Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2015) 29(5) : 94~99
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2015.29.5.094 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 29-5-13

에너지저장장치 도입 시 비예측 알고리즘의 경제성 분석에 관한 연구

(Study on the Economic Analysis for Non-Prediction Algorithm with the Energy Storage System)

홍종석* · 강병욱 · 채희석 · 김재철**
(Jong-Seok Hong · Byoung-Wook Kang · Hui-Seok Chai · Jae-Chul Kim)

Abstract

Prediction algorithm of the energy storage system in accordance with the load pattern can cause economic loss in case of a failure prediction. In addition, algorithm that uses TOU(Time of Use) based on the revelation by the power electric charge which covers most simply is an inefficient operation because it is only for the purpose of reducing the peak power. In this paper, we introduced a non-prediction algorithm with a conventional TOU in order to solve this problem operating the energy storage system economic and efficient.

Key Words : Non-Prediction Algorithm, Energy Storage System, Time Of Use, Electric Charge

1. 서 론

최근 전 세계적으로 한정된 에너지 자원을 어떻게 활용할 것인지에 대해 지속적인 관심을 갖고 있으며, 특히 환경오염 및 파괴에 대한 대책의 중요성이 절실히 요구되어 교토의정서와 같이 국가 간의 정치적인 현안으로 거론되고 있다[1-3]. 특히 국내에서의 전기 사용량은 나날이 갈수록 급증하고 있으며, 수요예측의 실패로 9·15 순환정전과 같은 문제점도 발생하였다. 최근에는 원전과 관련된 사회적인 이슈에 따른 예비력 부족 문제도 대두되고 있는 실정이다. 예비력 확보를 위한 발전소 및 송전탑 건설은 환경 단체 및 주민들의 반발, 민원으로 건설기간이 장기화되거나 취소되는 경우도 있어 그에 따른 대안이 필요한 실정이다. 이에 대응하기 위하여한 태양광, 풍력, 연료전지 등 신재생에너지가 각광을 받으면서 최근 정부 주도의 녹색성장을 위한 분산전원의 보급 및 확대정책이 적극 추진되고 있으며, 그 중에서도 이처럼 전력의 효율적인 운영이 절실한 시기에 필요한 운영방안기술 중 하나로 국내 전력계통에 배터리 에너지저장장치를 도입하는 방안이 추진 중이다[3-5].

에너지저장장치는 전기요금이 저렴할 때 전력을 저장하고, 전기요금이 비싼 피크시간대에 전력을 사용하여 수요와 공급의 차이를 효율적으로 줄일 수 있다. 생산된 전력 에너지를 저장하여 필요할 때 사용함으로써, 에너지 이용 효율을 향상시킬 수 있고 신재생에

* Main author : Ph.D candidate student with Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.
** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
Received : 2015. 2. 9
Accepted : 2015. 3. 16

Copyright ⓒ 2015 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

너지에서 전력 생산에 대한 제약을 최소화할 수 있으며, 필요한 전력을 신속하게 공급해 줄 수 있어 신뢰도 측면에서도 매우 유용하여 에너지저장장치 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[6].

기존에 사용하는 에너지저장장치의 알고리즘은 당일 예측된 부하패턴을 기반으로 한 수요반응 알고리즘을 사용한다. 이는 정형화된 부하에 최적 충·방전 스케줄을 구현하여 제어 신뢰성을 향상시킬 수 있으나 오차가 클수록 오차범위가 커지게 되는 단점을 가진다. 또한 잘못된 제어로 인한 제어 실패는 수용가에 큰 경제적 손실을 야기할 수 있다.

본 논문에서는 수요반응을 위하여 부하패턴을 예측하지 않는 비예측 기반으로써 에너지저장장치를 이용한 Peak Shaving 및 Load shifting을 목적으로 하는 알고리즘을 구현하였다. 국내 TOU(Time of Use) 기반의 계시별 전력요금체계를 기반으로 한 일반/산업용 부하의 패턴을 ESS를 통해 강제 변환하여 전력 기본요금 및 전력량 요금을 감소시키는데 의의를 두고 있다.

본 알고리즘의 장점은 요일/계절별 변화하는 부하패턴분석을 진행하지 않음으로 인해 ESS운영 알고리즘은 간소화 시킬 수 있다. 또한 부하패턴에 의존하지 않고, Peak cut 및 Load shifting을 수행할 수 있어 예측의 불확실성 및 프로세스 처리량을 줄일 수 있기 때문에 예측 오차로 인하여 생길 수 있는 문제를 해결할 수 있으며, 전체적으로 효율대비 가격을 절감시키기 위해 내부 프로세스를 단순화하여 하드웨어에 부담을 줄여주도록 제어 시퀀스를 구현할 수 있다.

