

## 심야전력을 이용한 에너지저장 및 부하율 향상에 대한 연구

박석인, 정봉만, 한수빈, 정학근, 김규덕, 유승원

한국에너지기술연구소 전기에너지연구팀

### Development of an Electrical Load Management System

Sukin Park, Bongman Jung, Soobin Han, Hakgeun Jeong, Gyuduk Kim, SeungWeon Yu

Korea Institute of Energy Research, Electric Energy Research Team

#### Abstract

The recent problems such as the rapid increase of electricity consumption, the large variation of electrical loads, and the sitting difficulty for new power plants could become a barrier to stable electrical power supply.

Consequently, an electrical load management technology has become important, by which an electricity can be stored during off-peak time and efficiently used during peak time.

The technology provides a variety of direct or indirect benefits which include, for utilities, reduction of new power plants, economical electricity production, and improved efficiency and reliability of power system and for consumers, low prices of electricity.

The study is to develop a proto-type load management system and its application technology for a peak shaving. In the system, conventional batteries are used as energy storage device.

#### 1. 서론

최근 크린에너지인 전력수요의 급증, 발전소 입지 선정의 어려움, 주야간대 수요격차의 심화등이 전력의 안정적 공급에 커다란 불안 요소로 작용하고 있다. 이러한 문제해결을 위해서는 심야의 경부하시 에너지를 저장하였다가 주간 피크부하시 일정부하를 분담하여 최대부하를 억제하고 부하평준화를 이룩함으로써 신규발전설비의 건설을 억제하고, 기저부하용 발전설비의 이용률을 향상시키고, 전력공급의 신뢰성

향상을 이룰 수 있는 전력의 부하관리 기술개발 및 응용기술 개발이 절실히 요구되고 있다.

축전지를 이용한 전력저장기술은 운전특성이 우수하고, 모듈화 양산이 가능하고, 기술적으로나 자원적으로 큰 문제가 없는 등 여러 장점으로 부하관리용 에너지 저장기술의 하나로 많은 연구가 시도되고 있다. 다만 부하관리 단일목적으로는 경제성이 뒤진다는 단점으로 실용화 시기가 다소 늦어지고 있지만, 최근 많이 보급되고 있는 무정전전원장치와 연계한 축전식 전력저장기술이 개발될 경우 경제성을 높일 수 있어 본 연구는 무정전전원공급기능을 겸용하는 축전식 복합부하관리시스템의 개발을 목표로 하여 시스템을 구성하고 부하관리목적으로서의 실험을 통해서 그 동작특성을 분석하고 경제성에 대해 평가하고자 한다.

#### 2. 국내외 기술 개발 현황

축전지를 이용한 전력저장기술은 다양한 응용분야를 갖는 무정전 전원장치와 소용량의 각종 전기기기에 보편적으로 사용되고는 있으나 부하관리목적으로서의 응용은 외국에서의 부분적인 실용화를 제외하고는 아직 연구단계에 있다. 즉, 외국의 경우 독일 등에서 전철의 부하평준화용 등에 실용화되어 있기도 하며 일본에서는 태양전지에 의한 발전과 소용량 축전식 부하관리기법이 시험 개발된 바 있다. 궁극적으로 축전지의 부하관리용으로서의 본격적인 응용은 개량형 축전지의 개발에 따라 확대될 것으로 전망되고 있다.

미국의 경우 1976년부터 10년동안 1.8MW급의 축전식 부하관리장치의 시험운전을 거쳐, 1988년에는 배전용 변전소에 10MW급 부하관리설비를 설치하여 운전중에 있다. 또 Johnson, Crescent와 같은 배전회

사를 중심으로 수백 kW급의 부하관리장치를 운전중이다.

일본의 경우 Moon Light계획에 의해 신형전지개발을 포함한 전지전력저장시스템 연구가 진행중이며, 관서지역의 타쓰미 변전소에 10MW급을 설치하여 부하관리용으로 실증 실험중에 있다.

독일의 경우 BEWAG사가 베르린에 17MW규모의 설비가 설치되었으며, AEG사는 남아프리카의 광산에 침투부하 제거용으로 4MW의 설비를 운영한 바 있다.

국내의 경우 1992년 한국에너지기술연구소에서 납축전지를 이용한 170kW/800kWh급 전력저장설비가 에너지저장 측면에서 연구된 바 있으나, 부하관리용으로의 연구는 미흡한 실정이다.

