

전기요금 절감 측면에서 에너지저장시스템의 운전알고리즘

金 應 相

한국전기연구소

Operation Algorithm of Battery Energy Storage System (BESS) for Saving Electric Charges

Eung-Sang Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

요 약

본 논문에서는 1 MW 에너지저장시스템을 특별 고압 수용가에 설치하여 실 계통과의 계통연계 운전시 대상 수용가의 전기요금의 절감을 위한 운전알고리즘을 제안하였다. 제안된 운전 알고리즘을 이용하여 계통연계 운전 시 '97년도의 1년 동안 전기요금과 '98년도에도 '97년도와 똑같이 전기를 사용한다는 가정 하에 계절별, 시간대별 및 역률 조정 운전을 고려하여 적용하였다. 적용결과 1년 동안 약 4천만원 정도의 종합 전기요금 절감이 기대되었으며, 이상의 결과로부터 본 논문에서 제안된 알고리즘의 유효성을 입증할 수 있었다.

Abstract—This paper proposes the operation algorithm of 1MW class Battery Energy Storage System(BESS) installed at the extra-high voltage customer. The objective of the proposed algorithm is to reduce electric charges during the operation of the BESS interconnected to power system. This paper simulates the electric charges in 1998 considering Season and Time of Use Rate and Power Factor in the assumption that electricity demand in 1998 is the same amount of that in 1997 and shows the saving of about 40 million won in the total electric charges. The results comparing the real electric charges of June, July and August in 1997 with that in 1998 show that the implementation of the proposed algorithm could significantly reduce electric charges during the operation the BESS

1. 서 론

국내적으로는 산업경제의 발전 및 국민 생활수준의 향상으로 인하여 전력수요가 급격히 증가함과 동시에 주야간의 부하격차가 심화되어 부하율이 현저하게 저하하고 있는 추세이다. 또한 국제적으로는 온실가스 배출억제 및 지구환경 보존 문제 등으로 하나밖에 없는 지구를 지키자는 운동이 강화되고 있다. 최근 우리 나라는 OECD 가입으로 인하여 기후변화협약에 조인하도록 압력을 받고 있는 시점에서 기존의 석유, 석탄 및 가스등을 원료로 사용하는 발전소의 건설이 점점 더 어려워지고 있는 실정이다. 이러한 시점에서 매년 증가하는 전력수요를 부담하기 위해서는 새로운 에너지의 개발이나 부하를 평준화하여 기존의 발전설비 및 송변전 설비의 활용을 극대화하는 것이 시급한 대책으로 고려되며^[1] 부

하평준화 문제 해결을 위한 기술로는 전력저장기술이 고려되고 있다. 현재 실용화되어 있는 전력저장기술인 양수발전은 전설기간의 장기화, 입지조건의 제약, 건설비 증가, 송전손실 및 중소규모시스템 건설 곤란 등의 문제점이 있다. 그러나 본 논문에서 제시된 에너지저장시스템(Battery Energy Storage System: BESS)은 에너지 밀도가 높고, 모듈구조로 분산배치가 가능하고 입지제약이 거의 없어 수요지 근방에 설치가 가능하며 기동정지 및 부하추종 등의 운전특성이 우수한 장점이 있어 가까운 시기에 실현 가능성이 높은 시스템으로 평가될 것으로 전망된다.

이러한 시스템에 대하여 한계공사비 설정방법에 의한 검토^[2,3]와 양수 및 첨두부하용 발전시스템과의 비교 검토에 의한 방법^[4] 및 투자비 회수방법에 대한 경제성 검토^[5,6]가 국내외적으로 수행되어왔다. 그러나 이들은

주로 설치가능 여부 검토를 위한 투자비의 회수에 초점을 두고 연구가 수행되어 왔다. 본 논문에서는 국내에서 개발된 1 MW 에너지저장시스템을 특별고압 수용가에 설치하여 운전시 전기요금의 절감측면에서 가장 효율적인 운전 알고리즘을 제시하였다 또한 본 논문에서 제시된 운전알고리즘에 의하여 1년동안 운전시 '97년도의 전기요금과 '98년도('97년도와 동일조건으로 가정)의 운전 전후 전기요금의 절감을 시뮬레이션 한 결과와 3개월 간 실제운전 한 결과를 비교 분석하여 본 논문에서 제안된 운전 알고리즘의 효용성을 입증하고자 한다.

