

우선순위기반 동적 프로그래밍을 이용한 직접부하제어

(Direct Load Control Using Priority Based Dynamic Programming)

김태현* · 이승연 · 신명철 · 차재상 · 서희석 · 김종부 · 최상열

(Tae-Hyun Kim · Seung-Youn Lee · Myong-Chul Shin · Jae-Sang Cha · Hee-Seok Suh · Jong-Boo Kim · Sang-Yule Choi)

요 약

현재 운용되고 있는 직접부하제어 알고리즘은 직접부하제어 사업에 참여에 따른 수용가의 개별 부하별 우선순위가 고려되지 않고 있고, 또한 제어 시간도 수용가의 불편을 고려되지 않고 획일적으로 일정 시간대에 일률적으로 수용가의 부하를 제어함으로써 참여 수용가의 불편 증대로 참여율이 저조한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 참여 수용가의 불편을 최소화시키고 또한 개별 부하에 대한 우선순위 요구를 최대한으로 반영하기 위해 우선순위 기반 동적 프로그래밍을 이용한 직접부하제어 알고리즘을 제시한다. 제시되는 알고리즘은 직접부하제어가 발생되기 1시간 전에 참여수용가가 스스로 해당 부하의 우선순위를 결정하여 직접부하제어 센터로 E-Mail 등으로 보내면 센터에서는 현재 부하의 전력량과 우선순위 그리고 OFF주기 등을 고려하여 동적 프로그래밍을 수행하여 OFF되어야 할 부하들을 선택하게 된다.

Abstract

Currently used DLC(Direct Load Control) algorithm is only focused on ON/OFF load control not concerning about relieving participated customer's inconvenience and load priority. Therefore, that is a major obstacle to attract customer participating in demand response program. To overcome the above defects, the authors represent direct load control algorithm using priority based dynamic programming. the proposed algorithm is that participant customer send E-mail to DLC center about priority of load before executing DLC, then DLC algorithm decide which load to be OFF by using priority and off time constraint of the load. By using dynamic programming based on the order of priority for DLC algorithm, it is possible to maximize participating customer's satisfaction and it will help to attract more customer's participating in demand response program.

Key Words : DLC, dynamic programming, load priority

* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 석사과정

Tel : 031-290-7161, Fax : 031-290-7168

E-mail : buzz99@ece.skku.ac.kr

접수일자 : 2004년 6월 9일

1차심사 : 2004년 6월 14일

심사완료 : 2004년 7월 21일

1. 서 론

직접부하제어(Direct Load Control)란 전력회사 계통의 첨두부하를 효율적으로 억제하기 위하여 전력회사와 수용가가 약정을 체결하고 피크부하 발생

시 전력회사는 약정에 의한 시간 및 회수만큼 수용가의 전력사용 설비를 제어하는 것을 말하며, 이에 전력회사는 계약에 의한 요금보상 등의 혜택을 수용가에게 제공하는 이른바 상호 의존적이고 보완적인 부하관리제도이다. 우리나라에서는 한전이 1999년부터 원격제어에어컨을 보급·운용하여 여름철 전력수요가 급증하는 오후 24시경에 수용가의 에어컨 가동을 무선통신으로 일시 정지시켜 부하의 안정을 도모하고 있다. 직접부하제어 알고리즘의 핵심적인 사항은 참여 수용가의 불편을 최소화시키면서 특정 시간대에 발생하는 피크부하를 최대한으로 억제하는 것이며, 지금까지 이러한 알고리즘의 구현을 위하여 주로 연구된 방식은 수치해석 방법으로 최적해를 구하는 방법[1-2]과 인공지능 기법을 이용한 방법[3-4] 등이 시도되었다. 그러나 이와 같이 제시된 방식들은 다음과 같은 문제점을 안고 있다. 즉 직접 부하제어 참여에 따른 수용가의 개별 부하별 우선순위가 고려되지 않았고, 또한 제어 시간도 수용가의 불편을 최소 하기위한 방식이 요구됨에도 불구하고 기존의 부하제어 방식에서는 이러한 요구사항을 무시하고 획일적으로 일정 시간대에 일률적으로 수용가의 부하를 제어함으로써 참여 수용가의 불편이 증대 되어 부하제어에의 참여율이 저조하였다.

