가정용 분산전원시스템의 성능 모사를 위한 전력부하 프로파일 예측

이 상 봉, 조 우 진, 이 관 수†
한양대학교 기계공학과

Prediction of Electrical Load Profile for Use in Simulating the Performance of Residential Distributed Generation Systems

Sang-Bong Lee, Woojin Cho, Kwan-Soo Lee†
School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received November 28, 2010; revision received February 14, 2011)

ABSTRACT: The electrical load profiles of end-users must be analysed properly to introduce distributed generation system efficiently. In this study, numerical simulation for predicting a residential electrical load profile was developed to satisfy categorized electricity consumption range. We applied bottom-up approach to compose electrical load profile by using data from official reports and statistics. The electrical load profile produced from the simulation predicted peak times of public report accurately and agreed well with the standard residential electrical load profile of official reports within average error of 16.2%.

Key words: Household appliance(가전기기), Bottom-up approach(상향식 접근), Electrical load profile(전력부하 프로파일)

기 호 설 명

f : 사용 확률
h : 1회 시행이 차지하는 시간
N : 일일 사용 횟수
p : 소비 전력 [W]
p : 전력부하 프로파일 [W, kW]
r : 난수
t : 시간 [min, hour]
u : 단위 계단 함수
S : 확률 분포 면적

그리스 문자

Δt : 연속 사용 시간

상첨자

j : 변수

하첨자

app : 가전기기
avg : 평균
i : 변수
total : 전체

† Corresponding author
Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021
E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

1. 서 론

분산전원은 기존 전력 시스템의 수급 안정성과 효율을 향상시킨다. 분산전원의 도입 및 운용 계획에 있어 수용가의 전력부하 프로파일 예측은 중요한 기초 자료로 활용된다.[1-3] 일례로 분산전원의 발전용

량 선정은 수용가의 첨두부하(peak load)와 기저부하(base load) 정보를 요구, 운용계획 수립은 분산전원의 가용 시간과 수용가의 전력 사용 집중 시간의 비교를 요구한다.

근래 소형 분산전원이 빠르게 보급됨에 따라 가정의 전력부하 프로파일을 제시하는 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 특히, 북미 표준 가정의 대표 전력부하 프로파일을 다룬 국제에너지기구(IEA)의 Annex 42[4]나, 캐나다 표준 가정의 대표 전력부하 프로파일을 다룬 CCHT(Canadian Centre for Housing Technology)의 연구[5] 등을 대표적 예로 들 수 있다. 이들이 제시한 전력부하 프로파일은 많은 연구자들이 분산전원(가정용 연료전지나 초소형 열병합발전 등)의 경제성과 에너지 효율성을 분석하기 위한 기초 자료로 사용하고 있다. 이는 분산전원의 성능/경제성 평가가 단지 정격출력의 성능이 아닌 실제 운전 조건에서의 성능에 근거하여 이루어지는 추세임을 보여준다. '발전효율이 높은 연료전지와 정격출력 도달 시간이 짧은 소형 가스엔진 중 어느 분산전원이 가정에 적합한가?', '태양광 전원의 가용 시간과 수용가 전력 사용 시간의 차이를 보상하기 위해 어떤 용량의 배터리가 요구되는가?' 등은 전력부하 프로파일의 필요성을 잘 들어내는 질문이다. 그러나 국내 가정의 전력부하 프로파일을 제시하거나 그 예측 방법을 논의한 연구는 매우 드물다. 에너지관리공단에서 계절 및 요일에 따른 가정의 평균 전력부하 프로파일을 제시,[6] Kim[7]이 공동주택 한 곳의 전력부하 실측하여 단위 면적당 전력부하 프로파일을 제시한 바 있으나, 그 이상의 연구는 찾아볼 수 없다. 특히, 전력부하 프로파일의 예측 방안에 대해 논의한 연구를 찾아보기는 더욱 어렵다. Kim[7]은 그가 제시한 전력부하 프로파일에 해당 가정의 가구 면적을 곱해 다양한 가정의 전력부하 프로파일을 예측할 수 있으리라 기대하였으나, 이는 타당하지 못한 것으로 보인다. 에어컨이나 전열기기 등을 제외한 대다수의 가전기기들은 그 전력소비량과 가구 면적 사이에 별다른 상관성을 갖지 않는다.