2. 에너지저장시스템의 구성

2-1. 개요

에너지저장시스템은 심야 경부하시에 전력계통으로부터의 잉여전력을 직류로 변환하여 2차전지에 저장하였다가 최대부하시나 필요시에 다시 교류로 변환하여 부하에 전력을 공급하는 시스템으로 최대부하삭감 및 부하평준화를 주목적으로 하는 시스템이다. 현재 산업자원부 지원하에 한국전기연구소와 이화전기공업(주)가 공동으로 1994년 6월 10일부터 1998년 8월 11일 까지 총 4년에 걸쳐 1 MW급 에너지저장시스템을 개발하였으며, 이화전기공업(주)에 설치하여 1998년 6월부터 8월에 걸쳐 약 120 cycle 정도의 시험운전을 완료한 상태이다.

2-2. 시스템 구성

이화전기공업(주는 계약전력이 3,000 kW이며 현재 산업용 전력(병), 고압전력(A) 선택요금 I로 가입되어 있다. 계통구성은 22.9 kV의 특별 고압을 수전하여 공장 내부에서 3.3 kV로 저하시킨 다음 그림 1과 같이 에너지저장시스템실에 있는 VCB(진공차단기)를 통하여 3.3 kV/480 V 몰드 변압기에 연결된다. 여기서 CB2(연계용 차단기)와 연계 리액터를 거쳐 2중 모드의 중방전 일체형 콘버터와 연결된 후 LL4000 전력저장용 연축전지와 연결된다. 본 시스템은 무인운전을 위해 컴퓨터를 이용하여 원격 자동 감시 및 제어가 가능하도록 시스템을 구성하였으며, 그림 1의 감시 및 제어 화면에서와 같이 좌측 상단에서부터 Local/Remote, 운전/정지, 운전모드수정, 운전상태표시, 프린터/모니터, 각종 Tool 박스 및 기록 관리자 등으로 구분되어 있다. 또한 역률 조정 운전을 위해 공장 내부 인입점의 PT 및 CT의 단자를 에너지저장시험실로 연결시켜 공장내부 전체 역률을 감지하면서 역률 조정 운전이 가능하도록 구성하였다.

2-3. 대상 수용가의 특징

대상 수용가인 이화전기공업(주)에서 적용 받고 있는 선택(I)의 전기요금은 kW당 기본요금이 선택(II) 요금보다 약 15% 정도 많으나, 시간대별 요금(kWh)은 약 4% 정도가 낮은 편이다. 또한 '97년 7월 1일부터 개정된 규정은 하절기의 최대전력을 삭감하기 위해 기본요금 결정 시 당월치와 직전 3개월(7월, 8월, 9월)의 최대치와