따라서 본 연구에서는 참여수용가의 불편을 최소화시키고, 또한 개별 부하에 대한 우선순위 요구를 최대한으로 반영하는 우선순위기반 동적 프로그래밍을 이용한 직접 부하제어 알고리즘을 제시한다. 제시되는 알고리즘은 직접부하제어가 발생되기 1시간 전에 참여수용가가 스스로 해당 부하의 우선순위를 결정하여 직접부하제어 센터로 E-Mail 등으로 보내면 센터에서는 현재 부하의 전력량과 우선순위 그리고 OFF주기 등을 고려하여 동적 프로그래밍을 수행하여 OFF되어야 할 부하들을 선택하게 된다. 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 9개의 수용가 54개의 부하를 모의하여 시뮬레이션하였다.

2. 우선순위 기반 동적 프로그래밍 기법

2.1 목적함수(Objective function)

실제로 침두부하 발생시 약정 수용가가 500[KW]

부하차단명령을 전달받았다면 이때 대부분의 수용가는 사용하는 부하의 우선순위가 낮은 순서대로 차단하여 500[KW]를 맞추려고 하게 된다. 따라서 원활한 직접부하제어를 이루려면 참여 수용가의 이러한 성향을 최대한으로 반영하여야 하고, 또한 특정 부하의 연속적인 OFF 제어로 인하여 발생하는 수용가의 불편을 최소로 시킴과 동시에 특정시간대의 침두부하 발생을 최대한으로 억제할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 참여 수용가의 이러한 요구를 최대한 반영한 우선순위기반의 동적프로그래밍을 제시하였으며, 이를 위해 요구되는 목적 함수 및 제약조건은 다음과 같다.

○ 목적함수(Objective function)

$$Max \sum_{i=1}^K X_i(N) \cdot P_i(N) \quad (1)$$

여기서, i : 제어부하 번호

K : 총 제어부하의 개수

N : 제어 주기 번호

X_i : 1(ON) 또는 0(OFF)

P_i : 제어 부하의 우선순위

목적 함수는 참여 수용가의 제어 대상 부하 중 우선순위가 높은 부하들이 우선적으로 각 제어 stage 별로 ON될 수 있도록 한 것이다. 그리고 제어 주기 번호는 총 제어시간을 15분 주기로 나누었을 경우 제어가 발생하는 stage 번호이다.

○ 제약 조건

$$M(N) \sum_{i=1}^K X_i(N) \cdot C_i(N) \leq Y(N) \quad (2)$$

$$X_i(N+1) = 1 \text{ if } X_i(N) = 0 \quad (3)$$

여기서, $C_i(N)$: N번째 제어주기에서 i번째 부하의 실제 전력량

$Y(N)$: ON으로 요구되는 총 전력량

$M(N)$: ON되는 실제 총 전력량

식 2에서 N번째 제어 주기에서 ON되는 총 전력량은 침두부하 억제가 가능하도록 요구되는 총 전력

우선순위기반 동적 프로그래밍을 이용한 직접부하제어

량보다 같거나 적어야 한다. 식 3에서는 이전 제어주기에서 OFF 제어신호가 들어간 부하는 다음 주기에서는 반드시 ON 제어신호가 되도록 한다.

2.2 우선순위 기반 동적 프로그래밍

본 연구에서 제시되는 우선순위 기반 동적 프로그래밍의 반복 속성(recursive property)은 다음의 식 4로서 표현되어질 수 있다.

$$f_i(Y(N)) = \text{MAX}[f_{i-1}(Y(N)), f_{i-1}(Y(N) - C_i(N)) + P_i] \quad (4)$$

여기서, $f_i(Y(N))$ 은 N번째 제어주기에서 $Y(N)$ 을 만족시키는 최대 이익 값이다. 위의 식 4에서 제시된 반복속성을 순서도로서 표현하면 다음의 그림 1과 같다.

