

리튬이온 배터리의 SOC 제어가 가능한 단상 멀티레벨 컨버터 시뮬레이션

(The Simulation of Single Phase Multi-Level Converter which can control the SOC of Lithium-Ion Battery Units)

김재홍* · 김일환**

(Jae-Hong Kim · Eel-Hwan Kim)

Abstract

This paper proposes a new control scheme of lithium ion battery units based on single phase multi-level converter. In the DC/AC converter applications using battery storage system, it is necessary to control the balancing voltage of individual battery units for high efficiency utilization. Using the proposed control scheme, the DC/AC single phase converter system is applied. To verify the effectiveness of the proposed control scheme, computer simulation is accomplished. In the computer simulation, lithium-ion battery units and single phase multi-level converter system are modeled and carried out using Psim simulation program. It will be helpful for design and applications of energy storage system with lithium-ion battery.

Key Words : Multi-Level Converter, Lithium-Ion Battery Units, Energy Storage System

1. 서 론

최근 전 세계적으로 스마트그리드가 부각되고 있는데 여기서 중요한 요소 중 하나가 에너지저장에 관한 것이다. 현재 에너지저장 장치로 각광받고 있는 것이 2차 전지이다. 이와 관련된 연구와 투자가 우리나라 뿐 만 아니라 일본, 미국, 중국 등 일부 국가에서 활발

하게 이루어지고 있다.

오늘날 2차 전지를 이용한 다양한 형태의 응용이 이루어지면서 전지의 관리 및 제어에 대한 새로운 기술들이 요구되고 있다. 또한 국내 2차 전지 산업이 급성장하고 있기 때문에 2차 전지의 용량도 대응량화가 이루어지고 있는 추세이다[1]. 하지만 대응량화를 위하여 2차 전지 유닛구성이 필수적이며, 충·방전과 함께 발생할 수 있는 전압 불평형은 전지의 성능과 효율을 현저하게 떨어뜨릴 가능성이 있다.

따라서 본 논문에서는 각종 전력변환 설비에 적용 가능한 2차 전지로 리튬이온 배터리를 적용하고, 응용 설계 시 나타날 수 있는 동·특성들을 연구하기 위하여 리튬이온 배터리의 수학적 모델링을 도출하였다.

* 주저자 : 제주대학교 전기공학과
** 교신저자 : 제주대학교 전기공학과
Tel : 064-754-3678, Fax : 064-751-5281
E-mail : larry55@hanmail.net
접수일자 : 2011년 4월 29일
1차심사 : 2011년 4월 30일, 2차심사 : 2011년 5월 11일
심사완료 : 2011년 5월 19일

이때 모델링된 배터리의 출력 동특성을 실제 데이터와 비교하여 배터리의 유효성을 입증하였다.

또한 배터리를 적용한 여러 형태의 응용에서 저장된 에너지를 교류 계통에 전달할 때 장치의 소형화와 전력변환 효율 증가, 전력품질 개선 및 동작 신뢰성을 개선할 수 있는 전력변환시스템이 요구된다. 이를 위해 멀티레벨 컨버터 구조를 채용한 단상 에너지 저장시스템을 제안하고 전력전자 회로해석에 유용한 Psim 프로그램을 이용하여 배터리가 채용된 전력변환시스템의 동특성을 분석함으로써 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 이론고찰

2.1 리튬이온 배터리 모듈 모델링

본 논문에서 모델링한 배터리 모듈은 공칭전압 3.6[V]에 1.8[Ah]의 리튬이온 배터리 셀을 7S(Serial) 2P(Parallel)하여 구성한 국내산 배터리 모듈이며 최대충전 시 29.4[V], 방전 제한은 21[V]까지 가능하며 정격용량은 3.2[Ah] 최대 방전전류는 5C(16A)까지 가능하다.

