 그룹의 수 [개]
- U_{DLC} : 각 수용가 그룹의 차단부하의 크기 [MW]
- T : 교차기간 ($t=1 \cdot T$)
- PB' : t시간대에서의 Payback [MW]

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

$$D' = D'_0 - DLC' + PB'^{-1} + PB'^{-2} + PB'^{-3} \quad (3)$$

여기서,

- D'_0 : t시간대에서의 부하 [MW]
- D' : DLC 및 Payback에 의해 실제로 걸리는 부하 [MW]

3. 기동정지계획을 고려한 직접부하제어

3.1 개요

직접부하제어를 실시함에 따라 계통의 부하는 억제 및 타시간대로 이전하게 되므로 원시부하에 대한 영향도를 설명할 수 있는 에너지보상(Energy Payback)을 고려해야 한다. 따라서 에너지보상에 의해 변환된 부하자료는 다시금 기동정지계획에 함께 고려되어 운전되어 질 수 있도록 구성하였다.

지금까지의 직접부하제어는 피크부하를 기타 시간대로 분산하여 예비율을 충분히 확보하기 위한 방안으로 시행하고 있으며, 이의 방법으로 피크부하에서 적절한 용량의 직접부하제어를 시행하고, 이에 따른 에너지보상을 시행하여 최대한 많은 예비율을 확보하도록 운전계획을 수립한다. 이의 결과로 예비율의 확보뿐만 아니라 보다 경제적인 운전도 수립되게 된다.

따라서 본 연구에서는 직접부하제어의 계획을 수립함에 있어 보다 경제적인 운전을 할 수 있도록 하기 위하여 직접부하제어와 기동정지계획 및 경제부하배분을 연계할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로 정해진 부하에 대해 운전계획을 수립할 수 있는 종래의 기동정지계획법에서 더 나아가, 부하의 변화에 대응할 수 있는 3차원 기동정지계획을 개발하였으며, 이를 직접부하제어와 연계할 수 있도록 함으로써 충분한 예비율을 확보하면서도 경제적인 측면까지도 감안할 수 있는 운전계획을 수립할 수 있도록 하였다.

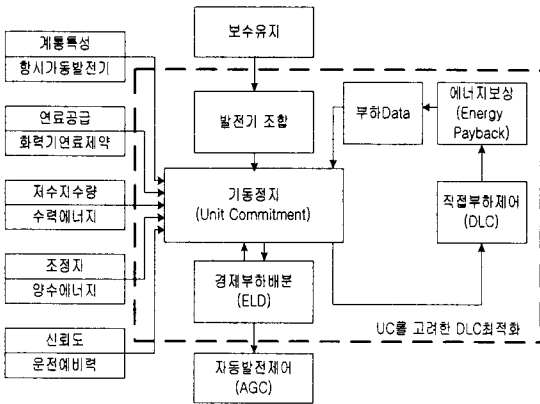


그림2. 기동정지계획을 고려한 직접부하제어의 구성도

3.2 정식화

기동정지계획은 다음과 같이 제약조건을 만족시키면서 목적함수인 총연료비를 최소화하도록 구성하였다.

3.2.1 목적함수

$$\text{Min } F = \text{Min} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N (C_i^j U_i^j + S_j^i) \quad (\text{천원}) \quad (4)$$

여기서,

$$C_i^j = \alpha_i (P_i^j)^2 + \beta_i P_i^j + \gamma_i \quad (\text{천원})$$

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

P_i^j : t 시간대에서의 발전기 i 의 출력 [MW]

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

N : 기동정지대상 발전기 수 ($i=1 \cdots N$)

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

3.2.2 제약조건

① 수급제약조건

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

$$= D_o^t - \text{DLC}^t + \text{PB}^{t-1} + \text{PB}^{t-2} + \text{PB}^{t-3}$$

② 운전예비력 제약조건

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

③ 출력 상하한치

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

④ 최소 운전 및 정지시간

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

⑤ 단위시간당 출력 증감발율

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

여기서,

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

R^t : t 시간대에서의 운전예비력 [MW]

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

P_i^{max} : i 발전기의 최대출력 [MW]

T_{i*} : i 발전기의 운전 또는 정지시간 [h]

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

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

3.3 3차원 동적계획법을 활용한 문제의 해법

본 연구에서는 직접부하제어에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 기존의 동적계획법을 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 기동정지계획과 직접부하제어와의 연계를 가능토록 하였다. 여기서, 직접부하제어와 연계된 기동정지계획을 구하기 위해서는 직접부하제어 및 에너지보상의 특성을 따르는 부하를 감안하여야 한다. 동적계획법에 의한 기동정지계획이 발전가능출력 별로 $state$ 를 정하고 가장 경제적으로 부하를 만족시키는 시간대별 $state$ 를 결정하는 것인 반면, 제한한 방법은 이 $state$ 를 직접부하제어에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 직접부하제어와의 연계를 가능토록 한 것이다. 제안된 방법은 기동정지계획 $state$ 만 갖고 있는 기존 동적계획법을 직접부하제어에 의해 변화하는 부하에 따른 $state$ (이하 $\text{DLC } state$)를 확장하여 그림3.와 같이 3차원으로 구성하였다. 이들 $\text{DLC } state$ 는 직접부하제어 및 에너지보상에 의해 계통에 실제로 걸리는 부하의 크기로 구성하였다.