그림 1에서 제시되는 반복속성에 대한 순서도를

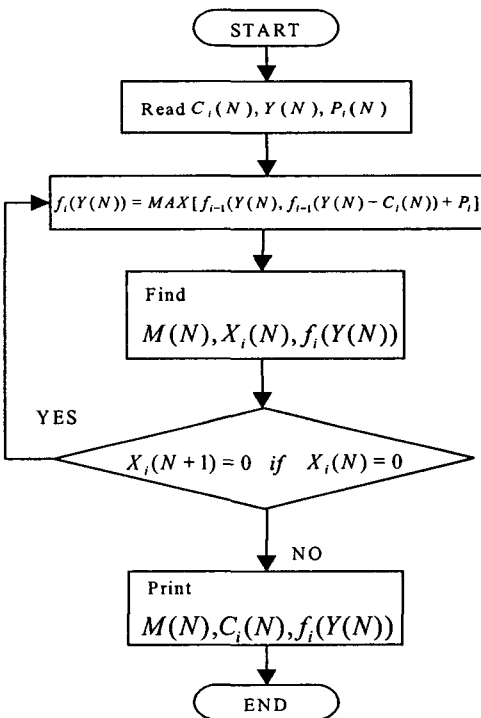


그림 1. 우선순위 기반 동적 프로그래밍 순서도
Fig. 1. Flow chart for priority based dynamic programming

각 STEP별로 표현하면 다음과 같다.

- Step 1) N번째 제어단계에서의 각 부하의 현재 전력량, ON으로 요구되는 전력량, 그리고 각 부하의 우선 순위를 입력한다.
- Step 2) N번째 제어단계에서 우선순위가 높은 부하 순서대로 ON시켜서 현재 부하의 총량이 목적전력량에 근접되도록 한다.
- Step 3) N번째 제어단계에서 OFF로 제어되어야 될 부하 번호를 찾는다.
- Step 4) 만약 N번째 제어단계에서 OFF로 제어 선택된 부하가 이전의 N-1 단계에서도 OFF로 제어되었다면 이러한 부하는 제외시키고 Step2) 과정을 반복한다.
- Step 5) 만약 N번째 제어단계에서 OFF로 제어 선택된 부하가 이전의 N-1 단계에서는 ON로 제어되었던 부하일 경우 탐색은 종료된다.

3. 시뮬레이션

본 연구에서 제시된 우선순위 기반 동적 프로그래밍의 유용성을 검증하기 위해 9개의 수용가군과 총 54개의 부하를 모델링하여 시뮬레이션하였다. 다음의 그림 2는 직접부하제어 시스템 내의 수용가를 모델링 한 것이며 시스템의 구조이며 표1의 데이터들은 최초 제어 시간대인 (10:00~11:00)에 각 수용가내 부하의 전력량과 부하의 우선순위를 나타낸다. 부하들의 우선순위는 3단계로 분류되며 직접부하가 이루어지기 1시간 전에 수용가들의 필요에 의하여 자발적으로 미리 결정된 것이다.

표 1. (10:00~11:00)시간대의 부하의 전력량 및 우선순위

Table 1. Loading and priority of load during (10:00~11:00) control time

수용가	제어부하번호(i)	전력량(C, [KW])	우선순위(P)
1	1	30	1
	2	50	1
	3	70	2
	4	90	2
	5	110	3
	6	130	3

