

---

# 계통운전예비력특성을 감안한 직접부하제어와 기동정지계획의 연계방법에 관한 연구

이 범\*

## A Study of linking methodology of Direct Load Control and Unit Commitment Considering System Spinning Reserve Characteristics

Buhm Lee\*

### 요 약

본 연구에서는 계통운전예비력특성을 감안하여 DLC와 기동정지계획을 연계시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 계통운전예비력을 고려하기 위하여 새로운 제약조건을 정식화하였으며, 또한 DLC와 UC를 연계하기 위하여 3차원 동적계획법을 적용하였다. 이 결과, 경제적인 DLC와 기동정지계획을 동시에 구할 수 있게 되었으며, 이를 시험계통에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

### ABSTRACT

This paper presents a new linking methodology of direct load control(DLC) and unit commitment(UC) considering system spinning reserve characteristics. To consider system spinning reserve characteristics, we formulate new constraints. And to link DLC and UC, we employed 3-Dimensional dynamic programming which has DLC state, UC state, and stage. As a result, economical DLC and UC schedule of the power system is possible. This method is applied to the test system, and the usefulness of the method is verified.

### 키워드

Direct Load Control, Unit Commitment, 3-Dimensional Dynamic Programming, Spinning Reserve

### 1. 서 론

전력은 저장이 불가능하므로, 항상 부하를 만족시키며 비상시에 대비할 수 있는 충분한 크기의 전원을 확보하지 않으면 안된다. 이의 방법으로는 부하를 충

분히 만족시킬 수 있는 용량의 발전설비를 확보하는 방법과, 부하를 직접 제어하여 첨두부하를 줄임으로써 작은 규모의 발전설비로도 부하를 만족시킬 수 있는 직접부하제어(Direct Load Control; 이하 DLC)[1]에 의한 방법이 있다.

---

\*여수대학교 전자통신·전기공학부

접수일자 : 2003. 4. 2

DLC는 이미 미국과 같은 선진국에서는 1970년도에 검토 및 시행이 시작되어 1992년도에 4,578[MW]의 DLC를 시행하는 등 계통에서의 역할이 증대되고 있다. 현재 미국, 일본 및 유럽 등을 비롯한 여러 선진국에서는 자국의 실정에 적합한 DLC를 실시하여 효과적인 부하관리를 하고 있다.

지금까지의 DLC는 전체부하를 분산하는 개념으로 예비율을 확보하기 위하여 시행하여 왔다.[2] 그러나, 예비율에 의한 전력계통의 안정적인 운용 외에도 경제적인 운용이 필요로 하며, 따라서 경제부하배분의 일환인 기동정지계획(Unit Commitment; 이하 UC)를 포함하여 DLC의 계획을 수립하면 안정적이면서도 보다 경제적인 운전계획을 얻을 수 있다. 그러나, UC는 부하가 결정된 후에 시행되기 때문에, 지금까지는 DLC를 결정한 후에 UC를 시행하고 있어 이들을 연계운용하지 못하고 있다.

이에, UC를 고려하여 DLC를 구하는 방법[3]이 연구되어 왔으며, 더 나아가 동적계획법[4]을 사용하여 DLC 및 Payback의 특성을 정확히 반영하면서 최적의 운전계획을 수립할 수 있도록 하는 방법[5]이 개발되어 왔다. 여기서, DLC대상 부하는 부하가 급증할 때 이외에도, 계통의 운전예비력이 부족할 때에 DLC대상 부하를 차단함으로써 운전예비력을 증가시킬 수 있는 특성을 가지고 있다. 따라서, 안정적이면서도 보다 경제적인 운전계획을 수립하기 위하여, 계통운전예비력 증가특성을 감안하여 DLC와 UC를 연계하여 계획할 필요가 있다.