본 논문에서는 국내 A사(산업용 수용가)의 실제 부하 곡선을 이용하여 ESS 미설치상태, TOU 기반으로 ESS를 운전하였을 경우, 비예측 기반으로 ESS를 운전하였을 경우에 대하여 1년간 예상되는 전기요금을 분석하여 비예측 기반 ESS 운전방식의 합리성을 제시하고자 한다.

2. 국내 전기요금 체계

한국전력공사에서는 수용가들의 특성에 맞춰 선택형 요금제를 적용하고 있다. 산업용 고압전력B(표준전압 154,000V 이상 고객)의 경우 기본요금과 전력량요금에 차등을 두어 총 3가지의 선택요금제를 적용하고 있으며 이는 아래의 표 1부터 표 3에 나타내었다[7].

표 1. 산업용 고압전력B(선택요금 Ⅰ)
Table 1. HV Industrial customer B (Optional plan Ⅰ)

전력요금(원/kW)		6,630	
전력량요금(원/kWh)			
구분	여름철	봄·가을철	겨울철
경부하	60.0	60.0	67.0
중간부하	112.3	82.3	112.3
최대부하	193.5	112.6	168.5

표 2. 산업용 고압전력B(선택요금 Ⅱ)
Table 2. HV Industrial customer B (Optional plan Ⅱ)

전력요금(원/kW)		7,380	
전력량요금(원/kWh)			
구분	여름철	봄·가을철	겨울철
경부하	56.2	56.2	63.2
중간부하	108.5	76.9	106.8
최대부하	188.1	107.2	163.0

표 3. 산업용 고압전력B(선택요금 Ⅲ)
Table 3. HV Industrial customer B (Optional plan Ⅲ)

전력요금(원/kW)		8,190	
전력량요금(원/kWh)			
구분	여름철	봄·가을철	겨울철
경부하	54.5	54.5	61.6
중간부하	106.8	76.9	106.8
최대부하	188.1	107.2	163.0

표 1~3에 의하면 기본요금이 저렴할 경우 전력량요금이 다른 요금제보다 높게 평가되어있기 때문에 수용가들은 이를 고려하여 각자 상황에 맞는 요금제를 선택할 수 있다. 또한 전기공급약관 시행세칙에 의하면 시간대를 아래의 표 4와 같이 구분하였다[8].

표 4. 계절별 · 시간대별 구분표
Table 4. Subdivisions of season and timeslot

구분	여름철 (6월 1일 ~ 8월 31일)	봄 · 가을철 (3월 1일 ~ 5월 31일, 9월 1일 ~ 10월 31일)	겨울철 (11월 1일 ~ 익년 2월 말일)
경부하	23:00~09:00	23:00~09:00	23:00~09:00
중간부하	09:00~14:00 17:00~23:00	09:00~14:00 17:00~23:00	09:00~10:00 12:00~17:00 20:00~22:00
최대부하	14:00~17:00	14:00~17:00	10:00~12:00 17:00~20:00 22:00~23:00

산업용 수용가의 경우 경부하 시간대를 제외한 15분 평균전력의 최대값을 요금적용전력으로 적용하고 있으며, 최대부하가 경신될 경우 이를 이후 1년 동안의 기본요금으로 적용하게 된다. 따라서 연간 최대부하를 절감시킬 수 있다면 연간 전기요금을 저감할 수 있는 방안이 되어 많은 수용가가 최대수요전력 저감을 목적으로 ESS의 적용을 고려하고 있다.

3. 충 · 방전 알고리즘

3.1 TOU 기반의 충 · 방전 알고리즘

TOU 기반의 충 · 방전 알고리즘은 정해진 시간대에 일괄적으로 충전을 하며 일반적으로 경부하시간대에서 최대부하는 기본전력요금에 영향을 주지 않기 때문에 경부하시간대에 충전한다. 또한 중간부하 혹은 최대부하시간에 부하의 크기와 무관하게 전량 방전한다. 실제 본 논문에서 다루는 A사에서는 TOU 기반으로 ESS를 운전하고 있으며, 방전시간대는 중간부하시간대로 설정해 놓았다. TOU 기반의 충 · 방전 알고리즘을 개략적으로 표현하면 아래의 그림 1과 같다.