수용가	제어부하번호(i)	전력량(C, [KW])	우선순위(P)
2	7	30	2
	8	50	2
	9	70	3
	10	90	3
	11	110	1
	12	130	1
3	13	30	3
	14	50	3
	15	70	1
	16	90	1
	17	110	2
	18	130	2
4	19	30	1
	20	50	1
	21	70	2
	22	90	2
	23	110	3
	24	130	3
5	25	30	2
	26	50	2
	27	70	3
	28	90	3
	29	110	1
	30	130	1
6	31	30	3
	32	50	3
	33	70	1
	34	90	1
	35	110	2
	36	130	2
7	37	30	1
	38	50	1
	39	70	2
	40	90	2
	41	110	3
	42	130	3
8	43	30	2
	44	50	2
	45	70	3
	46	90	3
	47	110	1
	48	130	1
9	49	30	3
	50	50	3
	51	70	1
	52	90	1
	53	110	2
	54	130	2

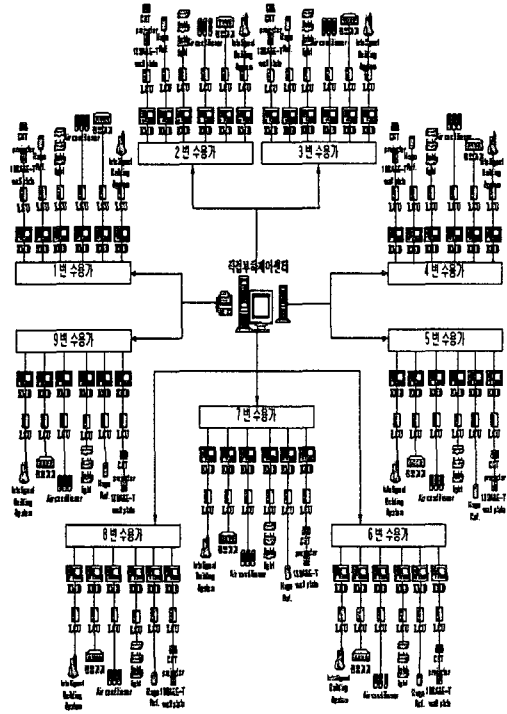


그림 2. 직접부하제어 시스템내의 수용가
Fig. 2. Customers participating in direct load control

직접부하제어가 이루어지는 총 제어시간은 오전 10:00시부터 17:00까지로 하였으며 총 제어하고자 하는 목적 전력량은 4000[kw]로 설정하였다. 각 시간대별로 적용되는 제어 시간(time step)은 15분 간격으로 설정 하였으며 따라서 제어가 실행되는 시간동안의 총 제어횟수는 (총 시간/제어시간=28회)가 된다. 또한 현 단계에서 제어를 실시하였던 부하들은 다음 단계의 제어대상에서 배제하여 동일 수용가의 연속적인 OFF 제어가 수행되지 않도록 하였다.

다음의 표 2는 총 제어시간을 오전 10:00시부터 17:00까지로 하였을 경우 각 시간대별로 OFF되어지는 부하들과 절감되어지는 전력량을 나타낸다. 탐색 진행 중에 이전 단계에서 OFF로 제어되었던 부하들이 현재 단계에서도 OFF로 선택되는 경우, 이러한 부하들은 OFF 부하에서 제외시킨 후 새로이 탐색을 수행하여 OFF될 부하를 새로이 선택한다. 이것은 동일 부하가 장시간 OFF로 제어되는 것을 방지하여 수용가의 불편을 최소화하기 위해서이다.

표 2. 시간대별 OFF된 부하 및 절감 전력량
Table 2. OFF load and loading reduction during direct control time

