

독립형 DC마이크로그리드 내 BESS용 4 LEG DC/DC 컨버터의 고장허용 및 고효율 제어에 관한 연구

A Study on the Fault Tolerance and High Efficiency Control of 4 Leg DC/DC Converter for Battery Energy Storage System in Standalone DC Micro-grid

최 정 식* · 오 승 열* · 차 대 석* · 정 동 화**
(Jung-Sik Choi · Seung-Yeol Oh · Dae-Seak Cha · Dong-Hwa Chung)

Abstract - This paper proposes a fault tolerant and high efficiency operation algorithm for a 4 LEG DC/DC converter for a battery energy storage system(BESS) forming a main power source in a standalone DC micro grid. The BESS for the main power supply in the stand-alone DC micro-grid is required to operate at high speed according to fault tolerant control and load by operating at all times. Fault-tolerance control changes the short-circuit fault to an open-circuit fault by using a fuse in case of leg fault in 4 legs, and operates stably through phase shift control. In addition, considering the loss of the power semiconductor, the number of LEG operation is adjusted to operate at high efficiency in the full load region. In this paper, fault tolerant control and high efficiency operation algorithm of DC/DC converter for BESS in standalone DC micro grid is presented and it is proved through simulation and experiment.

Key Words : DC microgrid, BESS, Bidirectional DC/DC Converter, Fault tolerance, High efficiency

1. 서 론

신재생에너지원과 BESS(Battery Energy Storage System)를 결합하여 부하에 전력을 공급하는 분산형 마이크로그리드는 상용 전력망이 연결되어 있는지에 따라 연계형과 독립형으로 운전된다. 이러한 마이크로그리드는 지능형 배전망 구축 및 주변 환경의 요구에 따라 보급이 점차 확대되고 있다[1-4]. 최근 독립 전원을 이용하는 선박 내에서도 대기오염 물질과 이산화탄소 배출을 규제하게 됨에 따라 마이크로 그리드에 대한 관심이 고조되고 있으며 특히 에너지 효율이 높은 독립형 DC 마이크로그리드 시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다. 독립형 DC 마이크로그리드에서 DC Grid전압을 제어하는 방법에는 각 분산전원과 배터리 에너지 저장장치 그리고 부하의 전력을 검출하여 고속통신망을 통해 중앙제어기로 전송하여 생산, 저장, 소비 전력의 평형을 유지하도록 제어하는 방식이 있다[5]. 그러나 통신망에 장애가 생길 경우 시스템의 오동작에 따른 막대한 경제적 손실이 야기될 수 있다. 또한 통신망 설치 장소의 제한이 있다는 단점을 가진다. 이러한 단점을 해소하기 위해 독립형 DC 마이크로그리드에서

DC Grid전압을 BESS용 DC/DC 컨버터가 담당하고 잉여전력 및 부족전력에 대해 자율적으로 충/방전을 한다.

DC 마이크로그리드 내 DC 계통을 형성하는 BESS용 양방향 DC/DC 컨버터는 절연형과 비 절연형으로 나눌 수 있다. 절연형 컨버터는 변압기 턴수비로 고승압에 장점이 있으나 고주파 변압기에 의한 손실이 발생하는 단점이 있으며 비절연형 컨버터는 제어 용이하고 구성이 간단한 장점이 있어 일반적으로 많이 사용된다[6]. 이러한 비절연형 DC/DC 컨버터는 안정성과 고효율 및 저당가에 대한 연구가 진행되고 있다[7].

또한 DC 계통의 주 전원을 담당함으로써 상시 운전이 가능하고 고장 시 fault tolerance 제어 기술 확보가 중요한 요소로 나타나고 있다[8]. Fault tolerance 제어는 전력변환기의 전력반도체 소자가 고장이 나도 정상 동작이 가능하도록 허용하는 제어로서 고장 유형에 따라 방법이 달라진다.