<표 1> 주요 전력저장기술의 경제성 비교

저장기술	양수발전	축전지	Fly Wheel	초전도코일	공기압축
전력관련 (\$/kW)	600	200	140	140	500
에너지관련 (\$/kWh)	20	118	300	160	5

### 3. 10kW/30kWh 복합 부하관리시스템

복합 부하관리시스템은 심야의 경부하시 전력을 저장하였다가 주간 중부하시 일정량의 부하를 분담하는 주 기능외에 전압변동 및 주파수 변동, 순간정전 등 불규칙한 상용전원을 수전하여 예고정전 또는 사고정전시 연속적인 전원을 부하측에 공급하고 순간정전 및 과도전압 발생시 또는 노이즈 및 서지발생시 기기를 보호하며 전압변동 등에 의한 기기의 오동작을 방지하기 위하여 정전압, 정주파수, 무정전의 양질의 전원을 공급하는 장치이다.

단상 주전력회로도는 [그림 1]과 같다. 3상 220V 교류전원을 입력으로 사용하며, 정류기부는 자연 전류(Natural Commutation)방식에 의한 사이리스터 위상제어 정류기로서 출력전압을 일정하게 유지하면서 인버터부에 직류전압을 공급하고 또한 축전지는 인버터의 전압원으로서 무순단으로 부하에 전원을 공급할 수 있도록 한다. 인버터 출력단과 부하단 사이에는 부하측에 의한 인버터 손상을 방지하기 위해 보호용 스위치가 설치되어 있으며, 이는 바이패스부의 스테틱 스위치와 함께 시스템 절체를 자동으로 수행한다. 바이패스부는 인버터부에 이상 발생시 스테틱 스위치를 통해 무순단으로 상용 전원을 부하에 공급하며, 이상상태 해소시 인버터부로 자동절체된다. 수동 바이패스는 복합 부하관리장치를 부하측과 완전히 분리시키는 역할을 하며, 시스템 유지 보수시 사용된다.

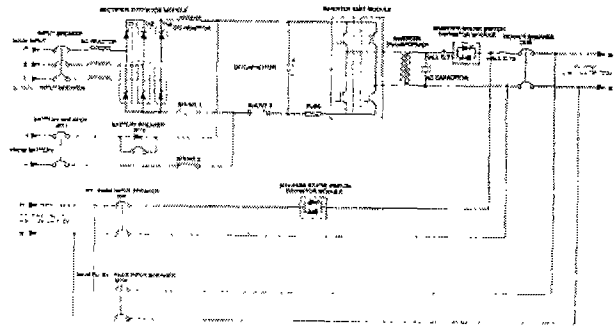


그림 1. 주 전력회로도

### 4. 부하관리 실험 및 평가

제작된 복합 부하관리시스템으로 [그림 2]의 부하 패턴으로 부하실험을 하였다.

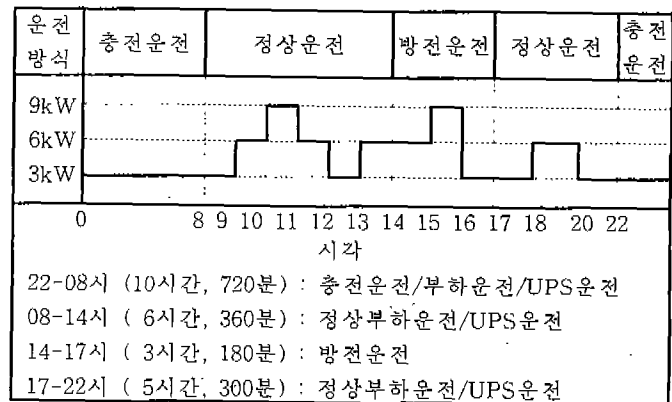


그림 2. 일 부하곡선과 운전 계획

그림에서 보듯 심야 축전운전 시간대는 한전의 심야 시간대와 동일한 22시에서 익일 08시까지로 하였으며, 침투부하 방전운전 시간대는 계절과 요일 등에 따라 변화하나 일반적으로 하절기 에어컨 부하에 의해 침투부하가 발생되는 14시에서 17시까지로 가정하였다. 그리고 그 이외의 시간대는 정상부하 운전으로 이때는 축전지의 충방전에너지없이 계통전력만으로 복합 부하관리시스템이 운전된다. 이상의 모든 경우 입력계통의 순간정전 또는 이상 발생시 즉각 무정전 전원공급장치로써 운전되어 전력부하관리와 무정전 전원공급기능을 복합하게 된다.