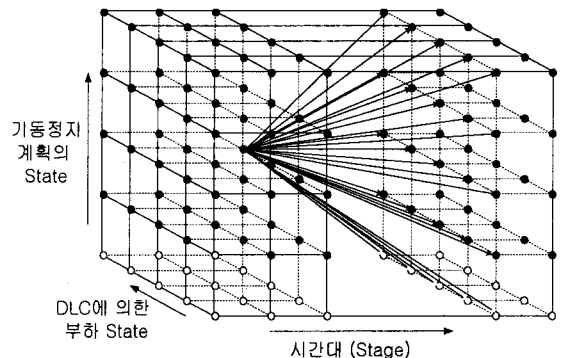


그림3. 3차원 동적계획법

4. 사례연구

4.1 계통자료

4.1.1 직접부하제어 자료

직접부하제어 적용에 따른 효과를 산출하기 위해 직접부하제어의 1개 그룹의 제어용량 U_{DLC} 는 20(MW)로 하였고, 직접부하제어에 참여하는 그룹수로는 $P=5$ 로 하여 총 부하제어 용량은 100(MW)로 정하였다. 여기에서, 부하제어는 토요일과 일요일을 제외한 평일을 대상으로 시행하는 것을 원칙으로 하여 월요일 0시 ~ 금요일 24시로 하였다. 또한, 일반적으로 기동정지계획의 시간대는 1시간으로 하나, 직접부하제어의 특성상 매 30분 간격으로 에너지보상을 고려하여야 하므로 각 시간대를 30분으로 세분화하여 계산하였다. 또한 부하제어는 제어시간을 매일 11시부터 16시까지 시행되도록 하여 침투부하 억제에 가능하도록 설정하였으며, 예비력은 300(MW)로 하였다.

4.1.2 부하곡선

다음의 부하곡선은 일주일간(토요일 0시 ~ 금요일 24시)의 부하를 나타낸 것이다.

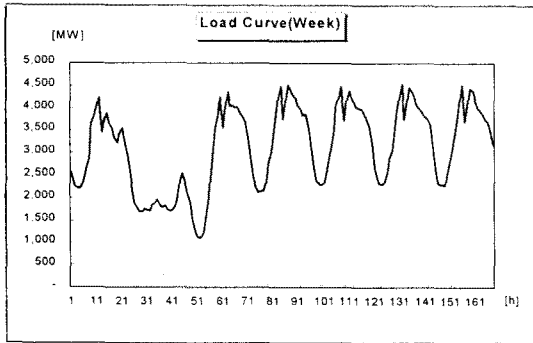


그림4. 시험계통의 부하곡선

또한 연간 부하곡선을 산출하기 위해 IEEE rts-24계통의 가중치를 고려하여 제1주에서 제52주까지의 부하값을 도출하였다.

4.2 특성분석

특성분석은 직접부하제어를 실시함에 따라 피크저감, 연료비 및 발전기 가동상태를 일간으로 제시하고, 특정일의 에너지보상에 대한 부하값을 보였으며, 직접부하제어용량별로 피크저감 기여도를 알아 보고, 마지막으로 부하지속곡선을 검토하고자 한다.

4.2.1 Load Curves

직접부하제어 전에는 4,531(MW)에서 직접부하제어 후 4,431(MW)로 약 2.2%의 피크저감율을 보였다.

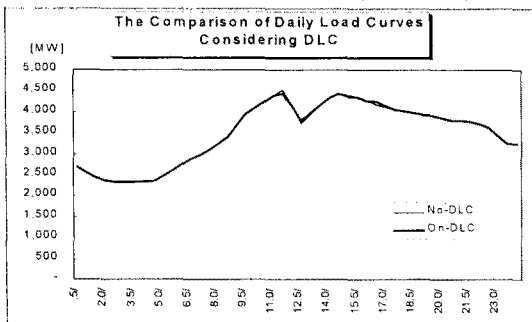


그림5. 직접부하제어를 고려한 일간 부하곡선 비교

4.2.2 연료비

직접부하제어 전에는 1,337,456(천원)에서 직접부하제어 후 1,334,885(천원)로 약 0.19%가 저감되었다.