따라서 본 논문에서는 DC 마이크로그리드 내의 DC 배전용 BESS 컨버터에 대한 전 부하영역에서 고효율화를 위해 4 LEG 인터리브드 컨버터 토폴로지를 제시하였다. 또한 fault tolerance 제어를 위한 하드웨어 설계를 제안하며 제시한 제어 알고리즘은 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

* Corresponding Author : Energy Convergence center Korea Electronics Technology Institute, Korea
E-mail: cjs1108@keti.re.kr

* Energy Convergence center Korea Electronics Technology Institute, Korea

** Dept. of Electric Control Engineering, Suncheon National University, Korea

Received : July 17, 2018; Accepted : July 30, 2018

2. 시스템 구성

2.1 4 Leg 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지

그림 1은 BESS의 충/방전용 4상한 양방향 DC/DC 컨버터의

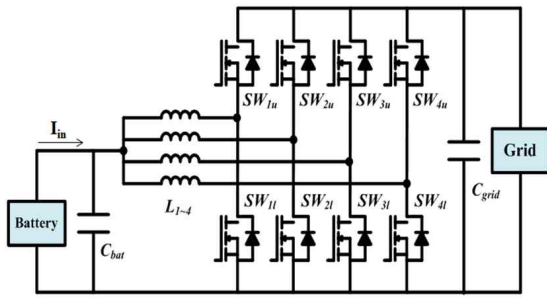


그림 1 4 LEG 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지
 Fig. 1 Bidirectional DC/DC converter topology with 4 LEG

토폴로지를 나타내고 있다[9].

하프 브릿지를 이용한 양방향 컨버터구조로서 상단 스위치를 오프하고 하단 스위치를 스위칭하면 상단스위치는 다이오드로 동작하고 부스트 컨버터와 동일한 형태가 되어 승압이 가능하고, 하단부 스위치를 오프하고 상단 스위치를 스위칭하면 강압이 가능한 형태이다. 이러한 양방향 컨버터를 4병렬로 구성한 형태로서 이렇게 구성하면 각각의 압에 흐르는 전류가 분배되어 소자의 크기를 줄일 수 있고 입력 전류 리플은 각 상에 흐르는 전류가 위상차에 의해 서로 상쇄되어 입력전류 리플이 감소하는 효과가 있다.

또한 수동소자의 전력밀도 최적화를 위해 위상차 180도를 갖는 LEG(1과 2, 3과 4)는 결합 인덕터로 구성할 수 있다. 그림 1과 같이 스위치 도통기간 동안 결합 인덕터 코일에 흐르는 전류는 서로 다른 dot로 흐르는 감극성일 때 각 코일에 걸리는 전압은 식 (1)~(4)과 같이 나타낼 수 있으며 이때 L_m 상호인덕턴스를 나타낸다.

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_1}{dt} - L_m \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$V_{L2} = L_2 \frac{di_2}{dt} - L_m \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

$$V_{L3} = L_3 \frac{di_3}{dt} - L_m \frac{di_4}{dt} \quad (3)$$

$$V_{L4} = L_4 \frac{di_4}{dt} - L_m \frac{di_3}{dt} \quad (4)$$

인덕턴스 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$ 이라고 가정하면, $L_m = kL$ 이 되고, 식 (1)~(4)을 이용하여 입력전류 리플 값으로 식을 정리하면, 다음 식 (5)~(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta i_1 = \frac{1-d_1}{L(1-k^2)} V_1 d_1 t \quad (5)$$