이 연구는 1차적으로 국내 가정들의 대표적인 전력부하 프로파일을 제시하는 것을 목표로 한다. 특히, 국내 가정을 월평균 전력사용량에 따라 세 종류(저소비형, 중소비형, 고소비형)로 분류하고, 각 종류 가정의 대표 전력부하 프로파일을 제시하여, 단지 표준 가정의 전력부하 프로파일 제시에 그친 기존 연구를 보완한다. 2차적으로는 확률적 접근을 통해 기존 예측 방법의 단점을 보완하고자 한다. 확률적 접근은 한 가정에 한 가지 대표 전력부하 프로파일만을 제시하는 기존 연구들과 달리 다양한 모습의 전력부하 프로파일을 예측하도록 돕는다. 여러 가정으로 이루어진 수용가의 전력부하 프로파일은 이러한 확률적 접근을 통해서 예측 가능하다.

2. 상향식 접근 방법

이 연구는 상향식 접근 방법에 기초해 가정의 전력부하 프로파일을 예측하는 방법을 논의한다. 이는 가정의 전력부하를 이루는 가장 작은 단위, 즉, 가전기기의 전력부하 프로파일을 예측하고, 여러 가전기기의 전력부하 프로파일을 중첩하여 가정의 전력부하 프로파일을 재현하는 방법을 뜻한다. Fig. 1은 상향식 접근 방법을 통한 전력부하 프로파일 예측의 예를 보여준다. 가전기기 한 품목의 전력부하 프로파일을 $p_{app}(t)$, 가정의 전력부하 프로파일을 $p_{total}(t)$라 할 때,

$$p_{total}(t) = \sum_{app} p_{app}(t) \quad (1)$$
$$(app = TV,\ fridge,\ lighting1,\ lighting2, \cdots)$$

상향식 접근은 위 식과 같이 간단한 형태로 표현할 수 있다.

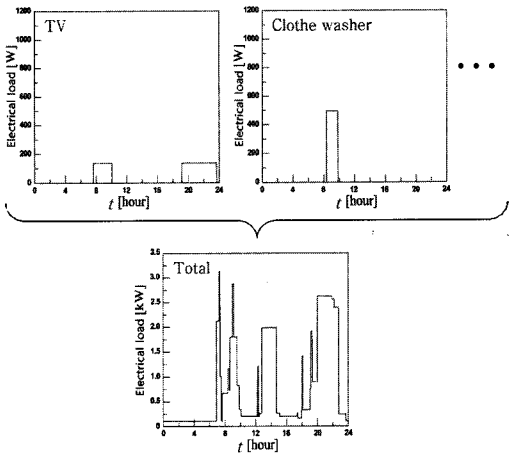


Fig. 1 Example of predicting residential electrical load profile by using bottom-up approach.

2.1 가전기기의 전력부하 프로파일

가전기기의 소비전력이 해당 기기의 평균 소비전력 $p_{app,avg}$로 일정하고, 대기전력은 0인 것으로 가정하자. 이때 가전기기의 전력부하 프로파일 $p_{app}(t)$는 Fig. 2의 형태로 나타낼 수 있으며, 이를 함수로 표현하면 아래와 같다.

$$p_{app}(t) = p_{app,avg} \sum_{i=1}^{N_{app}} u(t - t_{app,i}) - u(t - (t_{app,i} + \Delta t_{app,i})) \quad (2)$$

위 식의 $u(t)$는 단위 계단함수로 양수 t에서 1의 값, 음수 t에서 0의 값을 갖는다. 즉, 식(2)의 $p_{app}(t)$는 해당 가전기기의 i번째 작동 시각 $t_{app,i}$부터 평균 소비전력 $p_{app,avg}$의 값, i번째 작동 유지 시간 $\Delta t_{app,i}$가 흐른 후의 시각 $t_{app,i}+\Delta t_{app,i}$부터 0의 값을 갖는다. 이러한 on-off 거동은 가전기기의 일일 사용횟수 N_{app}과 동일한 횟수로 발생한다. 식(2)에서 가전기기의 평균 소비전력 $p_{app,avg}$는 기존 통계 자료[8]에 가전기기의 품목, 용량별로 정리되어 있으며, 작동 시각 t_{app}와 연속 작동 시간 Δt_{app}는 이하의 방법으로 추정할 수 있다.