시간	제어이전 총전력량 [kW]	제어이후 총전력량 [kW]	감 소 전력량 [kW]	off 되는 수용가 부하번호
10:15	4320	3930	390	12, 30, 48
10:30	4320	3990	330	17, 35, 53
10:45	4320	3930	390	12, 30, 48
11:00	4320	3990	330	17, 35, 53
11:15	4590	3955	635	23, 24, 41, 42
11:30	4590	3980	610	5, 6, 10, 28, 45, 46
11:45	4590	3940	650	9, 23, 24, 27, 41, 42
12:00	4590	3980	610	5, 6, 10, 28, 45, 46
12:15	3780	3780	0	0
12:30	3780	3780	0	0
12:45	3780	3780	0	0
13:00	3780	3780	0	0
13:15	4320	3930	390	12, 30, 48
13:30	4320	3990	330	17, 35, 53
13:45	4320	3930	390	12, 30, 48
14:00	4320	3990	330	17, 35, 53
14:15	4860	3980	880	5, 6, 23, 24, 41, 42, 46
14:30	4860	4000	860	9, 10, 12, 27, 28, 30, 45, 48
14:45	4860	3980	880	5, 6, 23, 24, 41, 42, 46
15:00	4860	4000	860	9, 10, 12, 27, 28, 30, 45, 48
15:15	4590	3955	635	18, 35, 36, 53, 54
15:30	4590	3965	625	3, 4, 17, 21, 22, 39, 40
15:45	4590	3955	635	18, 35, 36, 53, 54
16:00	4590	3965	625	3, 4, 17, 21, 22, 39, 40
16:15	4320	3930	390	12, 30, 48
16:30	4320	3990	330	17, 35, 53
16:45	4320	3930	390	12, 30, 48
17:00	4320	3990	330	17, 35, 53

다음의 그림 3은 직접부하제어 프로그램 수행 전후의 직접부하제어 시스템 내의 부하 패턴을 보여준다.

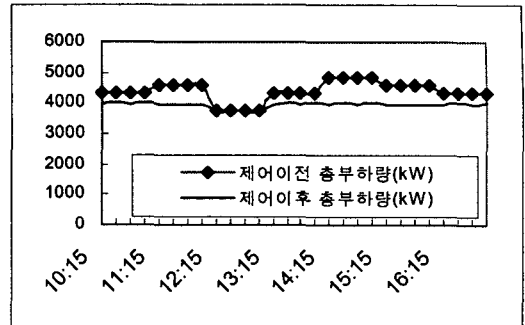


그림 3. 직접부하제어 시행 전·후의 부하 패턴의 변화 비교

Fig. 3. Comparison with load pattern after DLC control

위의 그림 3에서 보인 바와 같이 제시된 직접부하제어 알고리즘을 이용함으로써 약 7%의 부하 절감을 이룰 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 우선순위기반의 동적 프로그래밍 기법을 이용하여 직접부하제어 알고리즘을 제안했다. 제시된 알고리즘은 각 시간대별로 참여 수용가에서 해당부하들의 우선순위를 E-Mail 등으로 부하제어 센터로 전송하면 전송된 우선순위와 각 실시간으로 전송되는 전력량 그리고 직접부하제어시스템이 제어하여야 하는 목적 전력량을 입력값으로 동적 프로그래밍이 수행된다. 이때 참여 수용가의 만족감을 극대화시킬 수 있도록 이전 제어단계에서 OFF로 제어된 부하들은 현재 단계에서 탐색시 제외한 후 탐색을 수행하도록 하는 제약조건을 부가함으로써 동일 부하가 장시간 OFF로 제어되는 것을 미연에 방지하였다. 제시된 방식은 수용가의 요구를 최대한 반영하는 방식으로, 직접부하제어의 기본적 목표인 첨두부하 억제뿐만 아니라 수용가의 만족을 극대화 시킴으로써 향후 부하관리사업의 확대에 기여하게 될 것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-081)주관으로 수행된 과제이며 이에 감사드립니다.

References

[1] Yuan-Yih Hsu, Chung-Ching Su "Dispatch of Direct Load Control Using Dynamic Programming", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.6, No.3, August 1991.

[2] Deh-chang Wei, Nanming Chen, "Air Conditioner Direct Load Control By Multi-Pass Dynamic Programming", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.10, No.1, February 1995.

[3] K. Bhattacharyya, and M.L.Crow, "Fuzzy Logic Based Approach to Direct Load Control", IEEE Trans. On Power Systems. Vol. PAS-99, No. 2, May 1995.

[4] K. Y. Huang, H. T. Yang, C. C. Liao, C. L. Huang, "Fuzzy Dynamic Programming for Robust Direct Load Control", Proceedings of EMFD 98, Vol. 2, pp.564-569, March 1998.