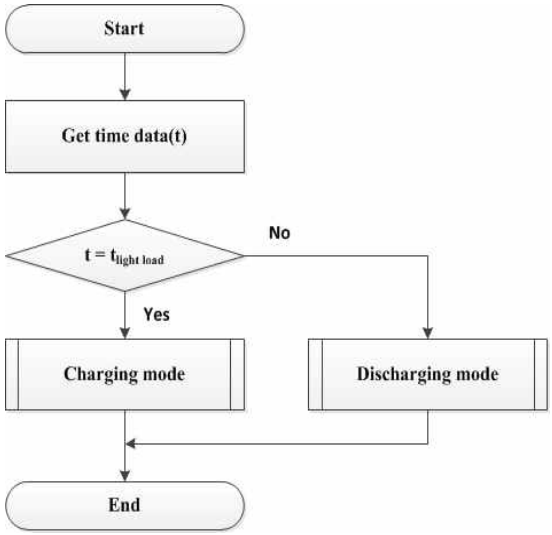

그림 1. TOU 기반의 ESS 운전 알고리즘
Fig. 1. Operating algorithm for ESS based on TOU

3.2 비예측 기반의 충 · 방전 알고리즘

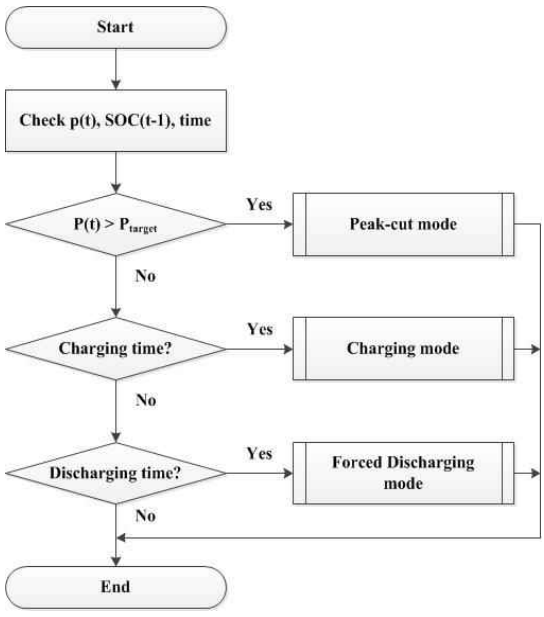

그림 2. 비예측 기반의 ESS 운전 알고리즘
Fig. 2. Operating algorithm for ESS based on non-prediction method

본 논문에서 제시하는 비예측 기반의 알고리즘은 기존의 TOU 기반의 알고리즘과 충전방식에 있어서는

동일하다. 즉 정해진 경부하시간대에 일괄적으로 충전한다. 그러나 일과시간, 특히 중간부하와 최대부하 시간 중에 정해진 수요관리 목표값에 도달하기 전까지는 방전을 하지 않는다. 본 알고리즘은 최대부하가 증가하여 기본 전력요금이 상승하는 것을 억제하는데에 있다. 그러나 연간 최대부하는 1년에 1회 발생하기 때문에 이를 위해 항시 ESS를 대기상태로 두는 것은 이용률 측면에서 굉장히 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 일과시간 종료 후에 ESS의 에너지 잔량을 전량 방전하는 강제방전시퀀스를 추가하였다. 비예측 기반의 충 · 방전 알고리즘을 아래의 그림 2에 정리하였다.

위의 알고리즘에 따른 ESS의 동작 순서는 다름과 같다.

- 실시간 전력수요(P(t)), ESS의 충전상태(SOC), 현재 시점(t)의 데이터 취득를 취득한다.
- 현재의 전력 수요가 목표 수요를 초과하였는지 판단하고, 초과하였을 경우 Peak-cut 모드 돌입. Peak-cut 모드에서는 현재 부하 전력(P(t))과 목표 전력(P_{target}) 사이의 차이를 도출하고, SOC 정보를 확인. 부하전력과 목표전력의 차이를 단위시간(15분)간 동안 출력이 가능하다면, 전력 차이만큼 방전, 잔량이 부족할 경우 잔량을 단위시간 동안 서서히 방전한다.
- 부하 전력이 목표전력보다 작을 경우, 현재 시점 데이터를 비교하여, 중간부하/최대부하시간 대가 아닌 경우 ESS를 충전한다. 이때 발생하는 전력 수요의 증가는 최대부하 증가에 기여하지 않기 때문에 최대 출력으로 충전한다.
- 부하 전력이 목표전력보다 작고, 현재 시점이 일과가 종료된 후의 중간부하/경부하시간 대라면 ESS의 잔존 에너지는 전량 방전한다.