2.1.1 일일 작동 시각 t_{app}

가전기기의 일일 i번째 사용 시각 $t_{app,i}$는 해당 가전기기의 시각별 사용 확률 $f_{app}(t)$로부터 확률적으로 추정된다. 전산(電算)의 사용은 이러한 확률적 추정에 필수적으로 사용되며, 이 연구는 전산이 생성한 난수와 $f_{app}(t)$를 비교하여 $t_{app,i}$를 추정하는 방법을 사용한다. 1회 시행이 차지하는 시간을 h, j번째 시행에서 생성된 난수를 $r^{(j)}$라 하자. 이때 $t_{app,i}$는 Fig. 3의 알고리즘으로 추정된다.

가전기기의 일일 시각별 사용 확률은 기존 통계 자료[8-10]의 일일 시각별 소비전력을 사용하여 구한다.

$$f_{app}(t) = N_{app}\, p_{app}(t) / \int_0^{24} p_{app}(t)\, dt \quad (3)$$

기존 통계 자료의 일일 시각별 소비전력은 이산 자료 형태(t = 1시, 2시, …, 24시)로 주어지므로, 식(3)의 연속된 시간(0시 < t < 24시)에 대한 시각별 소비전력 $p_{app}(t)$는 이를 근사하여 얻는다.

식(3)에서 가전기기의 일일 사용횟수 N_{app}는 기존의 통계 자료[9]로부터 얻을 수 있으나, 해당 자료가 존재하지 않으면 아래와 같이 추정한다.

$$N_{app} \approx \sum_{t=1}^{24} p_{app}(t) / (24\, p_{app,avg}) \quad (4)$$

위 추정은 가전기기의 일일 시각별 소비전력 $p_{app}(t)$와 작동 시 평균 소비전력 $p_{app,avg}$가 동일한 표본 집단의 통계일 때 유효하며, 냉장고와 같이 on-off가 빈번한 가전기기에 적용 된다.

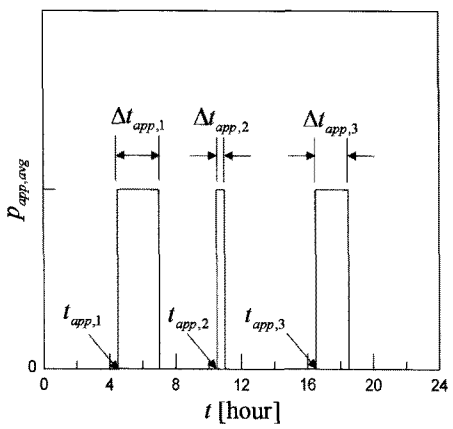


Fig. 2 Shape of electrical load profile of an appliance.

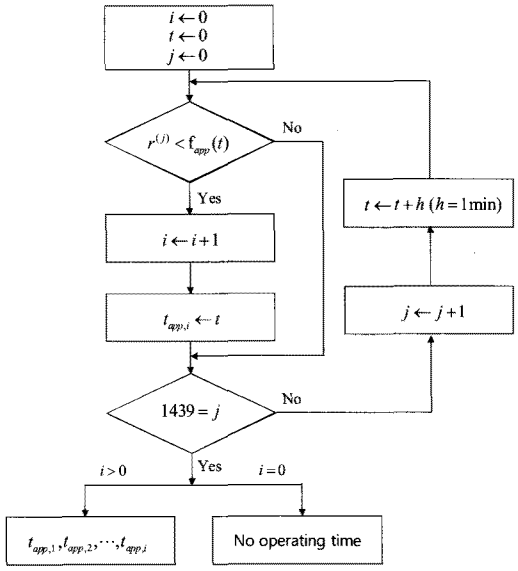


Fig. 3 Algorithm of predicting operating time of appliances by stochastically estimate.

2.1.2 연속 사용 시간 $\Delta t_{app,i}$

기존 통계 자료에 1회 사용 시간이 주어진 가전기기(세탁기, 청소기, 전자레인지 등)의 경우 이는 곧 해당 가전기기의 연속 사용 시간 $\Delta t_{app,i}$와 같다. 그러나 일일 사용 시간만이 주어지고, 일일 1회 이상 사용되는 가전기기(TV, 컴퓨터, 조명 등)의 $\Delta t_{app,i}$를 구하기 위해서는 별도의 추정 방법이 요구된다. 가장 쉬운 방법으로 일일 사용 시간을 일일 사용 횟수로 나누는 방법을 들 수 있다. 그러나 TV 등의 사용 행태(오전과 오후의 연속 시청 시간이 다르다)을 살필 때, 이는 타당하지 못한 것으로 보인다. 이 연구는 각 가전기기의 시각별 사용 확률의 형태로부터 해당 가전기기의 연속 사용 시간 $\Delta t_{app,i}$를 추정하였다. 일일 사용 횟수가 N_{app}인 가전기기의 일일 시각별 사용 확률은 대개 N_{app}개의 부분적 확률분포(정규분포의 형태 유사한)로 이루어져 있음에 주목하자.