그러므로, 본 연구에서는 3차원 동적계획법[5]을 사용하여 계통운전예비력 증가특성을 감안한 DLC와 UC의 연계기법을 제시함으로써, 충분한 계통운전예비력을 확보함과 동시에 경제적인 DLC와 UC계획을 수립할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로, 계통운전예비력특성을 반영할 수 있는 제약조건을 정식화하였으며, 시간대와 함께 2종류의 상태를 갖는 3차원동적계획법을 구성하여 가장 경제적인 해를 구할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 연구의 효용성을 검증하였다.

## II. 정식화

### 2.1 목적함수

#### (1) DLC의 특성

DLC의 목적은 DLC에 참여하는 수용가의 부하를 제어하여 침투부하를 줄이면서, 연료비를 최소화하는데 있다. 따라서, 계통의 발전비용을 최소로 하면서 얼마만한 크기의 부하를 어느 시간대에 줄일 수 있는가가 중요한 관심사라 할 수 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 구성된 다음,  $XP'$ 개의 그룹을 차단시켜  $t$ 시간대의 DLC를 시행하며, 이를 정식화하면 다음과 같다.

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

여기서,

$DLC'$  :  $t$ 시간대에서의 DLC량 [MW]

$XP'$  : DLC에 참여하는 수용가 그룹의 수[개]

( $0 \leq XP' \leq XP^{\max}$ ,  $1 \leq t \leq T$ )

$U_{DLC}$  : 각 수용가 그룹의 차단부하의 크기 [MW]

이때 DLC에 참여한 부하가 냉방부하인 경우를 예로 들면 DLC에 참여한 부하는 부하차단에 의해 냉방상태가 열악해지게 된다. 따라서, 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 하여야 한다. 참고로, 부하순차 가동시 부하제어에 해당되는 수용가 그룹의 에어컨 가동은 30분 지연되며, 일반적으로 부하제어 30분은 수용가에게 불쾌감을 주지 않는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 Payback을 정식화하면 다음과 같다. 여기서,  $PB^{t+1}$ 은 부하제어 구간인 단계 이후  $t$ 단계 이후 ( $t+1$ )단계에서의 순보상 수요를 의미하게 된다.

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

여기서,

$T$  : 고찰기간 ( $t=1 \cdot T$ )  
 $PB^t$  :  $t$ 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 실제로 걸리는 부하 [MW]

### (2) 목적함수

DLC 및 UC의 목적은 전체 화력발전기의 총 연료비를 최소화하는 것이라 할 수 있으며, 화력발전기를 운전하는 데에는 발전을 위한 연료비 및 기동 또는 정지를 위한 기동정지비용을 더하여 다음과 같이 목적함수를 구성하였다.

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

여기서,

$C_i^j = a_i (P_i^j)^2 + \beta_i P_i^j + \gamma_i$  [천원]  
 $a_i, \beta_i, \gamma_i$  :  $i$  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 ( $i=1 \cdot N$ )  
 $S_i^j$  :  $t$ 시간대에서의 발전기  $i$ 의 기동 또는 정지비용 [천원]

### 2.2 계통운전예비력제약조건

계통에 병입되어 운전중인 발전기탈락 등의 사고에 대처하고 급격한 부하증가에도 계통의 주파수가 심하게 낮아지지 않도록 충분한 계통운전예비력을 확보하여야 한다. 계통운전예비력제약은 DLC와 Payback를 감안하여 결정하여야 하는데, 여기서 DLC대상부하는 비상시에 운전예비력제약에 포함시켜 운전할 수 있다. 따라서 식(5)와 같이 계통운전예비력을 결정하였다.

$$\text{if } R_D^t \leq XP^{\max} * U_{DLC} - DLC^t$$

$$\text{then } R^t = 0 \quad (5)$$

$$\text{if } R_D^t \geq XP^{\max} * U_{DLC} - DLC^t$$

$$\text{then } R^t = R_D^t - (XP^{\max} * U_{DLC} - DLC^t)$$

여기서,

$R_D^t$  :  $t$  시간대에서 요구되는 운전예비력 [Mw]  
 $R^t$  :  $t$  시간대에서의 운전예비력 [Mw]