일반적으로 무정전 전원공급장치는 24시간 정격에 가깝고 부하변동이 작은 부하패턴에 많이 적용되지만, 본실험에서는 복합 부하관리시스템의 폭넓은 부하범위에 성능을 평가하기 위해 매 시간마다 부하를 변화하면서 각 부위에서의 전력과 에너지흐름, 효율 등을 측정, 분석하였다.

#### 4.1. 각 부위별 입출력 특성

##### 가. 정류기 입출력 특성

앞의 방법으로 실험한 정류기 계통의 입출력 특성은 <표 2>와 같다.

<표 2> 정류기 입출력 특성

운전방식	정상운전			방전운전 <sup>1)</sup>			충전운전 <sup>2)</sup>
	부하 내용	3kW	6kW	9kW	3kW	6kW	9kW
입력(kW)	3.95	6.78	9.90	-	-	-	4.88
출력(kW)	3.55	6.26	9.19	-	-	-	4.49
효율(%)	89.8	92.3	92.8	-	-	-	92.0

- 1) 방전운전시 정류기 동작하지 않음
- 2) 충전운전시 정류기는 부하전력과 충전전력을 동시 감당.

<표 2>에서 보듯 정상운전시 3kW부하에서 정류기 효율은 89.8%인 반면 6kW에서는 92.3%, 9kW에서는 92.8%로 부하가 증가함에 따라 효율이 증가함을 볼 수 있다. 또한 방전운전시 정류기는 동작을 하지 않으며, 충전운전시는 정류기가 부하전력과 충전전력을 동시에 감당하여 축전지의 충전상태에 따라 정류기 전력이 변화하게 된다. 즉, 정류기의 효율은 부하에 따라 변화하며, 정격의 80%운전시의 효율은 약 92.5%이다.

##### 나. 인버터 입출력 특성

앞의 방법으로 실험한 인버터 계통의 입출력 특성은 <표 3>와 같다.

<표 3> 인버터 입출력 특성

운전방식	정상운전			방전운전 <sup>1)</sup>			충전운전 <sup>2)</sup>
	부하 내용	3kW	6kW	9kW	3kW	6kW	9kW
입력(kW)	3.64	6.31	9.18	3.53	6.22	9.01	3.65
출력(kW)	2.79	5.51	8.35	2.81	5.52	8.29	2.79
효율(%)	76.7	87.3	91.0	79.7	88.8	92.0	76.5

- 1) 방전운전시 정류기 동작하지 않음
- 2) 충전운전시 정류기는 부하전력과 충전전력을 동시 감당.

<표 3>에서 보듯 정상운전시 3kW부하에서 인버터 효율은 76.7%인 반면 6kW에서는 87.3%, 9kW에서는 91.0%로 부하가 증가함에 따라 인버터효율이 크게 증가함을 볼 수 있다. 이는 부하증가에 따른 고정손실비율이 줄어들기 때문으로 판단된다. 또한 방전운전시는 정류기 출력전력을 이용하는 정상운전보다 인버터 효율이 약 1~2%정도 높는데 이는 정류기는 전압파형이 왜울을 갖는 직류인 반면, 축전지 전압은 왜울이 없는 직류전원으로써 이에 따른 손실 감소로 평가된다. 즉, 인버터 효율은 부하에 따라 변화하며, 정격의 80% 운전시의 효율은 약 90%이다.

#### 4.2. 복합 부하관리시스템의 에너지 특성 분석

[그림 2]의 부하곡선과 운전방식에 따른 복합 부하관리시스템의 에너지 흐름은 [그림 3]과 같다.