$$f_{app}(t) = f_{app,1}(t) + f_{app,2}(t) + \cdots + f_{app,Napp}(t) \quad (5)$$

예로 일일 사용 횟수가 약 3회인 TV의 일일 시각별 사용 확률은 Fig. 4와 같이 3개의 부분적인 정규분포가 중첩한 형태를 보인다. 이 연구는 i번째 부분 정규분포 $f_{app,i}(t)$의 넓이가 전체 넓이에서 차지하는 비중이 $\Delta t_{app,i}$가 일일 총 사용 시간 $\Delta t_{app,total}$에서 차지하는 비중과 동일한 것으로 가정한다.

$$\Delta t_{app,i} = \Delta t_{app,total} \int_0^{24} f_{app,i}(t)dt \quad (i = 1, 2, \cdots, N_{app}) \quad (6)$$

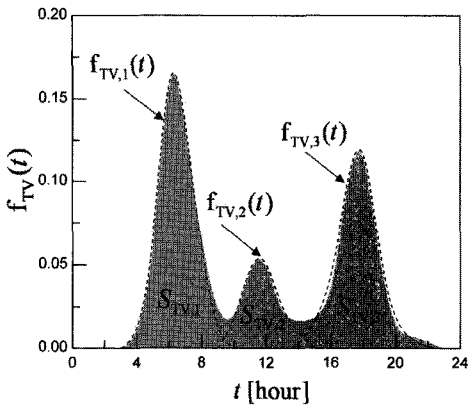


Fig. 4 Hourly probability on operation of TV and its partial probability distribution.

따라서 Fig. 4의 경우 TV의 연속 사용 시간 $\Delta t_{TV,1}$, $t_{TV,2}$, $t_{TV,3}$의 비는 $S_{TV,1}$, $S_{TV,2}$, $S_{TV,3}$의 비와 같다.

2.1.3 계절용 가전기기

각 가전기기의 t_{app}와 Δt_{app}를 추정하고 이를 식(2)에 대입하면 해당 가전기기의 전력부하 프로파일이 재현된다. 단, 이는 일일 사용 시간이나 사용 횟수 등이 연중 일정한 가전기기에 한하며, 계절용 가전기기와 일일 사용 시간이나 사용 횟수가 계절에 따라 변화하는 경우 별도의 재현 방안이 필요하다. 이 연구는 계절용 가전기기의 일일 사용 횟수 N_{app}를 계절에 따라 변화시켜 식(2)와 식(3)에 대입하는 방법을 사용한다. 전력거래소는 월별 냉방일수와 난방일수에 관한 자료[8]를 제공하고 있으며, 이 연구는 에어컨과 같은 냉방용 기기에 월별 냉방일수, 전열기나 전기장판과 같은 난방용 기기에 월별 난방일수를 일괄 적용한다.

2.2 가정의 전력부하 프로파일

이 연구는 국내 가정을 월평균 전력사용량에 따라 총 세 가지 종류로 분류한다. 전력 저소비형 가구는 월평균 200 kWh 이하, 전력 중소비형 가구는 월평균 200~350 kWh, 고소비형 가구는 월 평균 350 kWh 이상의 전력을 소비하는 가구를 뜻한다. 기존의 통계 자료[8]는 위와 같이 분류된 가구들이 보유하고 있는 가전기기(품목, 용량)을 Table 1 및 Table 2와 같이 제공하고 있다. 이러한 통계 자료는 월평균 전력소비량의 차이가 각 가전기기 평균 소비전력의 차이는 물론 보유 품목 수(또는 동일 품목의 보유 대수)의 차이와도 연관되어 있음을 보여준다. 즉, 서론의 언급과 같이 가정의 전력소비량과 전력부하 프로파일이 단지 가구의 면적에 비례한다는 가정은 타당하지 못하다.

가정의 전력부하 프로파일은 첫째 해당 가정의 가전기기 보유 품목을 선정하고, 둘째 보유 품목에 속한 각 가전기기의 전력부하 프로파일을 재현한 뒤, 셋째 모든 가전기기의 전력부하 프로파일을 중첩하는 순서로 이루어진다.