또한, 이를 사용하여 식(6)과 같이 계통운전예비력 제약을 정식화하였다.

$$\sum_{i=1}^N U_i^t P_i^{\text{Rt}} \geq D^t + R^t$$

$$= D_o^t - DLC^t + PB^{t-1} + PB^{t-2} + PB^{t-3} + R^t \quad (6)$$

여기서,

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

### 2.3 기타 제약조건

#### (1) 수급제약

시시각각으로 변화하는 계통의 부하를 만족시키기 위하여, 다음과 같이 계통에 병입되어 있는 발전기들은 적절한 출력으로 운전되어야 한다.

$$\sum_{i=1}^N U_i^t P_i^t = D^t \quad (7)$$

#### (2) 개별 화력발전기의 제약조건

개별 화력발전기에 영향을 미치는 제약조건에는 출력 상하한제약, 최소 운전 및 정지시간제약 등을 만족시켜야 한다.[4]

## III. 해법

UC는 시간대별로 정해진 계통운전예비력 및 부하에 대해 시행하는 반면, DLC는 부하를 변화시키면서 결정하기 때문에, 이들 제약조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화하기 위하여는 DLC와 UC를 연계시켜 해를 구하여야 한다. 이에 본 연구에서는 3차원 동적 계획법을 도입하고, DLC와 UC를 연계하는 방법을 제시하였다.

3.1 3차원 동적계획법[5]

본 연구에서는 시간대와 기동정지계획 State (이하 UC State)로 구성된 기존의 동적계획법에 DLC에 의해 변화하는 부하에 따른 State (이하 DLC State)를 확장하여 그림 1과 같이 3차원으로 구성하였다. 즉, 종래는 시간대-UC State의 2차원에 의한 동적계획법에 의해 그 해가 산출되어 부하가 결정된 상황에서만 문제 해결이 가능하였던 것을, DLC State를 추가하여 부하의 변화까지도 고려할 수 있도록 새로이 구성한 것이다. 이들 DLC State는 DLC 및 Payback에 의해 계통에 실제로 걸리는 부하의 크기로 구성한다.

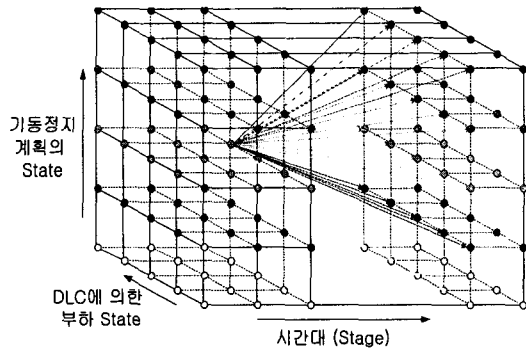


그림 1. 3차원 동적계획법  
Fig. 1 3-Dimensional dynamic programming

3.2 계통운전예비력을 감안한 DLC문제와 UC문제의 연계해법

식(1) 및 식(2)와 같이 이루어지는 DLC와 Payback을 가능케하기 위하여는 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 다음과 같이 구성하였다.

$$DLC\text{에 의한 부하 State} = XP' * 10 \quad (8)$$

식(8)을 사용하여 구성된 3차원 DP는 그림 2와 같이 입체적으로 최적의 경로를 탐색하게 된다.

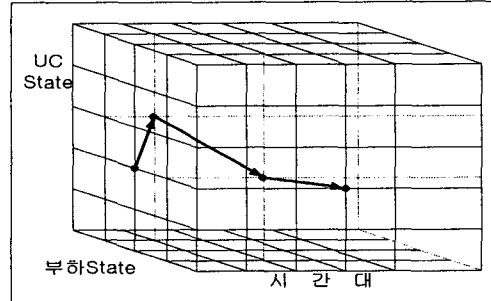
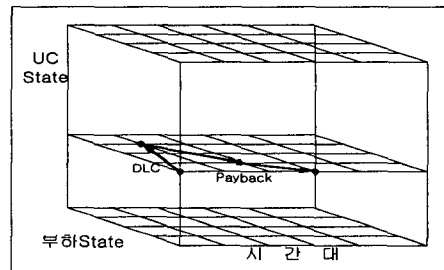
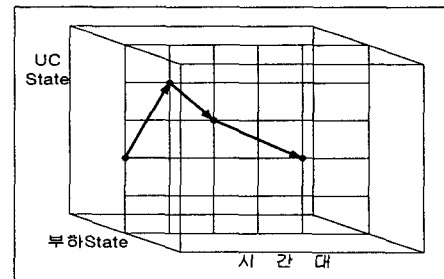