$$\Delta i_2 = \frac{1-d_2}{L(1-k^2)} V_2 d_2 t \quad (6)$$

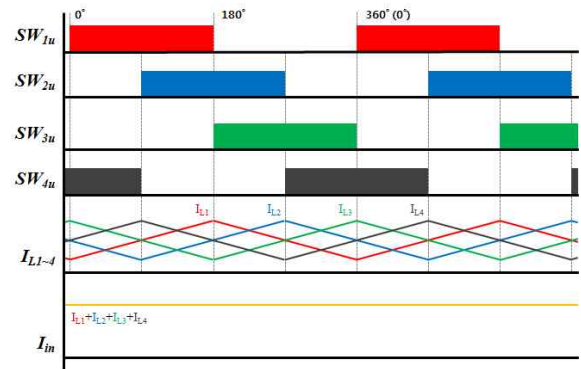


그림 2 충전모드의 스위칭 패턴도
 Fig. 2 Switching pattern diagram of charging mode

$$\Delta i_3 = \frac{1-d_3}{L(1-k^2)} V_3 d_3 t \quad (7)$$

$$\Delta i_4 = \frac{1-d_4}{L(1-k^2)} V_4 d_4 t \quad (8)$$

위 수식을 이용하여 리플전류가 가장 낮은 최적의 결합계수 값을 구할 수 있으며 본 논문에서는 인덕터의 가격 및 상용화 측면에서 결합계수가 0인 인덕터를 사용하였다.

그림 2는 충전모드(buck)에서의 4상한 컨버터의 스위칭 패턴도를 나타내고 있다. 상단스위치가 동작하고 각 상은 서로 90°의 위상각을 가지고 제어된다. 4상한 구성의 경우 듀티비 0.25, 0.5, 0.75에서 입력전류 리플이 거의 발생하지 않고 다른 구간에서도 전류 리플이 낮게 발생한다. 방전모드에서도 마찬가지로 제어되며 상단스위치를 오프하고 하단스위치를 스위칭 하게 된다.

2.2 Fault tolerance 제어를 위한 하드웨어 설계

전력변환 장치에 고장이 발생할 경우 순환전류뿐만 아니라 다른 소자나 전체 시스템에 악영향을 줄 수 있고 유지보수 비용과 시간 절약을 위해 시스템에 적합한 고장진단(fault diagnosis)과 고장 허용제어(fault tolerant) 기법들이 필요하다. 시스템 구성 부품 중 스위치 소자는 가장 취약하고 산업현장에서 고장빈도가 높다. 스위치 소자 고장에는 개방회로 고장(open-circuit fault)과 단락회로 고장(short-circuit fault)이 있다. 단락회로 고장의 경우 즉시 전체 시스템의 운전을 정지(shut down)시켜야하기 때문에 빠른 응답특성(dynamic response)이 요구된다.

이에 따라 전력변환 장치의 제어회로는 과전류를 방지하기 위한 별도의 하드웨어를 활용하여 빠른 진단 특성을 갖도록 설계하는 것이 일반적이다. 반면에 개방회로 고장의 경우 단락회로 고장에 비해 빠른 진단 특성이 요구되지 않고 전체 시스템 동작을 중지시킬 필요는 없으며 제어 알고리즘에서 해결이 가능하다.

제시한 4 leg DC/DC 컨버터 토폴로지는 기본적으로 4개의 하프브릿지를 병렬로 연결한 구조로서 스위치의 단락 고장 시 순환

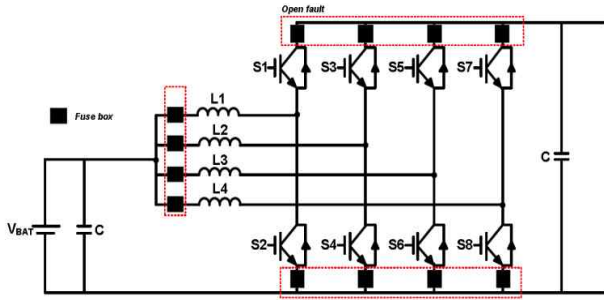


그림 3 개방 고장형 4 LEG 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지
 Fig. 3 Bidirectional DC/DC converter topology of 4 LEG with open circuit fault

동작 조건	L1	L2	L3	L4	Operation Run	비고
정상동작	1	1	1	1	4	정상 동작
	0	0	0	0	0	
	0	1	1	1	3	
위상 120degree	1	0	1	1	3	폴트 및 3Leg 동작
	1	1	0	1	3	
	1	1	1	0	3	
위상 180degree	0	0	1	1	2	폴트 및 2Leg 동작
	0	1	0	1	2	
	0	1	1	0	2	
위상 0degree	1	0	0	0	1	정지
	0	1	0	0	1	
	0	0	1	0	1	

그림 5 레그 고장에 따른 위상 제어 패턴
 Fig. 5 Phase control pattern with leg fault



그림 4 제시한 4LEG DC/DC 컨버터의 3D 모델링
 Fig. 4 3D modeling of proposed 4 leg DC/DC converter system