3. 전력부하 프로파일 예측 프로그램

이 연구는 각 가전기기의 전력부하 프로파일을 확률적으로 재현하고, 이로부터 가정의 전력부하 프

Table 1 List and number of possession of household appliances in compliance with a categorized electricity-consumption range[8]

Classification	List of household appliances(number of possession)
Low (below 200 kWh)	TV(1), Clothes washer(1), Electric rice-cooker(1), Computer(1), Fridge(1), Electric fan(1), Electric iron(1), Hair dryer(1), Microwave(1), Vacuum cleaner(1), Light bulb(2), Fluorescent light(5), Other light(1)
Middle (200~ 350 kWh)	TV(1), Clothes washer(1), Electric rice-cooker(1), Computer(1), Fridge(1), Electric fan(2), Electric iron(1), Hair dryer(1), Microwave(1), Vacuum cleaner(1), Electric mixer(1), Kim chi fridge(1), Air conditioner(1), Electric pad(1), Light bulb(3), Fluorescent light(5), Other light(1)
High (upper 350 kWh)	TV(2), Clothes washer(1), Electric rice-cooker(1), Computer(1), Fridge(1), Electric fan(2), Electric iron(1), Hair dryer(1), Microwave(1), Vacuum cleaner(1), Electric mixer(1), Kim chi fridge(1), Air conditioner(1), Electric pad(1), Humidifier(1), Desk lamp(1), Light bulb(3), Fluorescent light(7), Other light(1)

Table 2 Electrical consumption of main household appliances in compliance with a categorized electricity-consumption range[8]

Classification	Low [W]	Middle [W]	High [W]
TV	132	150	165
Clothes washer	498	511	510
Computer	151	150	157
Fridge	43	51	57
Microwave	1025	1076	1073

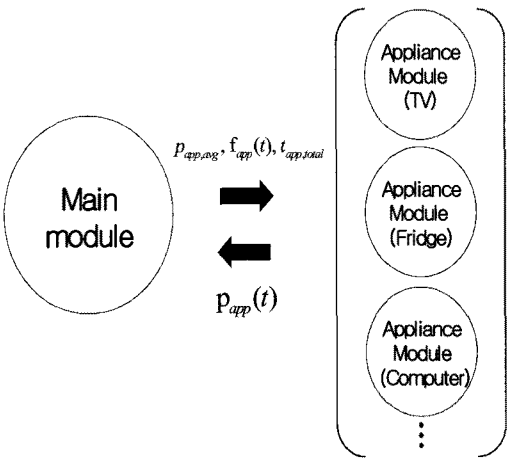


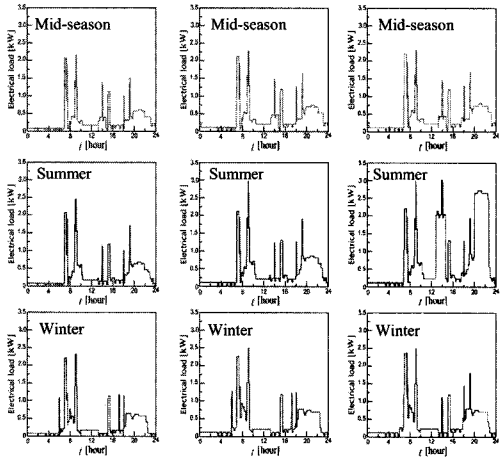
Fig. 5 Schematic of simulation program.

로파일을 예측한다. 이러한 확률적 재현은 전산의 사용을 요구하며, 이 연구는 컴퓨터(LabVIEW, National Instrument)를 사용해 가정의 전력부하 프로파일 예측 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 Fig. 5와 같이 각 가전기기의 정보(평균 소비전력, 시각별 사용 확률 등)를 입력 받아 해당 기기의 전력부하프로 파일을 출력하는 가전기기 모듈들과 모든 가전기기 모듈이 출력한 전력부하 프로파일을 중첩해 가정의 전력부하 프로파일을 생성하는 메인 모듈로 이루어져 있다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 앞서 분류한 각 종류 가정의 전력부하프로파일을 확률적 접근 없이 구한 결과(각 가전기기의 작동 시각은 해당 가전기기의 작동 확률이 가장 높은 시각으로 고정)이다. 즉, 이는 국내 표준가정의 대표적인 전력부하 프로파일이다. Fig. 7은기존 연구[5]가 제시한 캐나다 표준 가정의 대표 전력부하 프로파일이다. Fig. 6이나 Fig. 7의 전력부하 프로파일은 해당 지역에 설치되는 가정용 분산전원의 시뮬레이션을 통한 경제성 평가[1]나 최적 운용 계획 마련[2] 등에 기초 자료로써 활용된다.