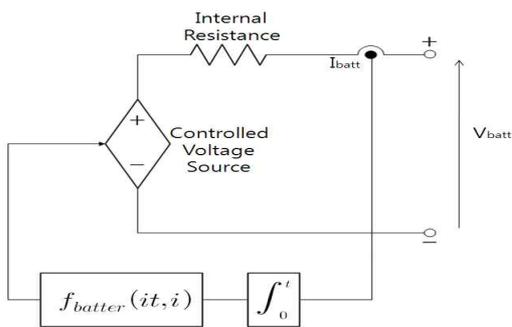


그림 1. 비선형 배터리 모델
Fig. 1. Non-linear battery model

$$f_{batter}(it) = E_0 - k \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it) \quad (1)$$

$f_{battery}$: 배터리 출력전압 [V]
 E_0 : 일정 배터리전압 [V]

A : exponential zone amplitude [V]
 B : exponential zone time constant inverse [Ah]⁻¹
 Q ; 정격용량 [Ah]
 k : 극성전압 [V]

본 논문에서 사용되는 배터리 모델은 Shepherd model[2]을 참조하여 그림 1과 같이 단순한 가변 전압 소스와 직렬 연결된 저항으로 구성하여 모델링 하였으며, 모델링에 필요한 각종 상수들은 배터리의 실제 방전 곡선을 이용하여 도출하였다[3]. 또한 식 (1)을 이용하여 방전 전류 및 SOC(State Of Charge)에 따른 전압의 동특성을 표현하였다.

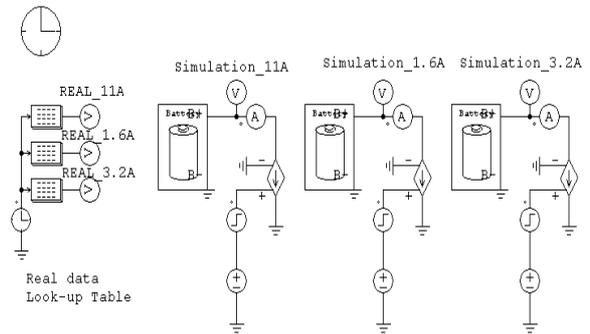


그림 2. 배터리 모델링용 Psim 회로도
Fig. 2. The schematic diagram of Psim simulation for battery modeling

그림 2는 등가화한 7S, 2P 리튬이온 배터리 모델을 실제 데이터와 비교하기 위해 구성한 Psim 시뮬레이션 회로도이다. 11[A] 방전과, 1.6[A] 방전, 3.2[A] 방전 3가지의 방전 전류별로 록업 테이블화 된 실제 데이터와 모델링을 통한 시뮬레이션 데이터를 비교하기 위해 회로를 구성하였다. 그림 3은 그림 2의 배터리 모델의 내부 등가 회로이며 식 (1)을 등가화한 그림이다.

그림 4는 11[A], 1.6[A], 3.2[A]의 방전전류에 따라 변화하는 배터리 출력 전압을 시뮬레이션하였으며, 각각을 실제 방전 곡선과 비교한 결과 배터리의 출력 전압 및 충전용량(SOC)특성이 매우 유사함을 보이고 있다.

