

무정전전원장치용 3-레벨 인터리브드 충전전기에 대한 연구

구태근¹, 이인환¹, 조영훈[†]

A Study on 3-level Interleaved Charger-Discharger for Uninterruptible Power Supplies

Tae-Geun Koo¹, In-Hwan Lee¹, and Young-Hoon Cho[†]

Abstract

This paper proposes a simple 3-level interleaved charger-discharger for the uninterruptible power supply (UPS) with various combinations of battery cells. The proposed converter not only improves charging and discharging efficiency, but also reduces the physical volume and the cost. Furthermore, the converter also offers the capability of the neutral point voltage, so that more stable operation can be obtained. In addition, the proposed converter significantly reduces the ripple current of the battery inductor, thereby providing an expected life extension of the battery. Experimental results for a 300kVA UPS prototype verify the validity of the proposed converter. The proposed charger-discharger is suitable for UPSs and energy storage systems (ESSs) with wide input battery voltage ranges.

Key words: 3-level converter, Interleaved charger-discharger, Neutral point voltage, Uninterruptible power supply(UPS), Ripple current of battery inductor

1. 서 론

최근 3-레벨 PWM(pulse-width modulation) 정류기와 인버터를 적용한 무정전전원장치들이 출시되고 있지만 충전부는 종래의 2-레벨 토폴로지를 그대로 적용하고 있는 제품들이 대부분이다. 2-레벨 충전전기는 회로의 구조상 고효율화가 쉽지 않고 큰 리플전류 등 여러 가지 단점들을 가지고 있어 고효율 달성 및 배터리 충전 횟수의 비약적 증가를 요구하는 최근의 미래형 무정전전원장치에 적합하지 않다. 반면에 3-레벨 인터리브드 충전전기를 무정전전원장치에 적용할 경우 여러 가지 장점을 갖는다.

첫 번째로 스위칭 소자의 전압 정격 최적화와 동작 시 자성 소자의 손실 감소로 인한 충전 효율의 향상이다. 3-레벨 인터리브드 충전전기를 무정전전원장치에

적용할 경우 무정전전원장치의 교류전원입력이 정상일 때 PWM 정류기와 인버터의 손실로 산출되는 종합효율 뿐만 아니라 정전 시 효율도 향상되어 무정전전원장치의 고효율 운전영역이 확대된다.

두 번째로 높은 효율 달성으로 인하여 방열체적이 개선된다. 일반적으로 무정전전원장치는 교류입력전원이 정상상태에서 PWM 정류기가 운전되면 배터리방전기는 정지 상태이고, 교류입력전원이 정전이 되면 PWM 정류기의 운전이 정지되고 배터리 방전기가 운전되는 인터록 형식의 동작을 한다. 따라서 하나의 방열기에 PWM 정류기소자와 배터리방전기소자를 병합하여 취부하면 방열기의 이용률을 향상시키고 방열체적을 절감할 수 있다. 그런데 3-레벨 PWM 정류기와 종래의 2-레벨 충전전기를 하나의 방열기에 병합하여 취부 할 경우, 손실이 큰 2-레벨 충전전기의 방열을 위한 물리적인 방열체적이 증가하게 된다. 반면 높은 효율을 갖는 3-레벨 인터리브드 충전전기를 적용하면 3-레벨 PWM 정류기와 일체형 방열구조를 채택하더라도 컴팩트한 방열기 설계가 가능하여 무정전전원장치의 체적 감소 및 원가 절감에 기여할 수 있다.

세 번째로 배터리 인덕터의 충전리플전류를 줄여 배터리 수명연장 효과를 기대할 수 있다^{[1][2]}. 일반적으로 배터리의 충전전류는 방전전류보다 훨씬 작은 값으로

Paper number: TKPE-2017-22-6-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: yhcho98@konkuk.ac.kr
Dept. of Electrical Eng., Konkuk University
Tel: +82-2-450-4109 Fax: +82-2-447-9168

¹ Sungshin Electric Co. Ltd. Research Institute
Manuscript received Sep. 25, 2017; revised Oct. 9, 2017;
accepted Nov. 27, 2017

— 본 논문은 편집위원회에서 기술논문으로 추천됨

TABLE I
BATTERY INPUT CELLS OF UNINTERRUPTIBLE
POWER SUPPLIES

Battery Cells	Minimum Voltage(discharge)	Maximum Voltage(charge)
16	163 [Vdc]	216 [Vdc]
20	204 [Vdc]	270 [Vdc]
30	306 [Vdc]	405 [Vdc]
40	408 [Vdc]	540 [Vdc]

권장되고 있다. 따라서 배터리 충전전기에 인덕터의 설계는 방전모드를 기준으로 설계하게 되며 방전모드로 설계된 인덕터를 충전모드에 사용하게 될 경우 인덕터스값이 작아 충전리플전류가 과도해지는 단점이 있다. 인덕터의 설계를 충전모드로 설계하면 배터리 인덕터의 사이즈가 커져 경제성이 저하되므로 경험에 의해 충전 전 모드를 적절히 만족하는 인덕터스값으로 설계하여 적용하고 있는 실정이다. 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 2-레벨 인터리브드 충전전기가 제안되고 있으나 효율이 3-레벨 인터리브드 충전전기에 미치지 못하는 단점이 있다. 3-레벨 인터리브드 충전전기는 인터리브드 효과에 의하여 인덕터에 인가되는 전압의 주파수를 체배하여 인덕터의 리플전류를 감소시키고 고효율로 운전되므로 상기와 같은 문제점을 해결할 수 있다.