그림 2. 계산과정  
Fig. 2 Calculating procedure

구체적으로, 이 3차원 DP를 푸는 과정은 기본적으로 종래의 DP와 유사하나, 각 Stage별로 '부하 State' × 'UC State'의 상대적으로 많은 탐색점을 가지고 있다. 이와 같은 탐색은 그림 1과 같이 각 탐색점에 대하여 경로 및 총 연료비를 기록하면서 종점까지 계산해 나간다. 그림 3의 (a)는 각 탐색과정을 설명하기 위하여 UC를 고정시키고 DLC를 구하는 과정과 (b)는 DLC를 고정시키고 UC를 구하는 과정을 따로 보인 것이다.



(a) DLC의 계산례 (UC의 변화가 없는 경우)



(b) UC의 계산례 (DLC가 없는 경우)

그림 3. DP의 경로  
Fig. 3 Path of DP

여기서, 그림 3 (a)의 경로탐색방법을 설명하기 위하여,  $P=1$  일때의 탐색경로를 나타내면 그림 4와 같다. 또한, 그림 4 (b)의 UC와 관련된 경로의 탐색방법은 기존의 방법[4]를 사용하였다.

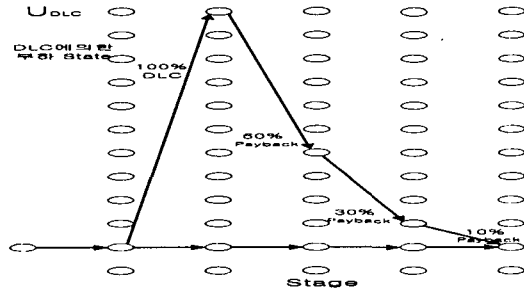


그림 4. DLC State의 경로  
Fig. 4 Path of DLC state

이의 과정에서 본 연구에서 사용한 특이사항은 다음과 같다.

- ① 종래의 UC에서는 제약조건을 위반하는 경로를 제거함으로써, 제약조건을 만족하는 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 UC 수립에는, 각 시간대에서 전 시간대의 상태 및 누적 총연료비만을 기억하여 계획을 수립함에 따라 DLC특성을 반영할 수 없었다. 이에, 본 연구에서는 3번째 전 시간대까지의 경로와 비용을 모두 기억하여 DLC의 운전특성을 감안할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로 각 시간대별로 3개의 전 상태를 기억하며, 시간대가 지남에 따라 이들 기억상태를 변화시킴으로써 이를 해결하였다. 예를 들어  $P=3$ 의 DLC가 이루어졌다면, DP상의 DLC state는 30state가 되며 이때의 상태를 303으로 기억토록 하였다. 시간대가  $t+1$ 시간대로 변화함에 따라 12state로 변화하며 상태를 302로 변화시킨다. 또한,  $t+2$ 시간대에는 3state, 301로,  $t+3$ 시간대에는 0state, 0으로 변화시키고, 이에 대응하는 부하가 결정되도록

하였다. 또한 Payback중에 DLC가 이루어질 수 있기 때문에, 3개의 State를 기억토록하여 DLC를 적용하였다.

#### IV. 사례연구

##### 4.1 시험계통

본 연구에서는 시험계통으로 IEEE RTS-24계통을 사용하였으며, 부하로는 기본 시험계통부하를 사용하고 운전예비력은 300[MW]로 하였다.