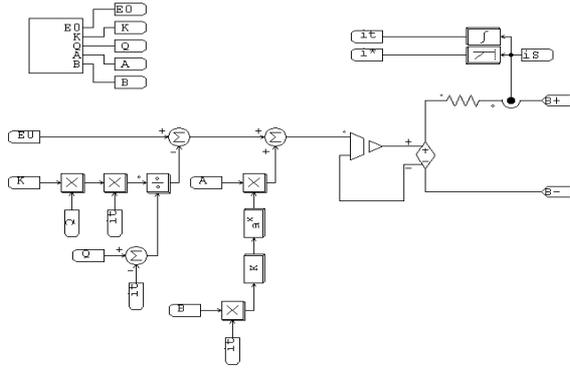


그림 3. 배터리 등가 회로도
Fig. 3. The equivalent circuit of the battery

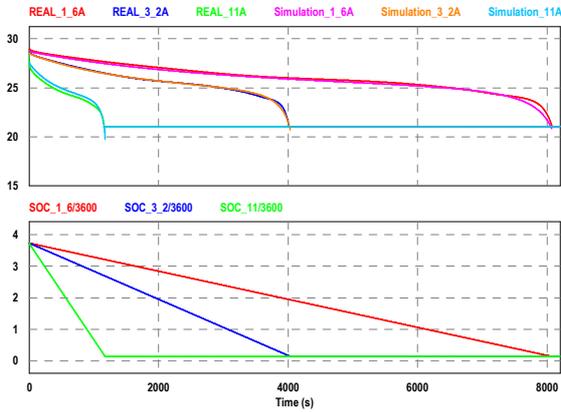


그림 4. 방전특성 비교 그래프
Fig. 4. The Discharge curve of different C rate

2.2 MLDC 모델링

본 논문에서 적용한 에너지 저장장치는 MLDC (Multi-Level DC Level) 컨버터를 전력 변환장치로 채용하고 있으며 이는 기존 6 Pulse 인버터에 비해 출력전압이 Sine 파에 근접하므로 전류고조파 저감 및 부가적으로 설치되는 수동 필터를 제거할 수 있게 해주며, 직접적으로 고전압을 발생함으로 변압기를 제거하여 계통연결이 가능하며, 스위칭 소자에 상대적으로 낮고 균등한 전압을 걸리게 하여 스위칭 소자의 스트레스가 줄어든다[4]. 앞으로 제안할 MLDC 스위칭 방식은 기존 방식에 비해 배터리의 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다.

2.2.1 기존 MLDC 모델 및 스위칭 방식

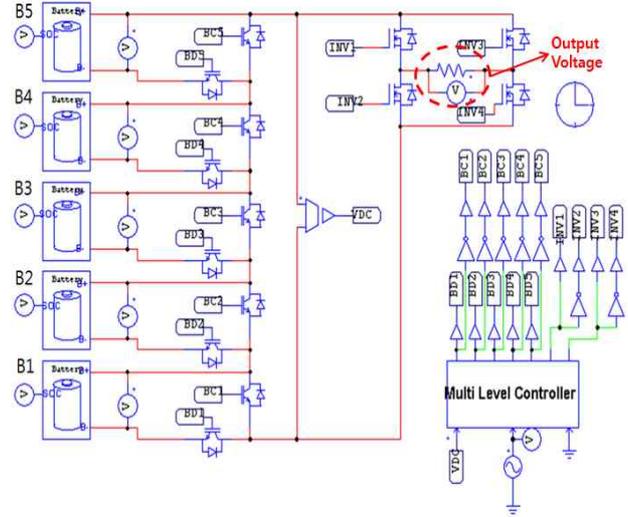


그림 5. MLDC Psim 모델
Fig. 5. The Schematic of MLDC

그림 5는 Psim으로 구현한 MLDC 모델이며 제어 방법을 설명하기 위해 5단 구성을 하였다. 각 단계는 모델링된 배터리 모듈이 연결되어 있으며 각 배터리를 직렬연결 또는 By-Pass 시킴에 따라 출력직류 전압이 가변되게 된다. 직렬연결 시 배터리와 연결된 2개의 스위칭 소자중 BCn은 off, BDn을 on하여 구성하며, 반대의 경우 By-Pass 되게 된다. 직류 링크와 연결된 단상 풀브리지 인버터는 직류 전원을 부하에 정·역 방향으로 연결하여 교류를 만들어 내는 역할을 하게 된다.

그림 6은 기존 MLDC 컨버터의 스위칭 방식에 대해 묘사하고 있으며 이는 일반적으로 고정 직류 전원을 사용하여 컨버팅 하는 경우에는 문제가 없으나 본 논문의 경우 SOC 또는 부하 전류에 따라 전압이 가변되는 배터리 직류 전원을 사용하기 때문에 기존 방식을 사용하는 경우, 그림 7과 같이 스위치 On 시간이 긴 Base 배터리 모듈은 급격한 SOC 감소를 보이고 On 시간이 짧은 Top 배터리 모듈은 SOC 감소가 적다. 이러한 불평형 상황은 배터리 모듈간 전압 불평형의 원인이 되고 배터리 축전 에너지를 비효율적으로 사용하게 된다.