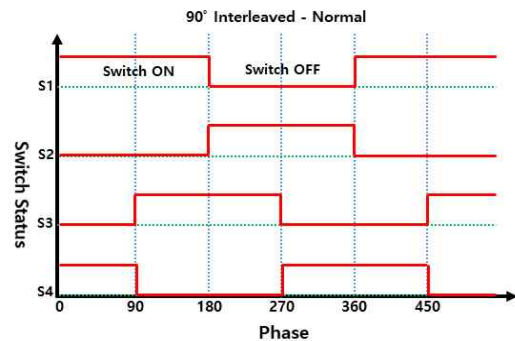
전류에 의해 다른 leg의 스위칭소자의 소손까지 야기할 수 있다. 따라서 이러한 단락 고장을 전류용 퓨즈를 활용하여 각 leg를 전기적으로 분리하는 개방고장 형태로 바꾸어야 한다. 이를 위해 그림 1의 컨버터 토폴로지는 다음 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 4는 위의 개방 고장형태를 갖는 양방향 DC/DC 컨버터의 3D 설계 도면을 나타내고 있다. 각 leg는 전류용 퓨즈 및 퓨즈박스를 통해 분리된 구조이며 IGBT, 게이트드라이버, 리액터, 전류 센서 등을 1개의 pack으로 구성하여 fault tolerance 제어와 동시에 운전 중 교체가 가능하다.

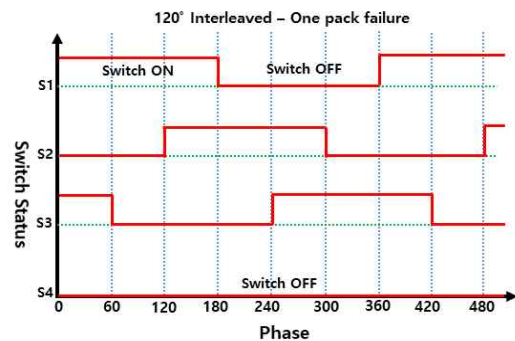
3. 제시한 알고리즘

3.1 Fault tolerance control

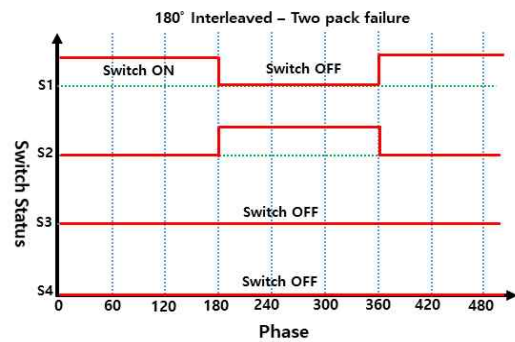
4 Leg 컨버터의 제어는 Leg 고장이 없을 시 위상지연 각은 각 상의 위상을 90도 위상차를 가지고 제어한다. Leg 고장에 따른 컨버터 fault tolerance 제어는 정상 상태 Leg 수에 따라 1 Leg



(a) switching pattern with normal state



(b) switching pattern with 1 leg fault



(c) switching pattern with 2 leg fault

그림 6 Leg 고장 상태에 따른 스위칭 패턴도
 Fig. 6 Switching pattern with leg fault status

고장 시 120도, 2개 고장 시 180도의 위상지연 각을 제어한다.
 또한 Leg 고장 시 위상제어는 식 (9)으로 나타낼 수 있으며, Leg 고장에 따른 스위칭 패턴은 그림 6으로 나타낸다.

$$command\ phase\ shift = \frac{n - number\ of\ fault\ LEG}{360} \quad (9)$$

(n : number of phases)

그림 7은 4 leg 양방향 DC/DC 컨버터의 fault tolerance 제어 시퀀스를 나타낸다. 컨버터의 제어보드의 ADC를 통해 컨버터 입/출력 전압과 전류 및 각 상의 전류를 계측한다. 단일 컨버터의 핫스왑 제어는 상 전류를 기준으로 제어를 수행하며 계측한 값이 fault 레벨이 아니면 정상동작으로 4 leg가 동작하고 이 때 전류 지령치에 대한 부하분배는 1/4가 된다.