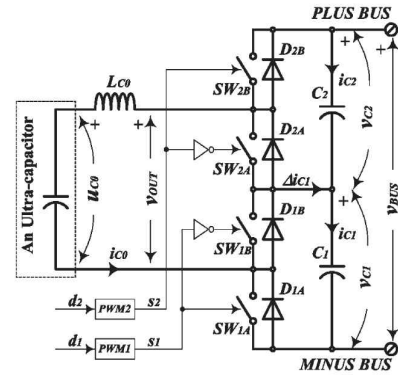
네 번째로 중성점제어기능이다. 3-레벨 인터리브드 충전전기는 방전모드에서 직류링크단 상하 캐패시터의 전압불균형을 일치시킬 수 있는 옴셋 제어가 가능한 장점이 있다.

상기와 같이 3-레벨 인터리브드 충전전기를 무정전전원장치에 적용할 경우 다양한 장점을 갖지만 무정전전원장치에 대한 응용사례에 대한 보고는 미미하다. 게다가 3-레벨 인터리브드 충전전기는 배터리 입력전압과 직류링크전압의 상관관계에 의하여 종래의 2-레벨 충전전기보다 다양한 동작모드가 존재한다. 따라서 본 논문은 상용의 표준 배터리 입력전원들에 3-레벨 인터리브드 충전전기를 적용 시 발생하는 다양한 동작모드의 분석을 통하여 무정전전원장치에의 적합성을 검토하였다. 또한 3-레벨 인터리브드 충전전기를 시제품 3-레벨 300kVA 무정전전원장치에 적용하여 실험을 통해 그 적합성을 확인하였다.

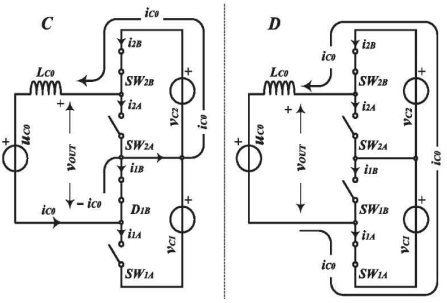
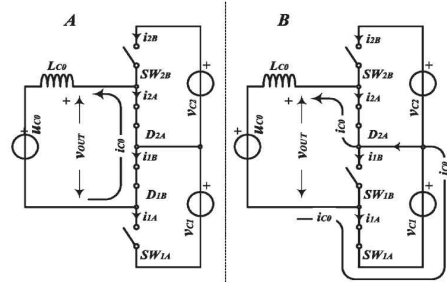
2. 무정전전원장치 배터리입력과 충전전기

표 1은 무변압기형 3상4선식 380/220V 무정전전원장치에 일반적으로 사용되고 있는 납배터리의 셀 수와 충전 시 최저 및 최고 전압을 나타낸다.

표 1에서 현재 사용되고 있는 납배터리의 표준 셀 입력력은 16, 20, 30, 그리고 40 셀로 직렬로 연결하여 사용



(a)



(b)

Fig. 1. Bidirectional three-level dc-dc converter.

한다. 이 때 최고전압은 40 셀을 직렬로 연결 시 540 [Vdc] 로서 무정전전원장치의 직류링크전압 700[Vdc] 보다 낮은 값을 갖는다.

무정전전원장치는 충전전기를 이용하여 교류입력이 정상 시 직류링크전압 700[Vdc]를 감압하여 상기 배터리를 충전하고, 교류입력이 정전 시 충전된 배터리전압을 승압하여 700[Vdc]를 직류링크에 공급한다.

현재 일반적으로 사용하는 충전전기는 2-레벨 구조를 가지며 전술한 바와 같이 여러 가지 단점을 갖고 있으나 충전 시 벡-모드, 방전 시 부스트-모드 2가지의 동작모드로 상기 표준 셀 수의 배터리입력에 부응하여 사용되고 있다. 그러나 3-레벨 인터리브드 충전전기는 직류링크 상하단 전압과 배터리전압의 크기의 상관관계에 의하여 다양한 동작모드를 가진다. 다음 장에서는 3-레벨 인터리브드 충전전기의 다양한 동작모드 분석을 수행하고 방전시 중성점제어를 통한 성능 향상에 관하여 기술한다.