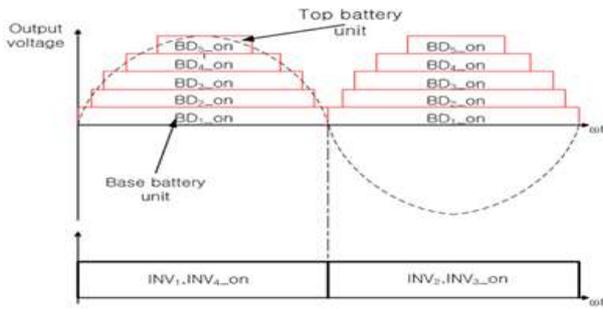


그림 6. 기존의 MLDC 스위칭 방식
Fig. 6. Conventional MLDC switching method

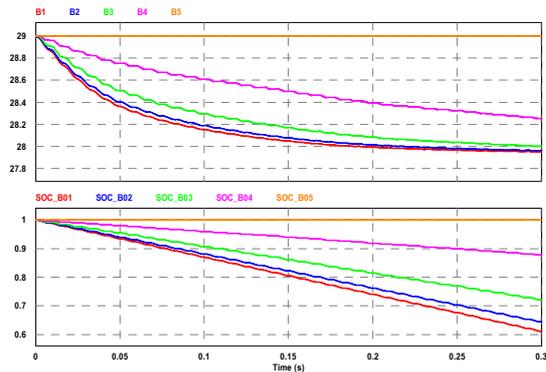


그림 7. 기존의 MLDC 스위칭방식에 의한 배터리 모듈의 전압과 SOC
Fig. 7. The voltage and SOC of individual battery unit with existing MLDC switching method

2.2.2 제안된 MLDC 스위칭 방법

그림 8은 제안된 MLDC 스위칭 방식을 나타내고 있다. 이 스위칭 방식은 매 주기마다 기본 배터리 모듈과 Top 배터리 모듈을 쉬프팅 시키는 방법으로서 그림 5의 B1, B2, B3, B4, B5 배터리와 스위치를 참조하면, 첫 번째 주기에서는 B1→B2→B3→B4→B5가 차례로 DC링크에 추가 접속되어 첫 번째 주기의 피크 전압을 만들게 되며, 이때의 Base battery unit 접속 스위치는 BD₁이고 Top battery unit은 BD₅이다. 이때 그림 6과 같이 B1은 가장 긴 시간 전력을 공급하고 B5는 가장 짧은 시간 전력을 공급하게 된다. DC링크에 전력을 공급하는 시간을 균등화하기 위해, 그림 8의 두 번째 주기는 B2→B3→B4→B5→B1 순서로 DC링크에 접속하고 있다. 이때의 Base Battery unit 접속 스위치는 BD₂이고 Top battery unit은 BD₄

이 된다. 계속적으로 Base Battery unit 접속스위치와 Top Battery unit 접속스위치를 쉬프트 시키면 각 배터리 모듈의 전압과 SOC는 그림 10처럼 기본과의 주기와 직렬로 연결된 배터리 모듈의 개수의 곱에 해당하는 주기마다 전압과 SOC 균등화가 이뤄지게 된다. 그림 9는 이 방식을 사용한 MLDC 컨버터의 출력전압을 보여주고 있으며 정현파와 같은 형태의 출력 파형을 갖게 됨으로 일반적인 4펄스 단상 인버터만을 사용했을 때와는 달리 고조파를 개선하기 위한 수동필터를 설치하지 않아도 되는 장점이 있다.