각 상의 전류 계측 시 fault 레벨에 도달하여 leg fault가 나타날 경우 고장난 leg의 수에 따라 위상 제어 각에 대한 지령치가 변화되고 각 상의 전류 분배 지령치도 변화가 된다. 이러한 루틴은 전압제어와 전류제어를 통한 충전과 방전 제어 시퀀스와 동일하게 적용되며 복귀 시에는 역으로 4 leg가 동작하도록 위상 시프트 및 각 상의 전류 지령치를 변화시켜 정상적으로 운전되고 한다.

3.2 High efficiency control on all load range

DC/DC 컨버터의 효율은 전력변환을 위한 스위치 손실에 따라

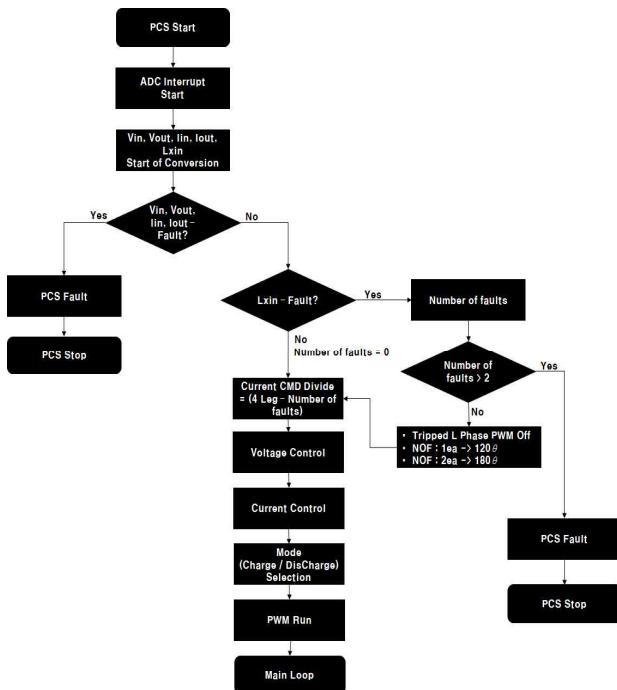


그림 7 4 Leg DC/DC 컨버터의 고장허용 제어 시퀀스
Fig. 7 Fault tolerance control sequence of 4 leg DC/DC Converter

변화된다. 스위치 동작에 따른 스위치 손실에는 스위칭 손실과 전도 손실이 존재한다. 이때 IGBT 스위칭 손실($P_{sl,IGBT}$)과 IGBT 전도 손실($P_{d,IGBT}$)은 다음 식을 통해 계산된다[10][11].

$$P_{sl,IGBT} = f_{sw} \times (E_{on} + E_{off}) \quad (10)$$

$$P_{d,IGBT} = V_{ce} \times I_{ce} \times IGBT_{duty} \quad (11)$$

여기서 f_{sw} 는 스위칭 주파수, E_{on} 과 E_{off} 는 IGBT의 턴-온/오프 상태에서의 에너지 손실, V_{ce} 는 IGBT의 collector-emitter 전압, I_{ce} 는 IGBT의 collector 전류, $IGBT_{duty}$ 는 IGBT의 듀티 사이클을 나타낸다.

제시한 4 leg DC/DC 컨버터의 leg 위상 제어를 통한 fault tolerance 제어는 시스템의 리턴던시 뿐만 아니라 전 부하영역에서 고효율 운전이 가능하도록 할 수 있다. 전류분배를 통한 도통 손실과 스위치 동작 여부에 따른 스위칭 손실을 부하영역에 따라 조합하여 구동하면 전 부하 영역에서 높은 효율을 유지할 수 있다. 다음 그림은 부하 변화 및 leg 스위치 동작에 따른 컨버터의 스위치 손실을 나타낸다.