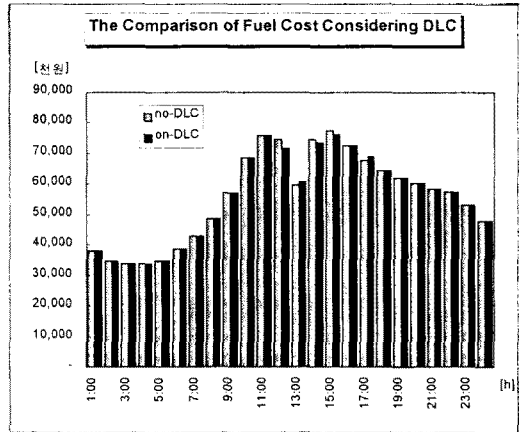


그림6. 직접부하제어를 고려한 연료비용 비교

4.2.3 기동정지계획

직접부하제어를 실시함에 따라 계통의 발전기는 운전상태가 변화하여 발전기는 연료비 감소를 도모하는 상태로 운전됨을 볼 수 있다.

발전기 중 26, 29번 발전기는 직접부하제어 전에 가동되었으나, 그 후에 가동이 중지되었고, 이와 반면 10번 발전기는 직접부하제어 후에 가동됨을 알 수 있다. 또한 직접부하제어가 진행됨에 따라 9, 27번의 발전기는 지속적인 가동이 이루어졌다.

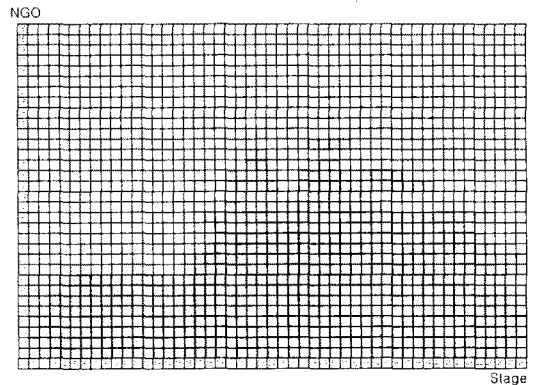


그림7. 직접부하제어 전의 발전기 운전 상태

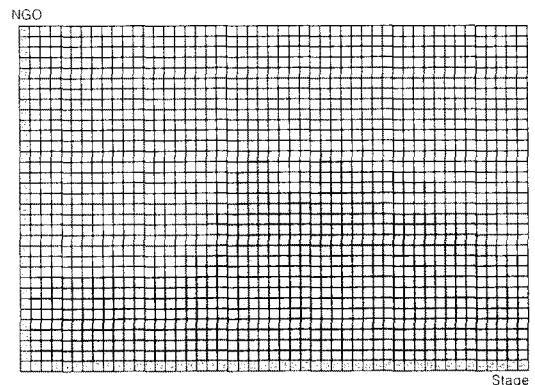


그림8. 직접부하제어 후의 발전기 운전 상태

4.2.4 DLC시간대의 부하

부하제어는 오전 11시에서 오후 4시까지 시행하여 시간대별 부하데이터, 직접부하제어 용량 및 에너지보상 용량은 다음과 같이 나타났다.

표 1. 에너지보상을 고려한 부하자료

시간 (h)	DLC전 부하	DLC	PB1	PB2	PB3	DLC후 부하
11.0	4,390	-	-	-	-	-
11.5	4,531	100	-	-	-	4,431
12.0	4,132	60	60	-	-	4,132
12.5	3,732	0	36	30	-	3,798
13.0	3,953	0	0	18	10	3,981
13.5	4,173	20	0	0	6	4,159
14.0	4,314	0	12	0	0	4,326
14.5	4,455	40	0	6	0	4,421
15.0	4,407	60	24	0	2	4,373
15.5	4,358	60	36	12	0	4,346
16.0	4,274	60	36	18	4	4,272
16.5	4,190	0	36	18	6	4,250
17.0	4,124	0	0	18	6	4,148
17.5	4,057	0	0	0	6	4,063
18.0	4,014	-	-	-	-	4,014

4.2.5 직접부하제어용량별 부하곡선 비교

직접부하제어의 용량에 따라 피크저감에 대한 영향도를 살펴본다. 여기에서 원시부하에 대해 직접부하제어용량이 500MW, 250MW, 100MW일 경우 피크 절감율은 각각 3.69%, 3.73%, 2.21%로 나타나 부하제어 용량과 피크절감율의 관계는 비례관계가 성립하지 않는 것으로 나타났다.