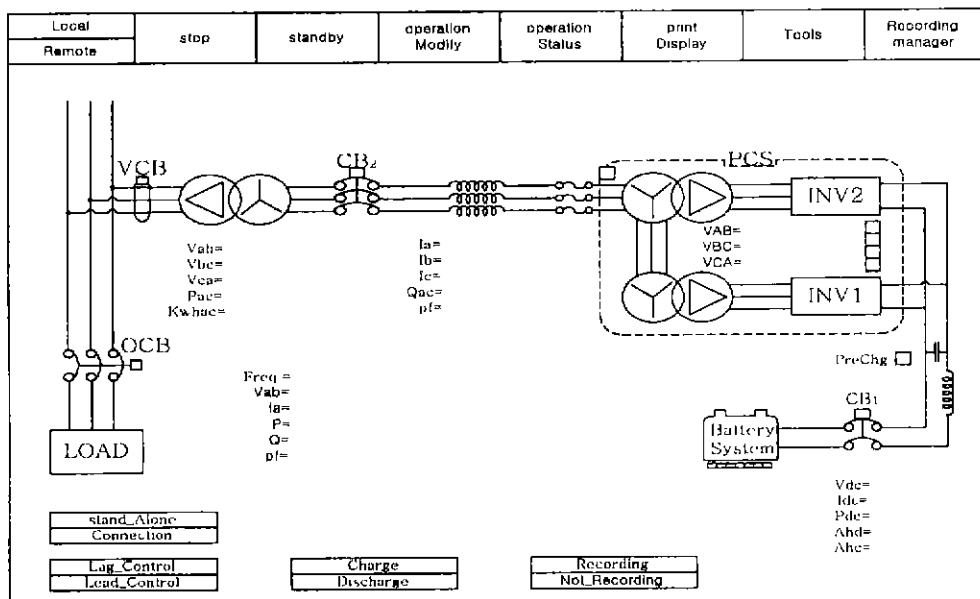


그림 1 에너지저장시스템의 구성도.

표 1. 전기요금표('98년 1월 1일 개정).

계절별(월간) 시간대별	여름철	봄·가을철	겨울철
	07.01~08.31	04.01~06.30 09.01~09.30	10.01~익년03.31
경부하 시간대	22:00~08:00 (29.2원)	22:00~08:00 (29.2원)	22:00~08:00 (29.2원)
중간부하 시간대	08:00~10:00	08:00~10:00	08:00~16:00
	12:00~14:00	12:00~14:00	20:00~22:00
	17:00~22:00 (62.3원)	17:00~22:00 (45.8원)	(52.7원)
최대부하 시간대	10:00~12:00	10:00~12:00	16:00~20:00
	14:00~17:00 (106.7원)	14:00~17:00 (62.3원)	(73.1원)

(주) 선택(I) 고압A의 kW당 기본요금은 3,960원임.

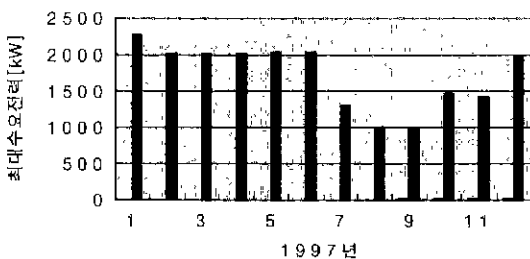


그림 2. 1997년도의 월별 최대수요전력.

비교하여 큰 수치를 기본요금 적용전력으로 간주하므로 자가용 고압수용기의 경우 기본요금이 전체 전기요금에 미치는 영향이 상당함을 알 수 있다.

한편, '95년 5월 1일부터 적용하고 있는 역률 요금제도에 의하면 고압의 역률이 0.9에 미달하는 경우 매 1%에 대하여 기본요금의 1%씩을 추가 징수시키며, 역률이 0.9를 초과하는 경우에는 95%까지 한도내에서 초과하는 매 1%에 대하여 기본요금의 1%씩을 감액시켜 주고 있다. 참고로 '98년 1월 1일 개정된 계절별 시간대별 전기요금표는 표 1과 같으며, 1997년의 월별 최대수요전력은 그림 2와 같다.

3. 운전 알고리즘

본 논문에서 제안된 에너지저장시스템은 용량이 1 MW 1시간용으로 유/무효전력의 독립제어가 가능하며, 정전력제어와 정전류제어가 가능하도록 설계/제작되었다⁷⁾. 현재 무정전 전원장치의 대체기능을 가질 정도로 무순단 차단장치가 부착되어 있지는 않지만 평소에는 전지의 용량을 50%까지만 사용하므로 일단 운전 중에 정전이 발생되면 남아있는 전지용량 만큼은 항상 부하에 전력을 공급할 수가 있도록 설계되었다.