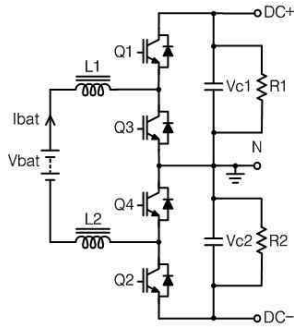


Fig. 2. Proposed 3-level interleaved battery charger - discharger.

3. 3-레벨 인터리브드 충방전기

3.1 회로구조 및 적용사례

그림 1은 최근 슈퍼커패시터, 전기자동차, 배터리 에너지저장장치(BESS)등에 응용 사례가 있는 3-레벨 dc-dc 컨버터의 회로 및 동작모드이다.^{[3]-[5]} 그 중 슈퍼커패시터의 응용 사례는 그림 1의 (a)와 같이 내측 스위치 SW_{2A}, SW_{1B} 와 외측 스위치 SW_{2B}, SW_{1A} 간에 충방전 시 인터록 기능이 설정되지 않고 상보형 PWM으로 연관된 동작을 하며, 그림 (b)와 같이 4가지 형태만의 동작모드로 무정전전원장치에 요구되는 다양한 셀 수의 배터리에 부합하기 어려운 점이 있다. 전기자동차 충전기에 응용된 사례의 경우 본 논문과 동일하게 외측 스위치는 충전기로, 내측 스위치는 방전기로 기능이 독립되어 있으나 충방전 시 각각 2개의 동작 모드만을 가지는 제어형태로서 다양한 셀 수의 배터리 입력력을 가지는 무정전전원장치에 적용하는 데 한계가 있다.^[6]

본 논문의 3-레벨 인터리브드 충방전기의 충전부는 그림 2에서 외부 스위치 Q1, Q2와 내부 스위치 Q3, Q4의 바디다이오드를 이용하고, 방전부는 내부 스위치 Q3, Q4와 외부 스위치 Q1, Q2의 바디다이오드를 이용한다. 인덕터 L1, L2는 충방전기에 공용으로 사용한다. 스위치 Q1, Q2는 180도의 위상차를 갖고 동일한 Duty로 교번적으로 스위칭하는 PWM 신호가 공급된다. 다음으로 Q3, Q4에는 마찬가지로 180도의 위상차를 갖는 동일한 Duty의 PWM 신호가 인가된다. 이와 같은 동작으로 인하여 충전과 방전 시 PWM신호는 완전히 독립된 인터록 상태를 유지할 수 있다. 한편 무정전전원장치의 교류 입력이 정상 시 Q3, Q4가 오프상태로 되고, Q1, Q2 스위치를 동작시켜 배터리를 충전시킨다. 그리고 정전이 발생하여 교류 입력이 들어오지 않을 경우에는 Q1, Q2는 오프되고 Q3, Q4가 동작하여 충방전기는 부스트 모드로 동작한다. 이 때 Q3와 Q4의 Duty값에 옵셋을 적절히 주어 Vc1와 Vc2를 제어할 수 있다.

3.2 동작모드 분석

그림 3은 본 논문이 제안하는 3-레벨 인터리브드 충방전기의 동작모드들과 PWM신호를 나타내고 있다. 그

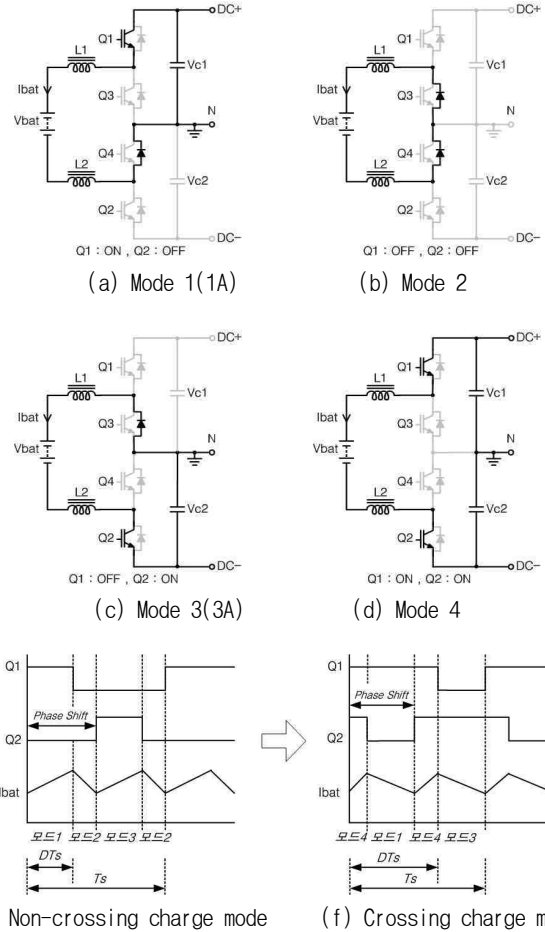


Fig. 3. Operation modes of 3-level interleaved battery charger.