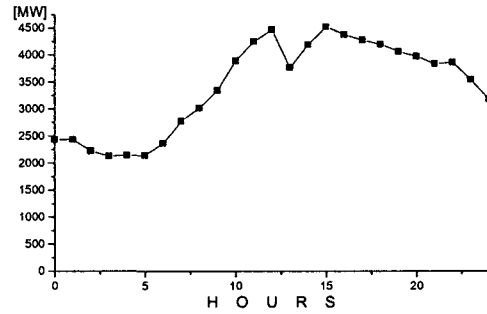


그림 5. 시험계통의 일간 부하  
Fig. 5 Daily load curves of test system

여기서 UC을 위한 부하는 1시간 간격으로 되어 있는 반면, DLC는 0.5시간 간격으로 행하므로 평균값으로 각 시간대의 중간값으로 만들어 사용하였다. DLC 적용에 따른 효과를 산출함에 있어, 1개 그룹의 제어 용량  $U_{DLC}$ 는 200[MW]로 하였고, DLC에 참여하는 그룹수로는  $P=2$ 로 정하였다. 또한, 부하제어는 제어 시간을 전 시간대로 하여 첨두부하 억제가 가능하도록 설정하였다.

##### 4.2 DLC 특성 분석

DLC의 특성을 분석하기 위하여 운전계획을 수립한 결과중, DLC의 운전이 이루어지는 시간대만을 추출하여 표 1에 나타내었다.

표 1. DLC 및 payback 특성  
Table. 1 Characteristics of DLC and payback

시간 [h]	DLC전 부하	DLC	PB1	PB2	PB3	DLC후 부하
14:00	4,357	-	-	-	-	4,357
14:30	4,524	200	-	-	-	4,324
15:00	4,452	400	120	-	-	4,172
15:30	4,379	400	240	60	-	4,279
16:00	4,328	400	240	120	20	4,308
16:30	4,276	400	240	120	40	4,276
17:00	4,238	400	240	120	40	4,238
17:30	4,199	400	240	120	40	4,199
18:00	4,131	400	240	120	40	4,131
18:30	4,062	400	240	120	40	4,062
19:00	4,018	400	240	120	40	4,018
19:30	3,973	400	240	120	40	3,973
20:00	3,906	200	240	120	40	4,106
20:30	3,839	200	120	120	40	3,919
21:00	3,853	-	120	60	40	4,073
21:30	3,866	-	-	60	20	3,964
22:00	3,707	-	-	-	20	3,726
22:30	3,546	-	-	-	-	3,546
23:00	3,365	-	-	-	-	3,365

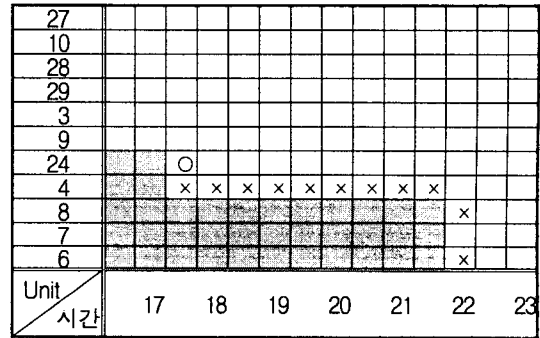
표 1에서 DLC와 payback이 이루어짐에 따라, 피크가 경감되고 있음을 알 수 있다. 즉, DLC전에는 14:30 시간대에서 4,524[MW]를 기록하였으나, DLC후에는 14:00의 부하인 4,357[MW]보다 전체적으로 낮게 나타나고 있어 약 3.69%의 피크 경감율을 보였다. 즉, DLC를 실시함으로써 전체적으로 부하는 평균화된 부하양상으로 보이고 있어 바람직한 부하특성을 나타내고 있다.