4. 충 · 방전 알고리즘의 성능 비교

아래의 그림 3은 국내 A사의 1년간 부하곡선이다. 최대부하는 약 17,500kW이며, 측정 초기에 최대부하를 기록하고 이후에는 최대부하에 미치지 못하고 있다.

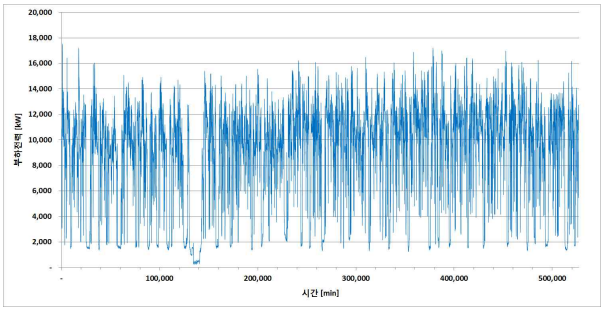

그림 3. 산업용 수용가의 연간 부하곡선
Fig. 3. Yearly load curve for industrial customer

ESS가 적용되지 않았을 경우와 ESS를 앞서 언급한 두 알고리즘에 따라 운전하였을 경우의 성능을 비교하기 위하여 두 알고리즘을 각각 MATLAB을 이용하여 구현하였다.

그림 3을 기반으로 연간 최대 부하가 발생하는 날의 부하 곡선을 아래의 그림 4에 나타내었다.

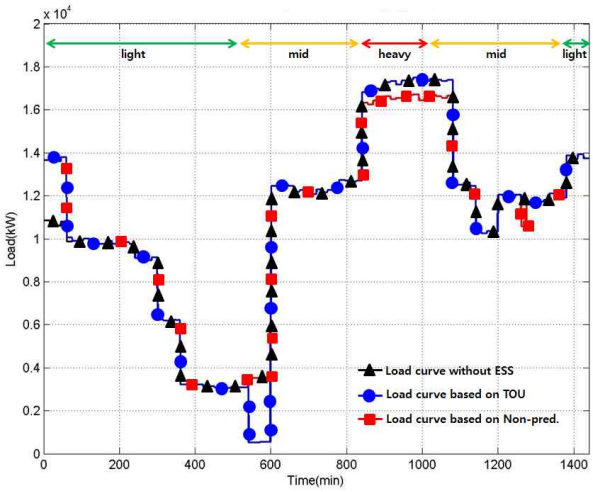

그림 4. 운전방식에 따른 부하곡선
Fig. 4. Load curve with the operation method

위의 그림 4에 의하면 경부하 시간대에는 ESS가 적용된 계통에서는 충전을 위해 부하량이 상승해 있는 것을 확인할 수 있다. 충전이 완료되면 ESS가 설치되지 않은 부하곡선과 동일하게 유지되며, 중간부하 시간대가 시작됨과 동시에 TOU 기반의 ESS는 방전을 시작함을 알 수 있다. 반면 비예측 기반의 ESS는 대기상태를 유지하고 있다.

이후 최대부하 시간대에서 부하 곡선의 최대 수요가 발생한다. TOU 기반의 ESS는 이미 중간부하시간대에서 충전된 에너지를 모두 방전하였기 때문에 최대부하가 발생한 시점엔 ESS가 없는 부하곡선과 동일한 상태가 된다. ESS를 설치하였음에도 불구하고 최대수요 저감 기능이 적용되지 않는 것을 의미한다. 반면에 비예측 방식이 적용된 ESS는 중간부하 시간대에서 에너지를 방전하지 않았기 때문에 최대 수요가 발생하는 시점에 방전을 시작하고 최대 수요의 증가를 약 16,500kW 정도로 억제시키고 있다. 이후 남아있는 에너지를 일과시간 종료 후 방전하여 다음날의 충전에 대비하고 있다.

이와 같은 운전 방식을 위의 그림 3에 적용하여 1년간 운영 실적을 산출하였다. 아래의 표 5에서 7은 선택요금 Ⅰ~Ⅲ를 적용한 각 상황의 연간 전력요금이다.