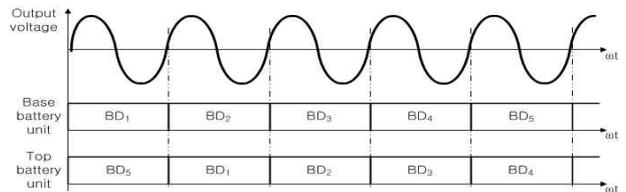


그림 8. 제안한 MLDC 스위칭방식
Fig. 8. Proposed MLDC switching method

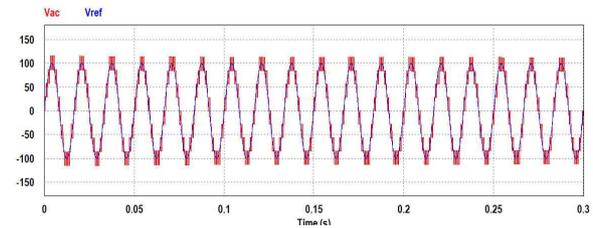


그림 9. MLDC 출력 AC 전압
Fig. 9. The output AC Voltage of MLDC

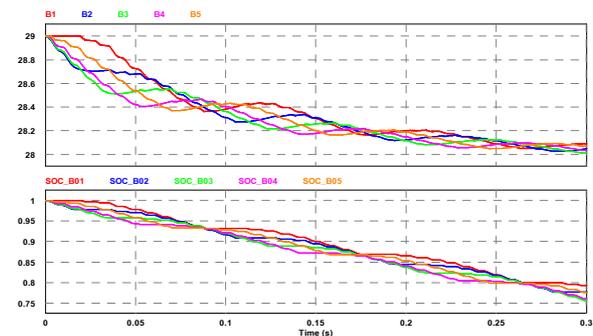


그림 10. 제안한 MLDC 스위칭방식에 의한 배터리 모듈의 전압과 SOC
Fig. 10. The voltage and SOC of individual battery unit with proposed switching method

3. 단상에너지 저장장치의 제어기와 시뮬레이션 결과

스마트 그리드에 대한 관심과 함께 미래의 전력망의 핵심은 효율적 에너지 사용 및 에너지 절감에 있다. 스마트 하우스 또는 스마트 빌딩은 효율적 에너지 사용을 위해 각자의 에너지 저장장치를 설치하고 스마트 그리드 계통에 연계되게 된다. 따라서 에너지 저장 장치는 에너지 충전 또는 에너지 방전에 손실이 적고 효율적인 시스템이 되어야 한다는 것이 중요한 포인트이다. 본 논문에서는 스마트 홈에 적용될 수 있는 단상 에너지 저장 시스템을 소개하고 그리드에서 요구되는 전력사항 즉 전력 요금의 높거나 낮은 상황에서 본 시스템이 에너지의 충전 또는 방전을 효율적으로 시행함을 보이고자 한다.

그림 11은 본 논문에서 제안한 단상에너지 저장시스템의 Psim 도면이며 약 3.3[kWh]의 용량으로 설계 되어 있으며 시스템은 220[V]의 단상 전원계통과 가정용 홈 부하 사이에 연계되어 있다.

그림 11을 통해서 에너지 저장시스템의 제어기는 4 부분으로 구성되어 있으며 첫 번째는 단상 전원의 위상을 알아내기 위한 단상 PLL 위상 검출기이며 단상 전원의 전압 전류에 대해 90[°] 위상 지연을 하고 DQ 위상 변환을 통해 DQ 동기 좌표로 전압전류를 표현해 주는데 쓰인다.

두 번째는 전력 지령치 생성기로 수식(2)에 따라 유효·무효 전력 지령치에 따라 전류 지령치 Id, Iq를 생성하는 역할을 한다.

$$P = \frac{1}{2}(V_d i_d + V_q i_q) \tag{2}$$

$$Q = \frac{1}{2}(V_q i_d - V_d i_q)$$

연립하여 $i_{d\ ref}$, $i_{q\ ref}$ 를 풀면 식(3)과 같다.