림 3의 (e)는 Q1과 Q2에 인가되는 PWM이 교차하지 않는 독립(Non-crossing)충전모드이며 (f)는 Q1과 Q2에 인가되는 PWM이 교차하는 중복(Crossing)충전모드를 나타낸다.

독립충전모드와 중복충전모드 PWM에 의한 스위치의 상태는 그림 3에서 총 4개가 발생한다. 독립충전모드는 정상상태 직류링크 전압의 1/2(350V)인 Vc1 또는 Vc2가 배터리전압 Vbat 보다 큰 조건에서 발생하며 모드 1에서 모드 2로, 모드 3에서 모드 2로 동작을 반복하며, 중복충전모드는 Vc1 또는 Vc2가 배터리전압 Vbat 보다 작은 조건에서 발생하며 모드 4에서 모드 1A로, 모드 4에서 모드 3A로 동작을 반복한다. 그런데 그림3-(a)와 (c)에서 모드 1과 1A, 모드 3과 3A로 구별한 이유는 동일한 스위치 상태에서 인덕터의 에너지상태가 다르기 때문이다. 모드 1, 3은 스위칭의 시작점으로 인덕터에 에너지가 흡수되는 구간이며 모드 1A, 3A는 스위칭의 종점으로 인덕터의 에너지가 방출되는 구간이다.

따라서 스위치와 인덕터의 에너지상태를 고려한 충전 동작모드는 총 6개가 발생된다. 표 2에 배터리 입력 셀 수에 따른 동작모드의 변화를 정리하였다.

TABLE II
CHARGING MODES WITH BATTERY CELLS

Cells	Voltage[V]	Mode			
		1	2	3	2
16	163~216	1	2	3	2
20	204~270	1	2	3	2
30	306~405	1	2	3	2
		4	1A	4	3A
40	408~540	4	1A	4	3A

표 2에서 배터리 셀의 수가 30인 경우 독립, 중복충전 모드에서 총 6가지의 모드변화가 발생하며, 본 논문은 30셀인 경우를 예로 들어 동작모드를 설명하고자 한다. 30셀인 경우에 대해서 무정전전원장치의 기능을 만족하면 나머지 셀들도 자연스럽게 만족하는 것으로 간주할 수 있다.

표 2에서 최초 무정전전원장치를 사용중에 배터리가 완전히 방전되는 상황을 가정하자. 이 때 일반적인 납배터리의 경우 방전중지전압은 306VDC이다. 따라서 306VDC에서 재충전을 시작한다고 가정하면 Vc1 또는 Vc2가 배터리전압 Vbat 보다 큰 조건이므로 최초 제로 듀티에서 시작한 PWM은 독립충전모드로 동작하여 충전방전기는 모드 1에서 모드 2로, 모드 3에서 모드 2로의 동작을 반복하게 된다. 동작하는 과정을 살펴보면 스위칭 주기의 시작점에서 Q1 온 시 직류전원 Vc1으로 부하 Vbat를 충전하고 Q1 오프 시 순환모드로 동작한다. 스위칭 주기의 나머지 반구간에서 Q2 온 시 직류전원 Vc2로 부하 Vbat를 충전하고 Q2 오프 시 순환모드로 동작한다. 독립충전모드 1→2에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (1)과 (2)로 주어지며, 독립충전모드 3→2에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (3)과 (4)로 주어진다.

$$(V_{c1} - V_{bat})d_{Q1} + (-V_{bat})d'_{Q1} = 0 \quad (1)$$

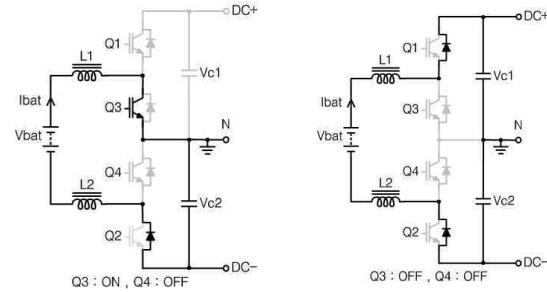
$$V_{bat} = V_{c1}d_{Q1} \quad (2)$$

$$(V_{c2} - V_{bat})d_{Q2} + (-V_{bat})d'_{Q2} = 0 \quad (3)$$

$$V_{bat} = V_{c2}d_{Q2} \quad (4)$$

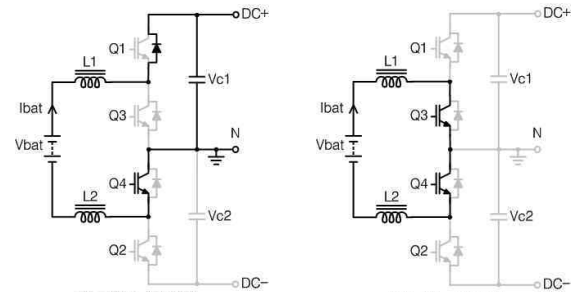
충전모드에서 중성점제어는 Vc1 또는 Vc2를 개별로 방전하는 모드가 존재하여야 가능하다. 독립충전모드에서 Vc1 또는 Vc2를 개별적으로 방전하는 모드는 모드 1과 모드 3이다. 여기서, 3레벨 인터리브드 충전장치의 충전 시 중성점제어는 추후 연구되어야 하고 검증되어야 할 과제이다.