전기공급규정상 계절별 시간대별 전기요금이 다르므로 본 시스템은 그림 3과 같이 전기요금이 저렴한 심야 시간대(20:00~익일 08:00)에 주로 부하 역할을 하도록 충전 운전을 하고 전기요금이 높은 최대부하 시간대(10:00~12:00, 14:00~17:00)에는 전원으로서 부하에 전력을 공급하도록 하였으며, 또한 중간부하 시간대(08:00~10:00, 12:00~14:00, 17:00~22:00)에는 무부하 운전으로 대기 운전을 하도록 하였다. 그리고 수용기에 역률이 0.9 미만이면 역률 보상운전을 하도록 설계하였다.

그림 3에서 제시한 운전 알고리즘은 먼저 운전이 시작되면 계통 전압과 전류를 읽어들이어서 정전 여부를 판가름한다. 만일 정전으로 판별되면, 알고리즘은 단독 운전 모드로 들어가서 일단 전지의 용량이 충분한지를 검토한다. 전지의 용량이 충분하지 않아서 단독으로 전력을 공급하지 못할 것으로 판단되면, 연계 CB를 Open하고 알고리즘 수행을 중단한다. 그러나 통상 방전심도를 50%로 운전하기 때문에 전지용량이 최소한 50% 정도는 남아 있게 된다. 만약 정전이 계속되어 남아있는 50% 용량도 다 소비했을 경우는 운전이 불가능하게 되며 전지의 용량이 충분할 경우는 계통쪽의 CB를 Open하고 부하 추종 운전으로 들어가게 된다.

또한 계통이 정전이 아닌 경우는 현재의 시간대를 파악하여 미리 정해둔 시간대별 운전 모드로 들어가게 된다. 먼저 중간 부하 시간대에는 충전이나 방전을 하지 않는 무부하 운전 즉 대기운전을 수행하게 된다. 이 시간대에는 부하량이 크지 않기 때문에 보상운전 자체가 큰 효과가 없기 때문이다. 또한 최대부하 시간대에는 본 시스템이 방전운전을 수행함으로써 전원역할을 하게 되며 수용기의 부하는 줄어들게 된다. 방전운전은 일단 전지용량이 충분하지를 판단하고, 전지의 용량이 충분할 경우 지정된 양의 P를 방전하게 되면서 역률제어 운전을 하게된다. 만일 전지의 용량이 충분하지 않을 경우는 무

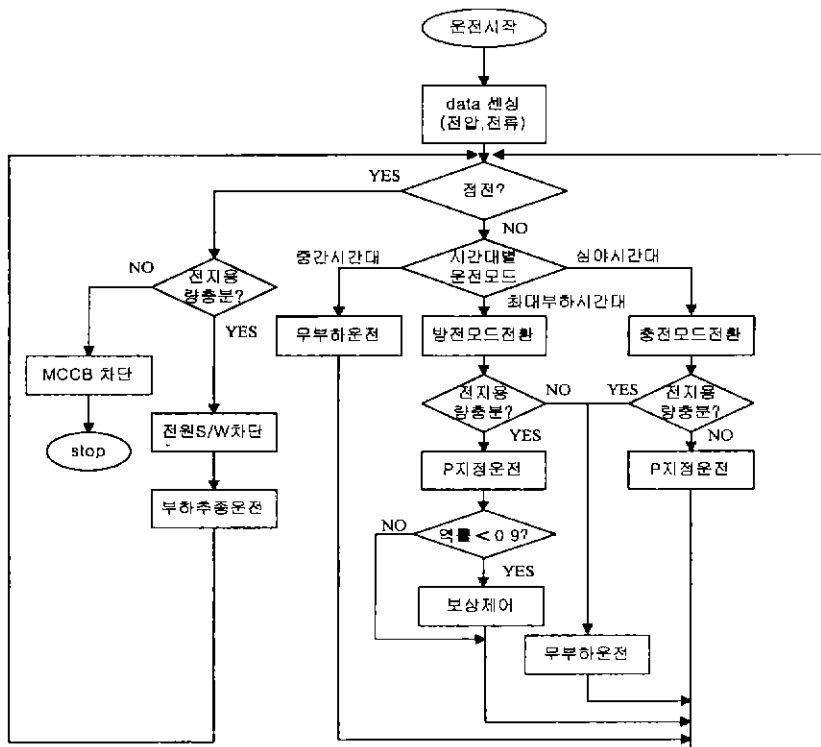


그림 3. 제안된 운전 알고리즘.