$$i_{d\ ref} = \frac{2(V_d P + V_q Q)}{V_d^2 + V_q^2} \tag{3}$$

$$i_{q\ ref} = \frac{2(V_q P - V_d Q)}{V_d^2 + V_q^2}$$

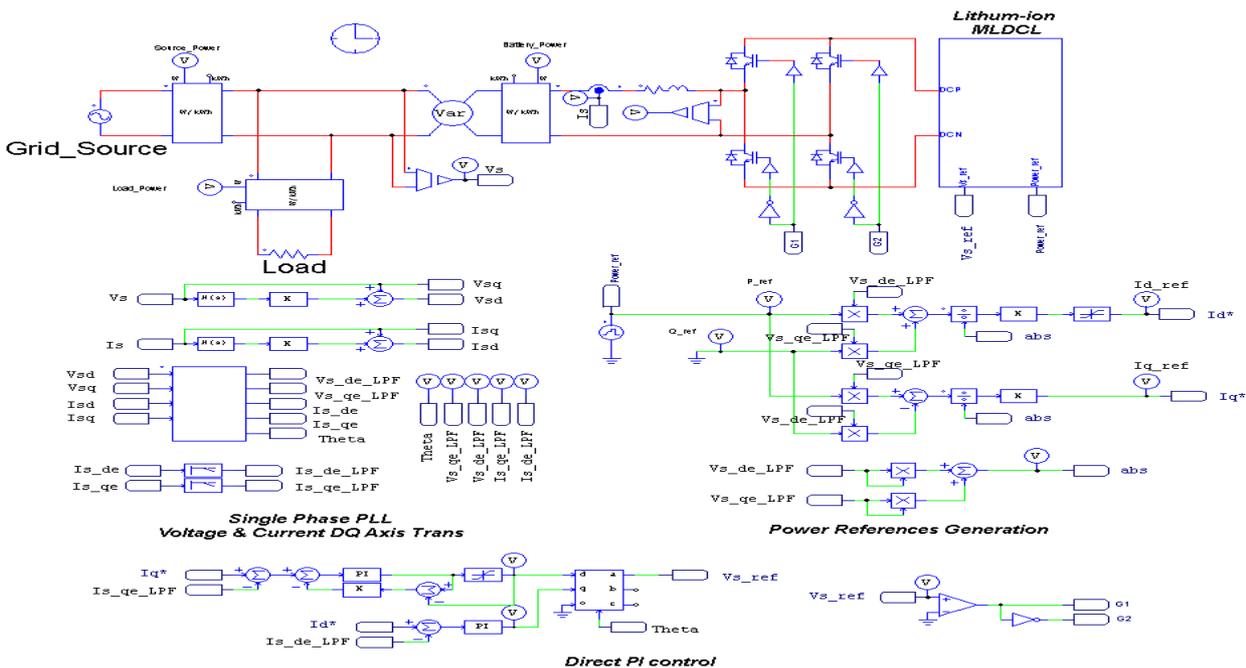


그림 11. 제안한 단상 에너지 저장시스템의 Psim 모델
Fig. 11. The Psim diagram of the proposed single phase energy storage system

세 번째는 직접 PI 제어기로 입력받은 I_d , I_q 지령치를 이용하여 V_d , V_q 지령치를 생성해 내며 상변환기를 통해 결국 V_a 단상 전압 지령치로 변환된다.

마지막으로 리튬이온 MLDCL 모듈은 멀티레벨 컨버터를 삽입한 모듈로서 그림 12에 등가 모델이 묘사되어 있다.