[5] H. Salehfar, et.al "Fuzzy Logic-Based Direct Load Control of Residential Electric Water Heaters and Air Conditioners Recognizing Customer Preferences In a Deregulated Environment", Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE, Vol. 2, pp. 1055-1060, July 1999.

[6] Wen-Chen Chu, Bin-Kwie Chen, Chun-Kuei Fu "Scheduling of Direct Load Control to Minimize Load Reduction for A Utility Suffering from Generation Shortage", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.8, No.4, November 1993.

[7] C.Y.Chang, C.J.Wu, C.T.Chang, C.H.Lin, J.L.Yen, T.G.Lu, W.C.Chang "Experiences of Direct Load Control Using Ripple Signals in Taiwan Power System", Proceedings of the International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, Hong Kong, November 1997.

[8] Robert Sedgewick, "Algorithms", Addison-Wesley Publishing Company, 1998.

[9] A. Weibe, Memner, IEEE, and H. Salehfar, Senior Memner, IEEE "Direct Load Control For Reducing Losses in The Main and Laterals of Distribution Systems", Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume: 3, 21-25 July 2002, Pages : 1593-1598 vol.3.

[10] Salehfar, H.; Patton, AD "Modeling and evaluation of the system reliability effects of direct load control" Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 4, Issue: 3, Aug. 1989 Pages : 1024 - 1030.

[11] Bargiotas, D. Birdwell, J.D. "Residential air conditioner dynamic model for direct load control", Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 3, Issue: 4, Oct. 1988, Pages:2119-2126.

[12] Teive, R.C.G., Vilvert, S.H, "Demand side management for residential consumers by using direct control on the loads", Power System Management and Control, 2002. Fifth International Conference on (Conf. Publ. No. 488), 17-19 April 2002 Pages : 233-237.

[13] Ng, K.-H., Sheble, G.B., "Direct load control-A profit-based load management using linear programming", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 13, Issue: 2, May 1998, Pages : 688-694.

[14] Cohen, A.I.; Wang, C.C., "An optimization method for

load management scheduling", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 3, Issue: 2, May 1988, Pages : 612-618.

[14] Hobbs, W.J., Hermon, G.; Warner, S., Shelbe, G.B, "An enhanced dynamic programming approach for unit commitment", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 3, Issue: 3, Aug. 1988, Pages: 1201-1205.

◇ 저자소개 ◇

김태현 (金兌炫)

1976년 9월 12일생. 2002년 2월 수원대학교 전기공학과 졸업(학사). 2003년 3월 성균관대학교 전자전기공학과 대학원 입학(석사). 현재 동대학원 전자전기공학과 석사과정.

이승연 (李丞淵)

1973년 11월 11일생. 1999년 2월 성균관대학교 전기공학과 졸업(학사). 2001년 2월 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 박사과정.

신명철 (申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대 전기공학과 졸업. 1978년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1978년~현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수.

차재상 (車載祥)

1968년 1월생. 1991년, 1997년 성균관대학교 공학사 및 공학석사. 2000년 일본 東北(Tohoku)대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 2000~2002년 한국전자통신연구원 이동통신연구소 선임연구원. 2002년 3월~현재 서울 서경대학교 정보통신공학과 전임강사.

서희석 (徐熙錫)

1961년 6월 26일생. 1987년 성균관대학교 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989~1991년 LG산전연구소 연구원. 1995년~현재 두원공과대학 소프트웨어개발과 부교수.

김종부 (金鐘夫)

1985년 성균관대학교 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 금성정보통신 연구소. 주임연구원. 1991년~현재 인덕대학 컴퓨터정보전자응용계열 교수.

최상열 (崔相烈)

1970년 8월 24일생. 1996년 성균관대 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학박사). 2002~2004년 안양대학교 디지털미디어학부 전임강사. 2004년~현재 인덕대학 컴퓨터정보전자응용계열 전임강사.