표 5. 선택요금 Ⅰ에 의한 전력요금
Table 5. Electricity rates based on optional plan Ⅰ

구분	최대부하 (MW)	기본 전력요금 (백만원/월)	전력량 요금 (백만원)	연간 합계 (백만원)
ESS 미설치	17.519	116.15	7,271.41	9,531.75
TOU 기반	17.519	116.15	7,228.09	9,484.09
비예측 기반	16.716	110.83	7,233.68	9,419.97

표 6. 선택요금 Ⅱ에 의한 전력요금
Table 6. Electricity rates based on optional plan Ⅱ

구분	최대부하 (MW)	기본 전력요금 (백만원/월)	전력량 요금 (백만원)	연간 합계 (백만원)
ESS 미설치	17.519	129.29	6,971.28	9,375.05
TOU 기반	17.519	129.29	6,927.96	9,327.39
비예측 기반	16.716	123.36	6,933.44	9,255.20

표 7 선택요금 Ⅲ에 의한 전력요금
Table 7. Electricity rates based on optional plan Ⅲ

구분	최대부하 (MW)	기본 전력요금 (백만원/월)	전력량 요금 (백만원)	연간 합계 (백만원)
ESS 미설치	17.519	143.48	6,840.24	9,418.21
TOU 기반	17.519	143.48	6,796.90	9,370.54
비예측 기반	16.716	136.90	6,802.34	9,289.71

분석 결과에 의하면 A사에서 발생하는 연간 전력요금은 약 93억원 이상일 것으로 예상된다. 표 5부터 7까지의 결과에 따르면 본 논문에서 제안하는 비예측 기반의 ESS 충·방전 알고리즘을 적용했을 경우 연간 전력비용이 최저가로 책정되는 것을 확인할 수 있다. 어떠한 선택 요금제를 선택하더라도 ESS가 적용되지 않았을 경우와 비교하여 약 1억 2천만원 가량 전기요금을 절감시킬 수 있으며 TOU기반의 ESS 충·방전 알고리즘과 비교하여도 약 6천만원 이상의 전기요금을 절감가능하다. 특히 선택요금 Ⅱ를 선택하였을 경우, 전기요금이 최저로 책정되는 것으로 보아 A사는 선택요금 Ⅱ가 적절한 요금제라는 결과도 부가적으로 도출할 수 있었다.

지금까지의 결과를 보면 비예측 기반의 ESS 충·방전 알고리즘이 부하의 패턴 분석이나 수요예측 등이 필요 없으며, TOU 기반의 ESS 충·방전 방식보다 성능이 우수하여 ESS 운전 전략에 적절하다.

5. 결 론

본 논문에서는 부하의 패턴분석 및 수요예측이 필요하지 않는 비예측 기반의 ESS 운전 알고리즘을 제안하고, 현재 많은 산업체에서 적용중인 TOU 기반의 ESS 운전방식과 비교하여 비예측 기반의 ESS 운전방식의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션을 통해 두 알고리즘 모두 ESS가 설치되지 않은 계통에 비해 연간 전기요금이 감소되어 ESS의 설치가 합리적 대안이

될수 있음을 판단하였다. 또한 두 알고리즘 사이의 성능을 비교해본 결과, 대상 수용가가 선택가능한 모든 요금제도에 대해 제안한 알고리즘이 더욱 우수한 성능을 가질 수 있다고 판단되었다.

References

[1] EPRI, Electricity Energy Storage Technology Options, EPRI Report, 2010.
[2] Jim Eyer, Garth Corey, Energy Storage for the Electricity Grid : Benefits and Market Potential Assessment Guide, A Study for the DOE Energy Storage Systems Program SANDIA Report: SAND 2010-0815, 2010.
[3] "Design and costs for a generic 10-MW utility lead-acid battery energy storage plant", Electric Power Research Institute, EPRI AP-5845, Project 2123-6, Final Report, June 1988.
[4] Abbey, C., Robinson, J., Joos, G.: "Integrating renewable energy sources and storage into isolated diesel generator supplied electric power systems". 13th Power Electronics and Motion Control Conference, 2008, EPE-PEMC 2008, pp. 2178-2183.
[5] Castronuovo, E., Lopes, J. : "Operation planning of hydrogen storage connected to wind power operating in a power market", IEEE Trans. Energy Convers., 2006 21, (3), pp.742-749.
[6] Q. Wang and S. S. Choi, "The Design of Battery Energy Storage System in a Unified Power-Flow Control Scheme", IEEE Transactions on power delivery, vol. 23, No. 2, April 2008.
[7] KEPCO, Supply agreement of electricity, 2013.11.
[8] KEPCO, Supply agreement enforcement bylaws of electricity, 2014.01.

◇ 저자소개 ◇

홍종석(洪鍾碩)
1972년 12월 2일생. 2000년 안양대 전기공학과 졸업. 2002년 숭실대대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 숭실대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 포스코ICT R&D센터 수석연구원.

강병욱(姜炳旭)
1985년 1월 21일생. 2010년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

채희석(蔡熙石)
1984년 10월 6일생. 2011년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학과 석박 통합과정.

김재철(金載哲)
1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학부 교수, 본 학회 회장