4.3 계통운전예비력반영특성 분석

본 계통을 대상으로 하여 계통운전예비력까지도 반영하여 계산한 결과중 종래의 방법[5]과 비교하여 DLC특성이 변화하는 부분만을 표 2에 나타내었으며, UC의 변화를 그림 6에 나타내었다.

표 2. 운전예비력을 반영한 DLC 및 payback 특성  
Table. 2 Characteristics of DLC and payback considering system reserve

시간 [h]	DLC전 부하	DLC	PB1	PB2	PB3	DLC후 부하
19:30	3,973	400	240	120	40	3,973
20:00	3,906	400	240	120	40	3,906
20:30	3,839	200	240	120	40	4,039
21:00	3,853	200	120	120	40	3,933
21:30	3,866	-	120	60	40	4,086
22:00	3,707	-	-	60	20	3,786
22:30	3,546	-	-	-	20	3,566
23:00	3,365	-	-	-	-	3,365



전시간대 ON : #12,13,14,32,23,22,31,30,21,20,5  
전시간대 OFF : #26,11,25,2,1,18,17,19,15,16  
그림 6. 계통운전예비력특성반영 전후의 UC의 변화  
Fig. 6 Comparison of unit commitment considering system reserve characteristics

표 2 및 그림 6으로부터 계통의 운전예비력을 반영함에 따라 DLC 특성과 UC가 변화하고 있다. 특히, 그림 6으로부터 시간대 17.5에서 #24가 기동하는 대신 #4가 정지하고 있으며, #4는 시간대 21.5까지 계속 정지하는 운전이 가능함을 알 수 있다. 또한 시간대 22에서는 #8 과 #6이 정지하는 운전계획을 보이고 있다. 즉, 운전예비력을 고려함에 따라 발전기의 기동을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 운전에 따라 총연료비도 변화하게 되는데, 이를 표 3에 나타내었다.

표 3. 피크부하 및 총연료비의 변화  
Table. 3 Comparison of peak load and total fuel cost

	종래의 방법 ([5]의 방법)	제안한 방법
전체피크부하[MW]	4,357	4,357
19~24시 피크부하[MW]	4,106	4,086
총연료비[천원]	1,314,726	1,313,372

표 3으로부터 운전예비력을 고려하여 운전계획을 수립함에 따라 총연료비가 0.1[%] 절감되고 있다. 또한, 전체 피크부하는 줄일 수 없지만, DLC가 변화하는 시간대 19~24에서의 피크치는 다소 줄일 수 있음을 알 수 있다. 여기서, 총연료비의 절감비율은 크다고 하기는 어렵지만, 전기회사의 연료비용은 매우 크기 때문에 작은 절감비율에도 실제 연료비의 절감은 작지 않다고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 종래의 예비력확보라는 목적의 DLC와 경제적운전이라는 목적의 UC를 결합함에 있어, 계통의 운전예비력을 고려하여 계산할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로, 계통의 운전예비력을 고려하여 DLC와 UC의 연계할수 있도록 정식화하였으며, 또한 3차원 동적계획법을 도입하여 문제를 풀으로써 안정적이면서도 보다 경제적인 DLC와 UC의 해를 동시에 구할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용한 결과, 종래의 방법보다 우수한 DLC 및 UC를 구할 수 있어 목적함수인 총연료비를 절감시킬 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] Y.Y. Hsu, C.C. Su, "Dispatch of Direct Load Control using Dynamic Programming", 1991
- [4] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, 1984

- [5] 이범, 김용하, 최상규, 김형중, "3차원 동적계획법에 의한 직접부하제어를 고려한 기동정지계획 방법론의 개발", 대한전기학회논문지, 51A권, 12호, 대한전기학회, 2002. 12., pp.591-596

#### 저자소개



#### 이 범(Lee, Buhm)

1981년 고려대 전기공학과(공학사)  
1989년 고려대 대학원 전기공학과(공학석사)  
1995년 고려대 대학원 전기공학과(공학박사)

현재 여수대 전자통신·전기공학부 부교수

※관심분야 : 최적조류계산, 경제운용 고조파, 신뢰도