부하 운전을 수행한다. 방전모드에서의 지정된 P는 양의 값을 갖는다. 충전모드에서의 동작은 방전모드의 동작과 같다. 단지 충전모드에서는 지정된 P가 음의 값을 가지므로서 전력이 계통에서 에너지저장시스템으로 이동하는 것이 방전모드 동작과 다른 점이 된다. 또한 충전모드에서는 전지용량이 충분할 경우에 무부하 운전을 수행하게 된다.

4. 전기요금 분석

본 에너지저장시스템의 특징은 정전시에 필요부하에 전력공급과 최대부하 삭감을 통한 부하평준화 등의 효과가 있지만 본 논문에서는 부하평준화 보다는 수용가의 전기요금의 절감측면에 중점을 두었으므로 전기요금에 직접적으로 관련이 있는 기본요금, 전력량요금 및 역

표 2. 1997년도 전력사용량.

년월	기본요금 [단가(원)×전력(kW)]	전력량 요금[단가(원)×전력량(kWh)] (경부하, 중간부하, 최대부하시간대)	역률요금(90-역률)* 기본요금[역률(%)]
97, 1	3310×2280	27.1×108480, 47.1×108480, 63.4×58152	93
2	3310×2021	27.1×109056, 47.1×161064, 63.4×52896	92
3	3310×2021	27.1×121272, 47.1×158328, 63.4×53712	94
4	3310×2021	27.1×91560, 41.5×107136, 54.7×78288	92
5	3310×2026	27.1×79248, 41.5×94224, 54.7×70704	92
6	3310×2026	27.1×90024, 41.5×99384, 54.7×74088	88
7	3720×1310	27.4×90888, 58.5×103848, 100.2×86304	91
8	3720×998	27.4×101232, 58.5×93048, 100.2×70968	91
9	3720×1003	27.4×87240, 43.0×97032, 58.5×70080	91
10	3720×1464	27.4×77928, 49.5×145584, 68.6×52896	91
11	3720×1416	27.4×100344, 49.5×172080, 68.6×59400	93
12	3720×1980	27.4×108720, 49.5×172368, 68.6×57312	93

률에 관련된 전기요금의 절감측면을 대상으로 하여 분석하였다. 우선 적용대상 수용가의 1997년도 전력사용량은 표 2에서와 같이 기본요금 적용전력은 월평균 약 1700 kW 정도이고 월평균 사용전력량은 약 288,000 kWh 정도이며, 종합전기요금 계산방법은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{종합전기요금} &= \text{전력사용별 기본 적용요금} \\ &+ (\text{경부하시간대 전력사용량} \times \text{경부하시간대 요금}) \\ &+ (\text{중간부하시간대 전력사용량} \\ &\times \text{계절별 중간부하시간대 요금}) \\ &+ (\text{최대부하시간대 전력사용량} \\ &\times \text{계절별 최대부하시간대 요금}) \\ &+ \text{역률조정요금} \end{aligned} \quad (1)$$