충전이 진행되어 Vc1 또는 Vc2가 배터리전압 Vbat



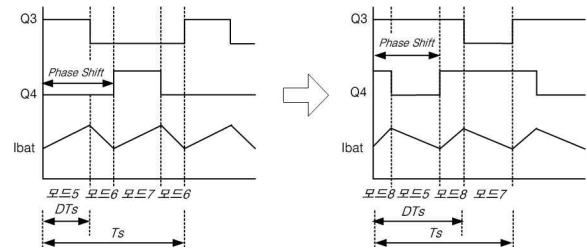
(a) Mode 5(5A)

(b) Mode 6



(c) Mode 7(7A)

(d) Mode 8



(e) Non-crossing discharge mode (f) Crossing discharge mode

Fig. 4. Operation modes of 3-level interleaved battery discharger.

보다 작은 조건이 되면 Q1과 Q2에 인가되는 PWM의 듀티가 50%를 초과하여 두 PWM은 교차되어 중복충전 모드로 동작하고 충전방전기는 모드 4에서 모드 1A로, 모드 4에서 모드 3A로의 동작을 반복하게 된다.

모드 4에서 모드 1A로 동작하는 과정을 살펴보면 모드 4에서 Q1과 Q2가 동시에 온 되어 전압(Vc1+Vc2)로 부하 Vbat에 에너지를 공급하는 동시에 인덕터를 충전시킨다. 이후 모드 1A에서 Q2가 오프되면 도통경로에 전원 Vc1이 포함되고 인덕터의 에너지가 방출되는 부스트모드로 동작한다. 비슷하게 모드 4에서 모드 3A로 동작하는 과정도 설명될 수 있다. 중복충전모드 4→1A에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (5)와 (6)으로 주어지며, 중복충전모드 4→3A에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (7)과 (8)로 주어진다.

$$(V_{c1} + V_{c2} - V_{bat})d_{Q1//Q2} + (V_{c1} - V_{bat})d'_{Q1//Q2} = 0 \quad (5)$$

$$V_{bat} = (V_{c1} + V_{c2})d_{Q1//Q2} + V_{c1}d'_{Q1//Q2} \quad (6)$$

TABLE III
DISCHARGING MODES WITH BATTERY CELLS

Cells	Voltage[V]	Mode			
16	163~216	8	5A	8	7A
20	204~270	8	5A	8	7A
30	306~405	5	6	7	6
		8	5A	8	7A
40	408~540	5	6	7	6

$$(V_{c1} + V_{c2} - V_{bat})d_{Q1//Q2} + (V_{c2} - V_{bat})d'_{Q1//Q2} = 0 \quad (7)$$

$$V_{bat} = (V_{c1} + V_{c2})d_{Q1//Q2} + V_{c2}'d'_{Q1//Q2} \quad (8)$$

그림 4는 본 논문이 제안하는 3-레벨 인터리브드 충전기의 방전동작모드들과 PWM신호를 나타내고 있다. 그림 4의 (e)는 Q3과 Q4에 인가되는 PWM이 교차하지 않는 독립방전모드이며 (f)는 Q3과 Q4에 인가되는 PWM이 교차하는 중복방전모드를 나타낸다.

독립방전모드와 중복방전모드 PWM에 의한 스위치의 상태는 충전과 마찬가지로 그림 4에서 총 4개가 발생한다. 독립방전모드는 배터리전압 Vbat가 정상상태 직류 링크 전압의 1/2(350V)인 Vc1 또는 Vc2 보다 큰 조건에서 발생하며 모드 5에서 모드 6으로, 모드 7에서 모드 6으로 동작을 반복한다. 여기서 중복방전모드는 배터리전압 Vbat가 Vc1 또는 Vc2가 보다 작은 조건에서 발생하며 모드 8에서 모드 5A로, 모드 8에서 모드 7A로 동작을 반복한다.

그림4(a)와(c)에서 모드 5와 5A, 모드 7과 7A를 구별한 이유는 동일한 스위치 상태에서 인덕터의 에너지상태가 다르기 때문이다. 모드 5, 7은 스위칭의 시작점으로 인덕터에 에너지가 흡수되는 구간이며 모드 5A, 7A는 스위칭의 종점으로 인덕터의 에너지가 방출되는 구간이다. 따라서 스위치와 인덕터의 에너지상태를 고려한 방전동작모드는 충전과 마찬가지로 총 6개이다. 표 3에 배터리 입력 셀 수에 따른 동작모드의 변화를 정리하였다.