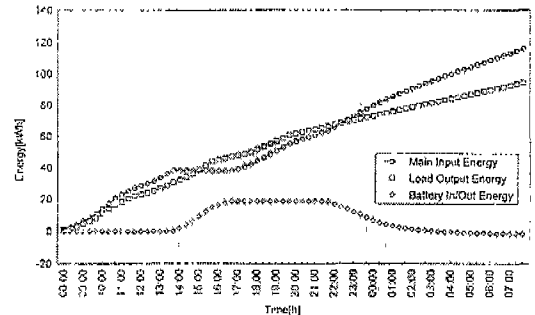


그림 3. 복합부하관리시스템의 에너지흐름

그림에서 보듯 8시부터 14시까지는 부하에너지 축적에 따라 계통 입력 에너지는 증가하며, 축전지의 에너지 변화는 없다. 14시부터 17시까지 3시간 동안은 주간 첨두부하 시간대로써 계통 입력에너지는 변화가 없고 축전지의 방전에너지가 시간에 따라 증가하게 된다. 또한 17시 부터 22시까지의 정상운전 기간동안에는 계통 입력에너지만 증가하고 축전지의 에너지 변화는 없으며, 22시 부터 익일 8시까지는 충전운전 방식으로 계통 에너지는 부하 에너지와 충전 에너지의 합으로 증가함을 볼 수 있다.

이상의 실험 결과 최종 계통 입력에너지는 115.8 kWh이며, 총 부하에너지는 94.34kWh이며, 총 방전에너지는 18.8kWh, 총 축전에너지는 19.5 kWh이었다.

#### 4.3. 복합 부하관리시스템의 효율 분석

이상의 실험 결과 복합 부하관리시스템의 각 부위별 에너지 변환효율은 부하의 크기에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 본 연구에서 개발하는 복합 부하관리시스템은 기본적으로 무정전 전원공급기능을 필요로 하는 전력시스템에 축전지용량의 증대와 적절한 제어장치의 구성으로 전력부하관리 기능을 부가한 복합부하관리 시스템으로써, 일반적으로 부하는 24시간 365일 안정된 전력을 요구하는 특정 부하를 대상으로 한다. 이 경우 부하율은 대략 80%정도를 상회하며, 만약 이보다 부하율이 낮은 경우 별도의 부하를 대상으로 부하관리를 할 수 있어 전체 평균 부하율을 80%로 가정하여 효율을 분석하기로 한다.

<표 2>에서 정류기 효율은 부하에 따라 변화하며 80% 부하에서 약 92.5%의 효율을, <표 3>에서 인버터도 부하에 따라 변화하여 80%의 부하에 약 90%의 효율로 운전되는 것을 알 수 있다. 또한 [그림 3]에서 총 방전전력은 18.8kWh이며, 총 충전전력은 19.5kWh이

며, 최종 계통 입력에너지는 115.8 kWh, 총 부하에너지는 94.34kWh로 총 입력에너지에 대한 출력에너지효율은 약 81.5% 이었다.

## 5. 소용량 축전식 부하관리시스템 적용성 검토

무정전 전원공급장치겸용 부하관리장치의 용량 및 출력용량은 사용 목적, 부하범위 등에 따라 다르게 되나 일반 업무용 전산실의 경우 컴퓨터, 주변기기 및 전용 냉방기기를 포함한 약 10kW의 부하를 담당하는 것으로 하여 적용성을 검토해 보기로 한다.

소요비용은 이 경우 전력변환장치의 용량은 10kW가 되며, 여름철 첨두부하가 예상되는 오후 2시 - 5시까지의 3시간 동안 특정부하를 담당한다고 할 경우 출력 용량은 30kWh가 된다. 이때 인버터는 기존의 무정전 전원공급장치용 인버터를 그대로 활용할 수 있으므로 별도의 비용이 소요되지 않는다. 다만 축전지 용량 증가에 따른 축전지 가격과 총방전 시간대를 제어하는 장치에 대한 추가 비용이 발생하게 되며, 인버터 효율 90%, 안전율 0.8, 방전심도 0.83으로 가정하여 추가되는 비용을 대략적으로 산정하면 다음과 같다.

### 0 감시제어장치

전력스위치와 Timer, 릴레이구동장치 ; 50만원

### 0 축전지 : 52kWh

무보수 밀폐형 2차전지를 사용할 경우 : 427만원 (8.5만원/kWh기준)

여기서 여름철 냉방기간을 60일, 축전지Cycle수를 600이라 할 경우 축전지의 수명은 10년이며, 감시제어장치의 수명을 10년이라 할 때 이율을 무시한 감가상각비만 고려한 연간 소요금액은

$$\begin{aligned} \text{연간소요금액} &= \text{감시제어장치비용(원)/10년} + \text{축전지비용(원)/10년} \\ &= 500,000\text{원}/10\text{년} + 4,270,000\text{원}/10\text{년} = 477,000\text{원/년} \end{aligned}$$

이다

이득을 분석해보면 다음과 같다.