4-1. 기본요금 절감 산정

대상 수용가의 '97년의 월평균 기본요금 적용전력은 약 1700 kW이지만 표 2에서 알 수 있는바와 같이 실제의 적용전력은 2000 kW가 넘으며, 기본요금이 적용되는 시간대가 주간에 전력을 많이 사용할 때이므로 이때 본 에너지저장시스템을 적용하면, 본 시스템의 용량이 1000 kW이므로 이 용량 한도 내에서는 기본 요금의 절감이 가능하다. 표 2에서와 같이 8월의 경우 기본요금 적용전력이 1000 kW 이하이므로 만약 월 500 kW 정도의 기본요금 적용전력을 절감시킨다고 가정하면 1년 동안의 기본요금 절감분 총액은 아래 식(2)에서와 같이 약 2400만원 정도가 절감 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{기본요금 절감분 총액} &= 500(\text{kW}) \times 3960(\text{원}) \\ &\times 12(\text{개월}) = 23,760,000(\text{원}) \end{aligned} \quad (2)$$

4-2. 전력사용량 요금 절감 산정

대상 수용가의 월평균 전력사용량은 288,000 kWh 정도로 표 2에서와 같이 시간대별 전력사용량은 경부하 시간대가 약 34%, 중간부하시간대가 약 44%, 최대부하시간대

가 약 22% 정도이다. 그러나 전기요금은 하절기 및 춘·추절기에 경부하 대비 최대부하 시간대가 각각 365%와 213%로 높으므로 본 시스템을 적용하여 경부하 시간대에 부하를 증대시키고 최대부하 시간대나 중간부하 시간대에 전원으로하여 역할을 하여 부하를 줄이면 기존보다 전력사용량에 대한 요금이 상당량 절감되리라 본다. 대상 수용가의 '97년도 1년동안 납부된 전기요금은 연간 약 2억 5천만원 정도이었다. 계절별 전기요금 절감액을 계산하면 월평균 전력사용량은 288,000 kWh, 최대부하 시간대에 사용량은 전체에 비해 22%이며, 이중에서 50%를 절감한다고 가정하고 1일 500 kW로 2시간 방전, 그리고 시스템의 전체 효율은 75%라는 전제조건하에서 아래 식(3)과 같이 하절기의 월 평균 전기요금 절감액은 215만원으로 산정되었다. 같은 방법으로 계산하였을 때 춘·추 절기와 동절기의 월 평균 절감액은 각각 84만원과 143만원 정도로 계산되었다.

$$\begin{aligned} \text{하절기 월 절감액} &= [\text{월평균 전력량} \\ &\times \text{최대부하 시간대 사용량비율} \\ &\times \text{최대부하 시간대 전기요금} \times \text{절감 예정용량}] \\ &- [\text{월평균 전력량} \times \text{경부하 시간대 사용량을} \\ &\times \text{전기요금} \times \text{절감예정용량} \times \text{시스템 운용효율}] \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 연간 종합 전기요금 절감액은 식(4)에서와 같이 연간 기본요금 절감액에 하절기, 춘·추절기 및 동절기 월 평균 절감액에 개월 수를 곱하여 계산된 전력량 요금 절감액과 역률조정 운전에 절약된 액수를 합하면 구할 수가 있으며, 시뮬레이션의 결과에 의하면 연간 약 4000만원 정도가 절감되는 것으로 예상된다.

$$\begin{aligned} \text{연간 종합 전기요금 절감액} &= [\text{기본요금 절감액}] \\ &+ [\text{하절기 요금절감액} \times \text{개월수}] \\ &+ [\text{춘·추절기 요금절감액} \times \text{개월수}] \\ &+ [\text{동절기 요금절감액} \times \text{개월수}] \\ &+ [\text{역률조정 운전에 의한 절감액}] \end{aligned} \quad (4)$$

표 3. 전력요금 비교(6, 7 및 8월).