표 3에서 배터리 셀의 수가 30인 경우 독립, 중복방전모드 총 6가지의 모드변화가 모두 발생하므로 앞의 경우와 마찬가지로 30셀인 경우를 예로 들어 방전동작모드를 설명하고자 한다.

표 3에서 무정전전원장치의 사용중 정전이 되면 배터리가 방전을 시작하며 배터리가 완전히 충전 되어 있다고 가정하면 일반적인 납배터리의 경우 방전개시전압은 405VDC이다. 이 때 배터리전압이 Vc1 또는 Vc2 보다 큰 조건이므로 최초 제로 듀티에서 시작한 PWM은 독립방전모드로 동작하여 충전기는 모드 5에서 모드 6으로, 모드 7에서 모드 6으로의 동작을 반복하게 된다. 동작하는 과정을 살펴보면 스위칭 주기의 시작점에서

Q3 온 시 벡-컨버터 모드로 배터리전원 Vbat를 이용하여 Vc2를 충전하는 동시에 인덕터에는 (Vbat-Vc2)/L의 시간곱에 해당하는 에너지를 저장한다. 그리고 Q3가 오프되며 이 때 인덕터의 에너지를 방출하는 부스트모드로 Vc1과 Vc2를 동시에 충전한다. 스위칭 주기의 나머지 반구간에서도 Q4 온 시 Vc2를 충전하며 Q4 오프 시 Vc1과 Vc2를 동시에 충전한다.

독립방전모드 5→6에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (9)와 (10)으로 주어지며, 독립방전모드 7→6에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (11)과 (12)로 주어진다.

$$(V_{bat} - V_{c2})d_{Q3} + (V_{bat} - V_{c1} - V_{c2})d'_{Q3} = 0 \quad (9)$$

$$V_{c2} = V_{bat} - V_{c1}d'_{Q3} \quad (10)$$

$$(V_{bat} - V_{c1})d_{Q4} + (V_{bat} - V_{c1} - V_{c2})d'_{Q4} = 0 \quad (11)$$

$$V_{c1} = V_{bat} - V_{c2}'d'_{Q4} \quad (12)$$

방전모드에서 중성점제어는 Vc1 또는 Vc2를 개별로 충전하는 모드가 존재하여야 가능하다. 독립방전모드에서 Vc1 또는 Vc2를 개별적으로 충전하는 모드는 모드 5와 모드 7이다. 따라서 독립방전모드에서는 Q3 PWM에 옵셋듀티를 부가하여 Vc2를 제어하고 Q4 PWM에 옵셋듀티를 부가하여 Vc1을 제어하여 Vc1과 Vc2의 전압차를 제거할 수 있다.

방전이 진행되어 배터리전압 Vbat가 Vc1 또는 Vc2가 보다 작은 조건이 되면 Q3과 Q4에 인가되는 PWM의 듀티가 50%를 초과하여 두 PWM은 교차되어 중복방전모드로 동작하고 충전기는 모드 8에서 모드 5A로, 모드 8에서 모드 7A로의 동작을 반복하게 된다.

모드 8에서 모드 5A로 동작하는 과정을 살펴보면 Q3와 Q4가 동시에 온 시 배터리전원 Vbat로 인덕터에 에너지를 저장하고, Q4 오프 시 인덕터의 에너지가 방출되어 Vc2를 충전시킨다. 모드 8에서 모드 7A로 동작하는 과정을 살펴보면 Q3과 Q4가 동시에 온 시 배터리전압 Vbat로 인덕터에 에너지를 저장하고, Q3 오프 시 인덕터의 에너지가 방출되어 Vc1을 충전시킨다. 중복방전모드 8→5A에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (13)과 (14)로 주어지며, 중복방전모드 8→7A에서 인덕터의 전압방정식과 출력전압은 식 (15)와 (16)으로 주어진다.

$$V_{bat}d_{Q3//Q4} + (V_{bat} - V_{c2})d'_{Q3//Q4} = 0 \quad (13)$$

$$V_{c2} = \frac{V_{bat}}{1 - d_{Q3//Q4}} \quad (14)$$

$$V_{bat}d_{Q3//Q4} + (V_{bat} - V_{c1})d'_{Q3//Q4} = 0 \quad (15)$$

$$V_{c1} = \frac{V_{bat}}{1 - d_{Q3//Q4}} \quad (16)$$

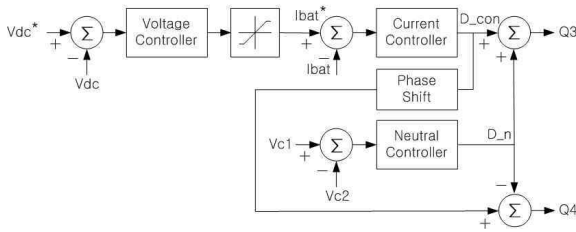


Fig. 5. Block diagram of neutral point control.