기존 연구들이 제시한 대표 전력부하 프로파일은 확률적 접근을 배제하고 있으므로, 여러 가정으로 구성된 수용가(다세대 주택, 공동주택 등)의 전력부하 프로파일을 예측하는 것에 한계를 갖는다. 예로 100개의 대표 전력부하 프로파일을 중첩한 것과 100세대의 실제 전력부하 프로파일은 상이한 형태를 보인다. 전자는 단지 대표 전력부하 프로파일(Fig. 6)과 동일한 형태를 보이고, 후자는 보다 완만한 형



(a) low (b) Middle (c) High

Fig. 6 Typically seasonal residential electrical load profile of Korea in compliance with a categorized electricity-consumption range.

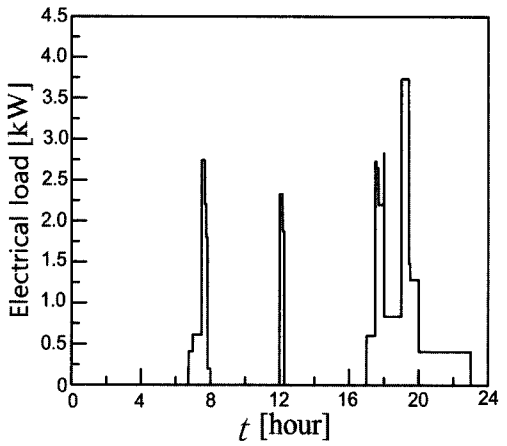


Fig. 7 Standard residential electrical load profile of Canada.[5]

태를 갖는다. 이 연구는 확률적 접근을 통해 전력부하 프로파일을 예측함으로써 대표 전력부하 프로파일이 갖는 이러한 단점을 해결하고 있다. 한 가정의 전력부하 프로파일이 통계적으로 다양한 형태를 가짐에 따라 이들을 중첩하여 얻은 여러 가정 수용가의 전력부하 프로파일 역시 실제에 가까운 형태를 보이는 것이다. 이 연구의 '확률적 접근을 통한 전력부하 프로파일 예측'은 다음의 방법으로 그 타당성을 가늠할 수 있다.

① 기존 통계 자료로부터 여러 가구를 표본 집단으로 조사된 전력부하 프로파일을 얻는다.
② 이 연구의 방법을 사용하여 ①의 자료와 동일한 가구 수의 전력부하 프로파일을 재현한다.
③ ①의 전력부하 프로파일과 ②의 전력부하 프로파일을 비교하여 타당성을 검증한다.

이 연구는 ①항에서 언급한 기존 통계 자료로 총 1,500,000가구를 표본 집단으로 하여 조사된 전력부하 프로파일[6](일일 평균 전력부하를 1000으로 환산한 상대 계수를 사용)을 선정하였다. 이 통계 자료의 표본집단은 월평균 전력사용량은 전력 중소비 가구(200~350 kWh) 범위에 속한다. Fig. 8는 해당 통계 자료와 이 연구의 방법으로 예측된 1, 100, 10,000, 1,500,000가구 수용가의 전력부하 프로파일을 비교(상대계수로 환산하여 표현)하고 있다. Fig. 8은 전력부하 프로파일 예측에서 고려한 총 가구 수가 실측 자료의 총 가구 수에 가까워질수록 두 전력부하 프로파일이 점차 일치하게 됨을 보여준다. Table 3은 Fig. 8의 1,500,000가구에 대한 예측 전력부하 프로파일과 실측된 전력부하 프로파일을 시각별로 평균하여 비교한 결과이다. 두 전력부하 프로파일은 약 7.2%의 평균 오차를 보이며, 한 시간 단위를 기준한 오전과 오후의 첨두부하 발생 시각은 완전히 일치하는 모습을 보인다. 즉, 이 연구의 확률적 접근을 통해 여러 가정 수용가의 전력부하 프로파일을 예측한 결과는 실제 전력부하 프로파일과 잘 일치하고 있다.