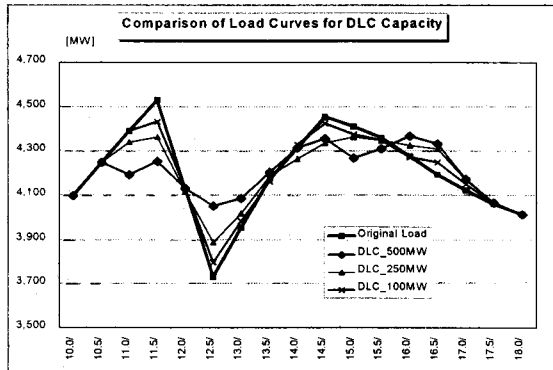


그림9. 직접부하제어 용량에 따른 부하곡선 비교

4.2.6 부하지속곡선

직접부하제어 시행 전·후의 1년간의 부하지속곡선을 살펴 본 결과는 직접부하제어를 실시하여 첨두부하가 다소 줄어드는 것으로 나타났다.

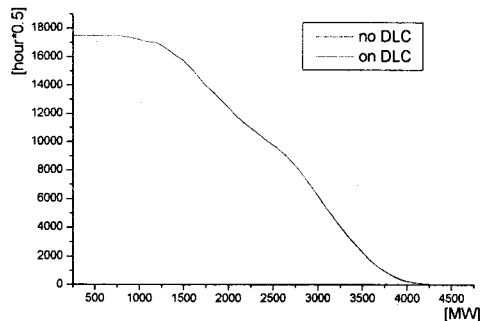


그림10. 직접부하제어를 고려한 부하지속곡선

5. 결론

본 연구에서는 전력수요관리의 일환으로 직접부하제어의 필요성이 그 어느 때보다 절실히 요구되어 향후 직접부하제어가 도입되어 전력계통에 적용될 경우 효율적인 운영을 기하기 위한 알고리즘을 제안하였다.

- 아울러 본 논문의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.
- (1) 본 연구에서는 기동정지계획의 방법으로 동적계획법을 사용하였으며, DLC에 의해 변화하는 부하에 대응할 수 있도록 기존의 동적계획법을 확장하여 3차원 동적계획법으로 구성함으로써 기동정지계획과 직접부하제어와의 연계를 가능토록 하였다.
 - (2) 종래는 Stage-State 2차원에 의한 동적계획법에 의해 그 해가 산출되었으며, 아울러 부하가 고정적일 때만 계산이 가능한 단점을 가지고 있었으나 이를 해결하였다.
 - (3) 일주일 부하데이터에 rts-24 계통의 주간별 가중치를 고려하여 연간부하를 만들어 일년간 직접부하제어를 실시하여 직접부하제어 전후의 부하곡선을 비교 분석하여 계통 부하를 향상을 검토하였다.
 - (4) 직접부하제어에 따른 기동정지계획에 의한 발전기 운전 상태를 분석하였고, 계통 운전비용을 비교하였다.
 - (5) 직접부하제어 전·후의 부하지속곡선을 비교하여 직접부하제어에 따른 전력계통 기여도를 검토하여 본 시뮬레이션의 우수성을 보였다.

따라서 본 연구를 기반으로 하여 향후 추진 중인 직접부하제어에 운영에 효율적인 방법론을 제안하였으며, 전력계통 발전계획 수립시 이 방안을 적극 수용하여 운영한다면 전력계통 운전비용 저감을 비롯한 계통 부하를 향상에 기여할 것으로 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 전력연구원, 첨두부하억제를 위한 원격부하제어 시스템 개발 및 적용에 관한 연구, 1996. 12
- [2] 한국전력공사, 최대부하 직접제어방식 실용화를 위한 연구, 1990. 12
- [3] 한국전력공사, "대형건물 냉방부하 직접제어 실증연구" 2000. 10
- [4] The Direct Load Control Industry Report, 1993~94, C.O.B.A
- [5] 김형중, 김인수, 박규현, 차양환, "TCP/Ethernet방식을 이용한 DLC(Direct Load Control)의 구성 및 부하제어기법(I)", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제A권, PP.570-572, 2000. 7
- [6] 이범, 김용하, 김형중, 문혁기, 정현성, 이영길, 최상규, "기동정지계획을 고려한 직접부하제어에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, PP.220-222, 2001. 5
- [7] Yuan-Yih Hsu, "Dispatch of Direct Load Control using dynamic programming", 1991
- [8] 한국전력공사, 전력경제론, 권4 전력수요관리, 1995
- [9] 한국전력공사, "중장기부문별 전력수요관리 방안 연구"
- [10] 대한전기학회 기술조사보고 제10호, 전력수요관리
- [11] Allen J. Wood, "Power Generation, Operation and Control" 1995
- [12] 이범, "대규모계통에서의 기동정지계획에 관한 연구", 박사학위논문, 1994. 12