직접부하제어와 계통경제운용의 연계기법 개발

이 범*

*여수대학교

Development of Linking Methodology of Direct Load Control and System Economic Operation

Lee, Buhm*

* Yosu National University

E-mail : buhmlee@yosu.ac.kr

요 약

본 연구에서는 DLC와 경제운용을 연계시킴에 있어 계통운전예비력특성을 감안할 수 있도록 하였다. 우선, 새로이 제약조건을 정식화하여 계통운전예비력을 고려하였으며 3차원 동적계획법을 적용하여 이들을 연계토록 한 결과, DLC와 경제운용을 동시에 경제적으로 구할 수 있게 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 종래의 방법보다 우수함을 입증하였다.

ABSTRACT

To link direct load control and economic operation considering system spinning reserve characteristics, this paper presents a new metholodogy. By formulating new constraints, considering system spinning reserve characteristics is possible. And by employing 3-D dynamic programming, linking direct load control and economic operation is possible. As a result, economical DLC and operation schedule of the power system is possible. The usefulness of the method is verified by applying to the test system.

키워드

System Spinning Reserve, Direct Load Control, Economic Operation, 3-Dimensional Dynamic Programming

I. 서 론

지금까지의 DLC는 전체부하를 분산하는 개념으로 예비율을 확보하기 위하여 시행하여 왔다.[1] 그러나, 예비율에 의한 전력계통의 안정적인 운용 외에도 경제적인 운용이 필요로 하며, 따라서 기동정지계획(Unit Commitment; 이하 UC) 등 경제운용을 포함하여 DLC의 계획을 수립하면 안정적이면서도 보다 경제적인 운전계획을 얻을 수 있다. 그러나, 경제운용은 부하가 결정된 후에 시행되기 때문에, 지금까지는 DLC를 결정한 후에 경제운용을 시행하고 있어 이들을 연계운용에 어려움이 있었다.

이러한 문제를 해결하고자, UC를 고려하여 DLC를 구하는 방법[2]이 연구되어 왔으며, 더 나아가 동적계획법[3]을 사용하여 DLC 및 Payback의 특성을 정확히 반영하면서 최적의 운전계획을 수립할 수 있도록 하는 방법[4]이 개발되어 왔다. 여기서, DLC대상 부하는 부하가 급증할 때 이외에도 계통의 운전예비력이 부족할 때에 DLC대상 부하를 차단함으로써 운전예비력을 증가시킬 수 있는 특성을 가지고 있기 때문에, 보다 경제적인 운전계획을 수립하기 위하여 계통운전예비력 증가특성을 감안하여 DLC와 경제운용을 연계하여 계획하면 보다 경제적인 운전이 가능하다.

그러므로, 본 연구에서는 3차원 동적계획법[4]을 사용하여 계통운전예비력 증가특성을 감안한 DLC와 경제운용의 연계기법을 제시함으로써, 충분한 계통운전예비력을 확보함과 동시에 경제적인 DLC와 경제운용계획을 수립할 수 있도록 하였다. 이의 방법으로, 계통운전예비력특성을 반영할 수 있는 제약조건을 정식화하였으며, 시간대와 함께 두 가지 종류의 상태를 갖는 3차원동적계획법을 구성하여 보다 경제적인 해를 구할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 제안한 방법이 종래의 방법보다 우수함을 보였다.

II. DLC를 포함한 경제운용문제의 정식화

2.1 목적함수

(1) DLC

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 다음, XP^t개의 그룹을 차단시켜 t시간대의 DLC를 시행하며, 이를 정식화하면 다음과 같다.

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

여기서,

DLC^t: t시간대에서의 DLC량 [MW]

XP^t : DLC에 참여하는 수용가 그룹의 수[개]

$(0 \le XP^t \le XP^{\max},\ 1 \le t \le T)$

U_{DLC} : 각 수용가 그룹의 차단부하의 크기 [MW]

이때 DLC는 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.

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

여기서,

T : 고찰기간 (t=1··T)

PB^t : t시간대에서의 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: t시간대에서의 부하 [MW]

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

(2) 경제운용

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

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

여기서,

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

α_i, β_i, γ_i : i 화력발전기의 연료비의 계수

P_i^t: t시간대에서의 발전기 i의 출력 [MW]

U_i^t: t시간대에서의 발전기 i의 상태(U_i^t=1:운전, 0:정지)

N : 기동정지대상 발전기 수 (i=1··N)

S_i^t: t시간대에서의 발전기 i의 기동 또는 정지비용 [천원]

2.2 제약조건

(1) 계통운전예비력

계통운전예비력제약은 DLC와 Payback를 감안하여 결정하여야 하는데, 여기서 DLC대상부하는 비상시에 운전예비력제약에 포함시켜 운전할 수 있다. 따라서 식(5)와 같이 계통운전예비력을 결정하였다.