TABLE IV
SIMULATION PARAMETERS OF PROPOSED SYSTEM

Parameter	Value
System Capacity	300 [kVA]
Battery Cells	30 [Cell]
Battery Voltage(Vbat)	400 [V]
Vc1, Vc2	350 [V]
Vc1 Resistor	0.84 [Ω]
Vc2 Resistor	0.8 [Ω]
Switching frequency	7.5 [kHz]
Operating Mode	Non-crossing

중복방전모드에서 Vc1 또는 Vc2를 개별적으로 충전하는 모드는 모드 5A와 모드 7A이다. 따라서 중복방전 모드에서는 독립방전모드와 동일하게 Q3 PWM에 업셋 듀티를 추가하여 Vc2를 제어하고 Q4 PWM에 업셋 듀티를 추가하여 Vc1을 제어하여 Vc1과 Vc2의 전압차를 제거할 수 있다.

4. 시뮬레이션

제안한 3-레벨 인터리브드 충전전기의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM으로 방전상태 직류링크전압인 Vc1, Vc2 및 중성점 제어 시뮬레이션을 하였으며, 특히 스위치 온/오프 전 구간에 걸쳐서 전원(Vbat)으로부터 부하(Vc1, Vc2)로 에너지가 전달되는 독립방전모드에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 4와 같다. 그림 6은 방전 시 Vc1과 Vc2의 임피던스 불균형으로 Vc1과 Vc2의 전압차가 발생하나, 0.2초 시점에서 본 논문에서 제안한 중성점 제어를 수행함으로써 Vc1과 Vc2의 전압 불평형이 1ms 이내에 평형 상태로 균일하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

5. 실험

제안하는 3-레벨 인터리브드 충전전기를 적용한 3-레벨 300kVA 무정전전원장치의 시제품을 제작하였다. 그

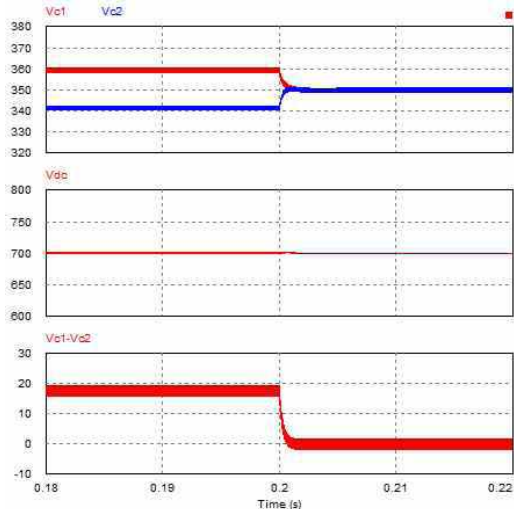


Fig. 6. Simulation waveforms of Neutral point control in 3-level interleaved battery discharger.

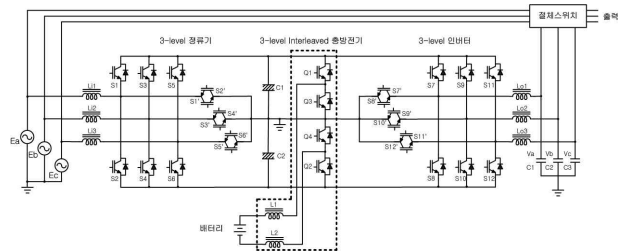


Fig. 7. Circuit diagram of the prototype UPS.



Fig. 8. Photograph of the designed prototype UPS.

림 7은 시제품의 회로도이며, 그림 8은 시제품의 사진이다. 주요 설계 파라미터는 표 5에 나타내었다.

제작된 시제품의 일반모드 시험과 정전시험의 결과들은 표 6과 같다. 정전모드에서 배터리 입력전력 대 출력전력의 효율이 97.42%로서 2-레벨 충전전기를 사용하는 기존제품의 효율인 94%에 비하여 우수함을 확인할 수 있다. 특히 그림 9는 300kVA UPS 시제품에서 정전 시 실험과형으로써, 정전에 따른 과도상태 및 정상상태에서 Vc1과 Vc2가 완전히 겹쳐 있으므로, 두 전압이 동일한

TABLE V
EXPERIMENTAL PARAMETERS OF PROPOSED
SYSTEM

Parameter	Value
Utility Input voltage	3P-4W, 380-220 [V_{ac}]
Utility Input frequency	60 [kHz]
Output voltage	3P-4W, 380-220 [V_{ac}]
Output frequency	60 [kHz]
Output Power	300 [kVA]
Nominal Battery voltage	360 [V_{dc}]
Nominal DC-link voltage	700 [V_{dc}]
L_i	145 [μH]
L_o	90 [μH]
$L_{1,2}$	147 [μH]
C_1, C_2	244,800 [μF]