구분	'97. 6	'98. 6	'97. 7	'98. 7	'97.8	'98 8	차액		
							6 월	7 월	8 월
기본요금	6,706,060	3,971,880	4,873,200	3,971,880	3,712,560	2,803,105	2,734,180	901,320	909,455
전력 량 요 금	심야요금	2,439,650	2,290,951	2,490,331	2,965,085	2,845,326	3,015,432	148,735	-474,754
	주간요금	4,124,436	3,395,428	6,075,108	5,258,618	5,389,035	3,113,211	729,008	816,490
	저녁요금	4,052,613	3,005,352	8,647,660	5,078,066	7,093,697	5,432,615	1,047,261	3,569,594
	소 계	10,616,700	8,691,696	17,213,100	13,301,769	15,328,058	11,561,258	1,925,004	3,911,331
역률요금	134,121	-198,594	-48,732	-198,594	-37,125	-18,411	332,715	149,862	18714
세 금	1,745,688	1,246,498	2,203,757	1,707,505	1,900,349	1,434,595	499,190	496,252	465,754
합 계	19,202,560	13,711,480	24,241,320	18,782,565	20,903,842	15,780,547	5,491,089	5,458,765	5,123,295

또한 본 논문에서 제안된 알고리즘에 의해 작성된 프로그램은 본 에너지저장시스템의 일부인 감시 및 제어 장치와 연결되어 상기의 대상 수용가인 특별고압 수용가에 설치되어 '98년 6월부터 8월에 걸쳐 실 계통에 적용 운전을 수행하였다. 이때 실계통의 전력사용량은 '97년에 비해 약 110% 정도의 부하량에 이르렀으며, 이 경우 월간 전기요금 절감액은 약 500만원 정도로 시물레이션에 의한 결과와 거의 비슷함을 알 수 있었다. 이상의 시물레이션의 결과와 실 운전 결과로부터 본 논문에서 제안된 알고리즘의 유효성을 입증할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 1 MW 에너지저장시스템을 대상 수용가인 특별 고압 수용가에 설치하여 실계통과의 계통연계 운전시 대상 수용가가 적용 받고 있는 산업용전력(병) 고압 A 선택 1의 전기요금 절감 측면에 중점을 두고 운전알고리즘을 제안하였다. 제안된 운전알고리즘을 이용하여 계통연계 운전시 '97년도와 '98년도에도 '97년도와 똑같이 전기를 사용한다는 가정하 상태에서 기본요금 절감분, 계절별, 시간대별 및 역률 조정 운전을 고려하여 운전결과 예상되는 전기요금 절감분을 시물레이션 하였다. 그 결과 1년 동안 약 4천만원 정도의 종합 전기요금 절감이 기대되었으며, 시물레이션 결과와 본 논문에서 제안된 알고리즘을 시스템에 적용하여 '98년 6월에서 8월에 걸쳐 3개월 동안 실제 운전한 결과와의 비교/분석에 의해 본 논문에서 제안된 알고리즘의 유효성을 입증할 수 있었다. 따라서 본 시스템은 수용가측에서의 전기요금의 절감에 대한 장점뿐만 아니라 공급자 측인 전력회사 측면에서도 최대부

하 삭감, 전원설비 및 송변전 설비의 증축지연과 하계 예비율 상승에 기여할 수 있는 유용한 시스템으로 기대된다.

참고문헌

1. 김응상: "전지전력저장시스템의 국내적용을 위한 경제성 검토에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B권 p. 610 (1995. 7).
2. 김응상: "전지전력저장시스템의 경제성 평가를 위한 경제모델에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회 논문집 Vol 10, pp. 75-82 no 5 (1996. 10).
3. EPRI EM-3872: "Updated Cost Estimate and Benefit Analysis of Customer Owned Battery Energy Storage", January (1985).
4. John A. Sharpe III: "Integrated Economics for Battery Energy Storage System in Electric Utility Applications", International Lead Zinc Research Organization Inc., January (1992).
5. Margaret, A. *et al.*: "Determination of Lead-Acid Battery Capacity Via Mathematical Modeling Techniques", Proceeding of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, (1992)
6. Chang, S.J. *et al.*: "Multi-Module Parallel Small Battery Energy Storage System". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 11, No. 1, March (1996).
7. Tsung, M. *et al.*: "Design and Implementation of a Demand-Side Multi-function Battery Energy Storage System". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 42, No 6, December (1995).