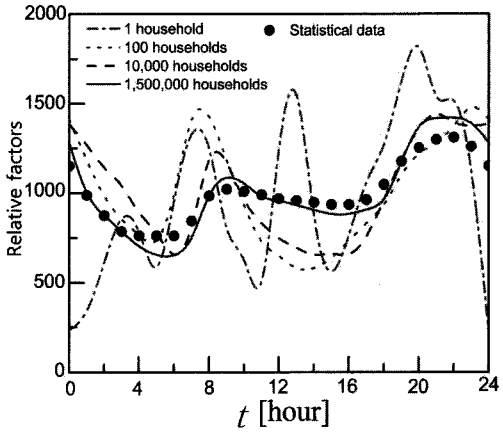


Fig. 8 Comparison of relative factors of electrical load profiles predicted by simulation and statistical data.[6]

Table 3 Comparison of relative factors of electrical load profile of 1,500,000 households predicted by simulation and statistical data[6]

Time	Prediction	Statistics	error[%]
0	1279	1151	11.1
1	968	989	2.1
2	877	876	0.1
3	786	786	0.0
4	698	763	8.5
5	650	762	14.7
6	639	762	16.2
7	711	845	15.9
8	1026	986	4.0
9	1106	1022	8.3
10	1062	1010	5.2
11	968	991	2.3
12	960	969	0.9
13	934	958	2.5
14	906	949	4.5
15	881	937	6.0
16	879	937	6.2
17	910	964	5.6
18	930	1047	11.2
19	1179	1177	0.2
20	1404	1252	12.1
21	1417	1298	9.2
22	1422	1309	8.7
23	1407	1259	11.7

5. 결 론

이 연구는 가정의 전력부하 프로파일 예측 방법을 논의하였다. 이 연구의 결과물은 국내 가정(월평균 전력소비량에 따라 세 종류로 분류)의 대표 전력부하 프로파일과 확률적 접근 방법이 적용된 가정의 전력부하 프로파일 예측 프로그램이다. 특히, 전력부하 프로파일 예측 프로그램의 타당성은 프로그램이 예측한 전력부하 프로파일과 실측된 전력부하 프로파일과 비교하여 검증하였다. 검증 결과 이 연구에서 개발한 프로그램은 약 7.2%의 평균 오차로 전력부하 프로파일을 잘 예측하고 있다.

후 기

이 논문은 지식경제부의 에너지자원기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2009T100200107).

참고문헌

1. Lee, J. S., Park, T. W. and Lee, T. S., 2006, A Development of the software to estimate of economics for combined heat and power generation systems in apartment estates, The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineering of Korea, Vol. 35, No. 11, pp. 21-28.
2. Peacock, A. D. and Newborough, M., 2007, Controlling micro-CHP systems to modulate electrical load profiles, Energy, Vol. 32, No. 7, pp. 1093-1103.
3. Choi, K. S. and Yang, S. K., 2008, Study on the Oversea Technology Development of Electric Power Storage System and It's Domestic Application, Proceedings of the Korean Institute of illuminating and Electrical Installation Engineers Conference, pp. 57-60.
4. Knight, I., Kreutzer N., Manning, M., Swinton, M., and Ribberink. H., 2007, European and Canadian non-HVAC Electric and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Cogeneration Systems, IEA/ECBCS Annex 42 Report.
5. Bell, M., Swinton. M., Entchev, E., Gusdorf, J., Kalbfleisch, W., Marchand, R., and Szadkowski, F., 2003, Delopment of Micro Combined Heat and Power Technology Assessment Capability At the Canadian Centre for Housing Technology, CCHT Report, B-6010.
6. Hong, S. Y., 2007, Analysis of End-User's Electric Power Consumption Trend Using Load Curve, KEMCO Report.
7. Kim, D. J., 2005, Model Development of Daily and Hourly Electric Power Load for Small Dispersion Generation System, MS thesis, Chungnam University, Daejeon, Korea.
8. Kim, K. S, Park, C. S., Kim, W. S., and Bin,

C. W., 2009, 2009 Survey on electricity consumption characters of home appliances, KPX Report.
9. Lee, S. K., Park, T. S., Lee, J. S., Ryu, Y. S., Ahn, J. H., and Chung, C. B., 2009, 2008 Energy consumption survey, KEEI Report.
10. Hong, S. Y., 2003, Study on power consumption trend of home appliance, KEMCO Report.