### 0 수용가

○ 심야전력 사용에 의한 전력요금 절감 업무용 전력요금의 평균은 78.2원/kWh를 값싼 심야전력 요금 22.4원/kWh로 대체 하므로 전력요금을 줄일 수 있다. 부하관리장치의 출력용량을 30kWh, 전력변환 장치효율 0.9, 축전지 효율 0.87이라 할 경우 이에 따른 연간 총 절감액(60일 기준)은

$$\begin{aligned} \text{1일절감액} &= \text{주간전력요금} - \text{심야전력요금} / \text{인버터효율} / \text{축전지효율} \\ &= 30\text{kWh} * 78.2\text{원/kWh} - 30\text{kWh} * 22.4\text{원/kWh} / 0.90 / 0.87 \\ &= 2,346\text{원} - 858\text{원} = 1,488\text{원/일} \end{aligned}$$

$$\text{연간 총절감액} = \text{1일 절감액} * 60\text{일/년} = 89,280\text{원/년}$$

○ 기본요금 절감 : 10kW용 부하관리 장치를 설치할 경우 최대 수요전력을 10kW줄일 수 있으므로 이에 따

른 기본요금을 줄일 수 있다. 업무용 전력의 기본요금은 4,370원/kW로 연간 총 기본요금 절감액은

$$\begin{aligned} \text{연간 기본요금절감액} &= 4,370\text{원/kW} * 10\text{kW} * 12\text{월/년} \\ &= 524,400\text{원/년} \end{aligned}$$

### 0 전력공급자

첨두부하를 10kW줄일 수 있기 때문에 발전설비 투자비용 800만원(\$1000/kW기준), 송배전설비 증설 및 주변기기 감소에 따른 부대설비 비용 320만원(발전설비의 40%)의 감소 효과가 있다.

여기서 발전설비 및 부대설비의 수명을 20년이라 할 때, 이율을 무시한 감가상각비만 고려할 경우 연간 이득금액은

$$\begin{aligned} \text{연간이득금액} &= \text{연간 수용가 이득} + \text{연간 전력공급자 이득} \\ &= (89,280 + 524,400)\text{원/년} + (8,000,000 + 3,200,000)\text{원}/20\text{년} \\ &= 1,173,680\text{원/년} \end{aligned}$$

이 된다.

이상에서 볼 때 10kW, 30kWh의 무정전 전원공급장치겸용 부하관리장치를 도입할 경우 축전지와 부가적인 제어장치설치에 소요되는 연간 비용은 약 48만원인 반면, 전력공급자의 이득을 포함한 연간 총 이득액은 약 117만원(수용가 이득 61만원, 전력공급자 이득 57만원)으로 현실적 적용 가능성이 매우 높은 것으로 평가된다.

## 6. 결론

전력부하관리시스템 개발 및 응용기술 연구의 결과로써 소용량 축전방식의 무정전 전원공급 겸용 복합 부하관리시스템은 응용 대상이 적합할 경우 경제성과 보급 가능성이 매우 큰 것으로 판단되었으며, 이에 따라 본 기술의 증대용량의 확대 연구 및 상용화기술 개발과 확대 보급을 위한 제도적 지원대책을 수립할 경우 첨두부하의 억제, 전력설비의 효율적 이용, 양질의 안정된 전력공급 등 국가 전력 수요관리에 크게 이바지하리라 생각된다.

### 참고문헌

- [1] U.S.DOE, "Program Plan for R&D of Load Management on the Electric Power System". 1978
- [2] 김진성, "전력부하관리", 제4회 에너지절약기술 워크샵 논문집, 1989
- [3] 성재서, 김영남외, "전지이용 에너지저장시스템 개발", 한국에너지기술연구소 보고서, 1992.
- [4] 김문덕, "전력 수요관리 정책", 제8회 에너지절약기술 워크샵 논문집, 1993.
- [5] 한국전력공사, "장기 전력수급 계획", 1993
- [6] 에너지경제연구원, "에너지통계월보", 제11권 1호, 1995. 1.