TABLE VI
PERFORMANCE RESULTS OF PROPOSED UPS
SYSTEM

Performance of UPS	Results
Input power factor	0.998
Input current distortion	4.5 [%]
Output voltage stability	0.99 [%]
Output frequency stability	-0.06 [%]
Output voltage distortion	1.08 [%]
Transfer interruption	1 [ms]
Efficiency in input normal	96.55 [%]
Efficiency in battery discharge	97.42 [%]
Neutral point deviation	0.8 [V_{dc}]

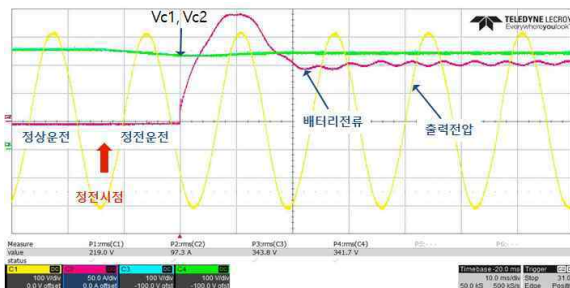


Fig. 9. Experiment waveforms during discharging process.

크기로 균등하게 제어됨을 실험을 통해 확인할 수 있고 편차가 1 [V_{dc}] 이하로 제어됨을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 정전 시 효율향상, 방열체적의 저감, 배터리 리플저감, 전력밀도상승, 배터리수명연장의 효과들을 위한 3-레벨 인터리브드 충방전기를 제안하였다.

제안된 3-레벨 인터리브드 충방전기는 스위치 상태 및 인덕터의 에너지 상태에 따라 12가지 충방전 모드들로 운전된다. 본 논문은 상기 12가지 충방전 모드들을 분석하여 제안하는 충방전기가 16셀부터 40셀까지 표준 상용 배터리 입력을 가지는 무정전전원장치에 적용하여 운전할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 논문에서는 방전 시 직류링크의 두 캐패시터 간에 발생하는 전압 불평형을 용이하게 해결할 수 있는 방법을 방전모드 분석을 통하여 제안하였다. 제안된 방법은 방전 시 독립방전모드와 중복방전모드를 자동으로 전환하면서 간단하고도 효과적으로 중성점 전압제어가 가능하다. 본 논문에서 제안한 중성점 제어방식의 타당성을 시뮬레이션과 실험으로 확인하였고 300kVA 시제품 UPS의 실험을 통하여 정전시 효율이 97%이상임을 검증하였다.

References

- [1] J. H. Jung, J. H. Kim, E. C. Nho., H. G. Kim, and T. W. Chun, "New control method for the current ripple reduction of 3-phase interleaved bidirectional DC-DC converter," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 21, No. 3, pp. 260-266, June 2016.
- [2] X. Ruan, B. Li, Q. Chen, S. C. Tan, and C. K. Tse, "Fundamental considerations of three-level DC-DC converters: Topologies, analyses, and control," *IEEE Trans. Circ. Syst.*, Vol. 55, pp. 3733-3743, 2008.
- [3] P. J. Grbovic, P. Delarue, P. Le Moigne, and P. Bartholomeus, "A bidirectional three-level DC-DC converter for the ultracapacitor applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 57, 2010.
- [4] A. Uhlik, J. Dyer, R. Fatunmbi, and O. Ojo, "Modeling and analysis of a DC-DC bidirectional converter for vehicular applications," *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2474-2479, 2016.
- [5] H. Shi, K. Wang, X. Xiao, and K. Sun "Capacitor voltage balancing of a three-level bi-directional buck-boost converter for battery energy storage system," *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China*, Oct. 22-25, 2014.
- [6] Y. Du, X. Zhou, S. Bai, S. Lukic, and A. Huang, "Review of nonisolated bi-directional DC-DC converters for plug-in hybrid electric vehicle charge station application at municipal parking decks," *25th Annual IEEE APEC*, 2010.



구태근(具泰根)

1970년 1월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년~2003년 한국전기연구원 전력전자그룹 연구생. 2013년~현재 성신전기공업(주) 연구소장.

기공업(주) 연구소장.



이인환(李寅煥)

1963년 10월 19일생. 1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년~2000년 이화전기공업 기술부. 2013년~현재 성신전기공업(주) 기술이사.



조영훈(曹永勳)

1980년 2월 4일생. 2002년 건국대 전기공학과 졸업. 2004년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2012년 버지니아공대 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2004년~2009년 현대모비스 기술연구소 주임연구원. 2012년~

2013년 에너지트로닉스 책임연구원. 2013년~현재 건국대 전기공학과 부교수. 당 학회 편집위원/JPE편집위원.