만약 $R_D^t \le XP^{\max} * U_{DLC} - DLC^t$

그러면 $R^t = 0$ (5)

만약 $R_D^t \ge XP^{\max} * U_{DLC} - DLC^t$

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

여기서,

R_D^t : t 시간대에서 요구되는 운전예비력 [Mw]

R^t : t 시간대에서의 운전예비력 [Mw]

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

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

여기서,

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

(2) 수급제약

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

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

(3) 개별 화력발전기의 제약조건

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

III. DLC를 포함한 경제운용문제의 해법

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

본 연구에서는 DLC State를 구성함에 있어, DLC는 100[%]가 이루어지고, Payback은 60[%], 30[%], 10[%]로 이루어지는 문제를 해결하기 위하여 DLC State의 갯수를 다음과 같이 구성하였다.

$$DLC\text{에 의한 부하 } State = XP^{t} * 10 \qquad (8)$$

식(8)을 사용하여 구성된 3차원 DP는 그림 1과 같이 입체적으로 최적의 경로를 탐색하게 된다.

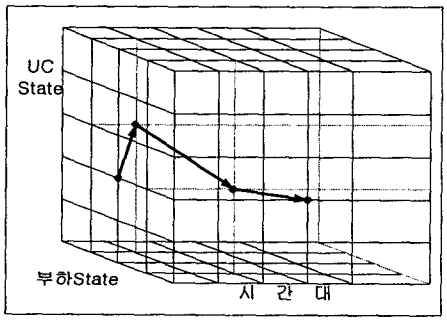
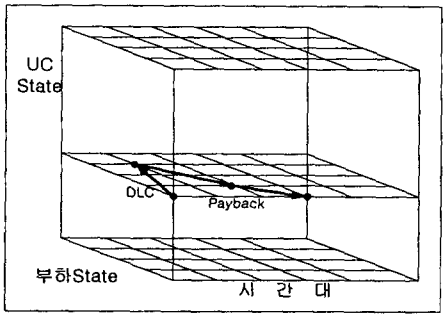
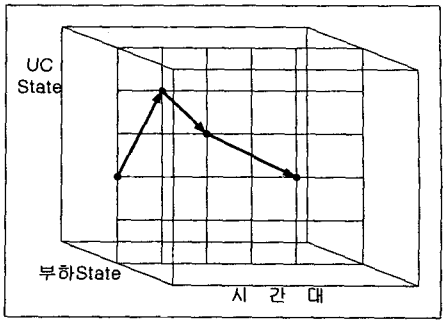


그림 1. 제안한 방법의 계산과정

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 2. DP의 경로

IV. 사례연구

4.1 시험계통

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

또한, 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 제어용량 U_{DLC}는 200[MW]로 하였고, DLC에 참여하는 그룹수로는 P=2로 정하였다. 또한, 부하제어는 제어시간을 전 시간대로 하여 첨두부하 억제가 가능하도록 설정하였다.

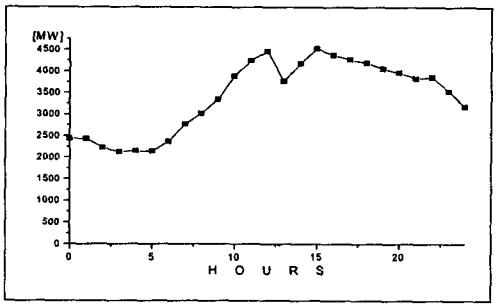


그림 3. 시험계통의 부하

4.2 종전의 방법과의 결과비교

본 계통을 대상으로 하여 계통운전예비력까지도 반영하여 계산한 결과중 종래의 방법[4]과 비교하여 DLC특성이 변화하는 부분만을 표 1에 나타내었다.

표 1. DLC 및 payback 특성

(1) 종전방법[4]

시간 [h]	DLC전 부하	DLC	PB1	PB2	PB3	DLC후 부하
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

(2) 제안한 방법

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

표 1로부터 계통의 운전예비력을 반영함에 따라 DLC 특성과 UC가 변화하고 있다. 특히, UC를 살펴보면, 시간대 17.5에서 #24가 기동하는 대신 #4가 정지하고 있으며, #4는 시간대 21.5까지 계속 정지하는 운전이 가능하다. 또한 시간대 22에서는 #8 과 #6이 정지하는 운전계획을 보이고 있다. 즉, 운전예비력을 고려함에 따라 발전기의 기동을 줄일 수 있었다.

이와 같은 운전에 따라 총연료비도 변화하게 되는데, 이를 살펴보면, 전체 피크부하는 같으나, 시간대 19~24의 피크부하는 4,106[MW]에서 4,086[MW]로 약 0.5[%] 절감되고 있으며, 이에 따라 총연료비는 1,314,726[천원]에서 1,313,372[천원]으로 약 0.1[%] 절감되고 있다. 즉, 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

우선, 본 연구에서는 종래의 예비력확보라는 개념의 DLC에서 더 나아가 경제운용과의 연계를 시도하고, 계통의 운전예비력을 고려할 수 있도록 하였다. 또한, DLC와 경제운용의 연계문제를 풀 수 있도록 제약조건을 정식화하고, 3차원 동적계획법에 의한 해법을 제시함으로써, 안정적이면서도 보다 경제적인 DLC와 경제운용의 해를 구할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 제안한 방법이 종래의 방법보다 효과적임을 보였다.

참고문헌

[1] 한국전력공사, "최대부하 직접부하제어방식 실용화를 위한 연구", 1990.12.

[2] Y.Y. Hsu, C.C. Su, "Dispatch of Direct Load Control using Dynamic Programming", IEEE Trans. Power System, Vol.6, No.3, pp.1056-1061, August, 1991.

[3] A.J. Wood, B.F. Wollenberg,"Power Generation, Operation, and Control", Wiley, 1984.

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