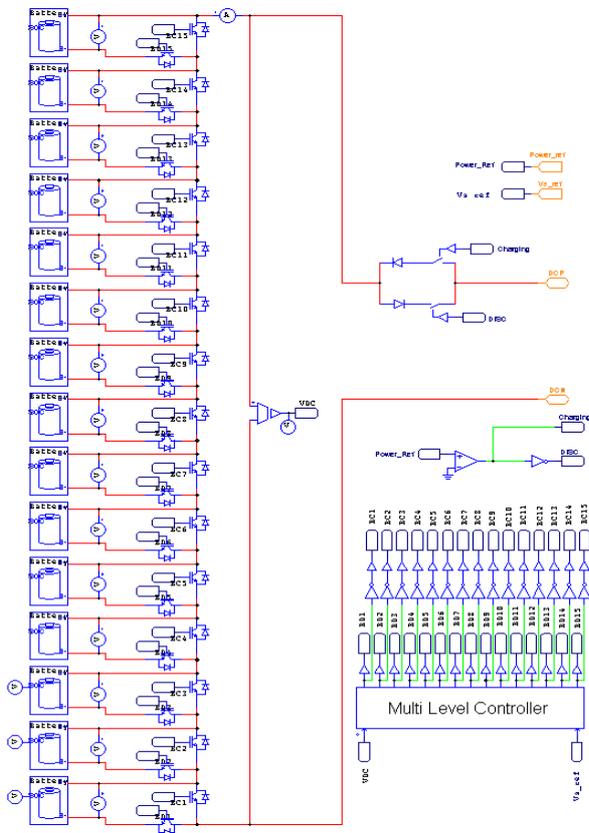


그림 12. MLDCL 모듈 모델
Fig. 12. The Psim diagram of the MLDCL module

그림 13은 제안된 시스템의 시뮬레이션 결과이며 초기에는 에너지 저장 시스템이 약 3[kW]의 전력을 공급하고 있으며 스마트 홈에서는 계통으로부터 12[kW]의 전력을 받아서 소비하는 전력은 15[kW]이다. 즉 계통의 에너지 비용이 비싸서 축전된 에너지를 활용하여 에너지의 효율적 이용을 하고 있다. 그림 13의 후반부는 계통의 에너지 비용이 낮은 경우이며 이때는 스마트 홈의 에너지는 15[kW]로 고정이지만 에너지 저장장치는 낮은 비용의 에너지로 3[kW]를 축전하고

있으며 계통으로부터 공급되는 에너지는 15[kW]가 된다. 마지막 그래프에서 볼 수 있듯이 에너지의 충·방전이 지속되는 동안에도 각각 배터리 모듈의 전압과 SOC는 제안된 스위칭 기법에 의해 균등관리 되고 있음을 알 수 있다.

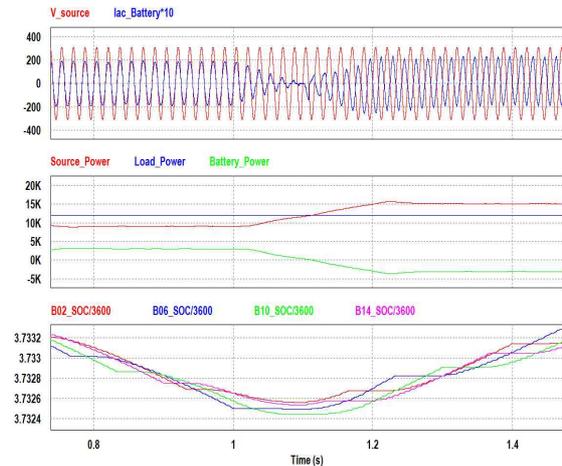


그림 13. 제안한 단상 에너지 저장장치의 시뮬레이션 결과
Fig. 13. The simulation result of proposed single phase energy storage system.

4. 결 론

본 논문에서는 각종 전력변환시스템에 적용이 가능한 리튬이온 배터리 모델링에 대해 기술하였으며, 이는 방전 특성 그래프를 이용하여 모델링 상수를 쉽게 도출할 수 있고 전류와 SOC에 따른 전압변동의 동적 특성을 함께 고찰할 수 있어[3], 시스템의 동작 신뢰성을 검토할 때 적절히 사용될 수 있다고 생각한다. 또한 에너지 저장시스템에 MLDCL 컨버터를 적용하여 기존 6펄스 또는 4펄스에 비해 변압기 또는 필터 사용 없이 계통과 에너지 저장 시스템을 접속할 수 있으며 고조파 발생률을 현저하게 낮출 수 있어 높은 전력품질의 에너지를 공급할 수 있다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 기존 MLDCL 제어기의 스위칭 기법을 가변 전원인 배터리에 적용할 수 있도록 수정 제안한 기법이며 이를 이용하여 에너지 저장 매체를 효율적으로 사용할 수 있음을 나타내었다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.2007-P-EP-HM-E-09_0000).

References

- [1] 한국에너지 기술평가원, “그린에너지 전략 로드맵-에너지 저장”, 2009. pp.4-5.
- [2] C. M. Shepherd, “Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge” Journal of Electrochemical Society, Volume 112, Jul. 1965 Page(s): 657-664.
- [3] Tremblay, O., Dessaint, L.-A. Dekkiche, A.-I. “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles” Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. IEEE, Page(s): 284-289.
- [4] Gui-Jia Su, “Multilevel DC-Link Inverter” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 3, MAY/JUNE 2005 , Page(s): 848-8.

◆ 저자소개 ◆



김재홍 (金宰弘)

1974년 5월 5일생. 2000년 제주대학 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



김일환 (金一煥)

1962년 3월 29일생. 1987년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년~현재 제주대학교 전기공학과 교수. 1995~1996년 오하이오주립대 전기공학과 Post_Doc.. 2004~2005년 와싱턴대 전기공학과 Visiting Scholar.