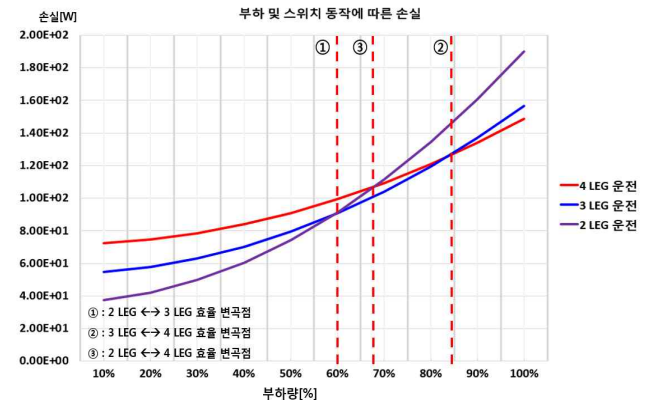


그림 8 부하 및 스위치 동작에 따른 스위치 손실
Fig. 8 Switch loss with load and switch operation

이론적 손실 부분은 스위칭손실과 도통손실만을 고려하였으며 IGBT 데이터시트를 참고하였다. 이를 통하여 4 leg 컨버터의 운용을 낮은 부하영역에서는 2 leg로 높은 부하영역에서는 4 leg로 운용하여 전 부하영역에서 높은 효율로 유지할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 9는 본 논문에서 제시한 4 LEG 인터리브드 양방향 DC-DC컨버터의 PSIM 회로도를 나타낸다. 배터리의 전압은 200V이고 저압 직류배전망의 계통전압은 380V로 설정 하였으며 표 1은 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타낸다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameter

파라미터	값	파라미터	값
$V_{battery}$	200[V]	$V_{distribution}$	380[V]
이득값	1.9	f_s	10[kHz]
L	2000[uH]	k	0
C_{in}	1700[uF]	C_{out}	1700[uF]

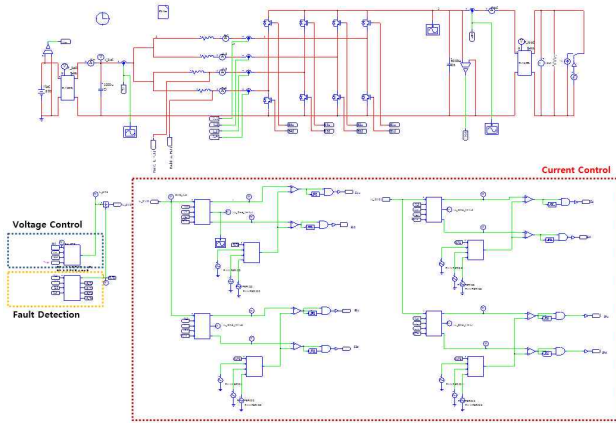
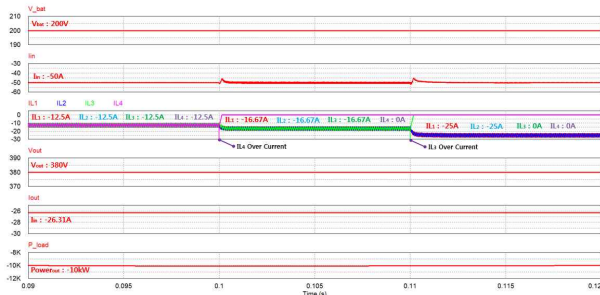
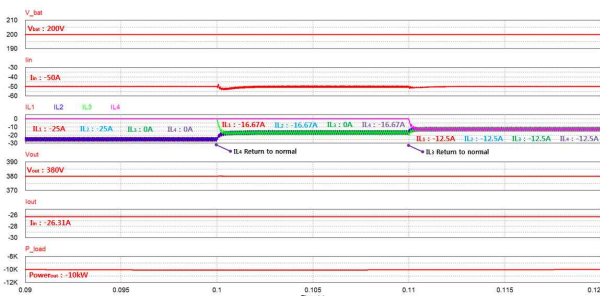


그림 9 4 LEG DC/DC 컨버터의 PSIM 회로도

Fig. 9 PSIM circuit of 4 LEG DC/DC Converter



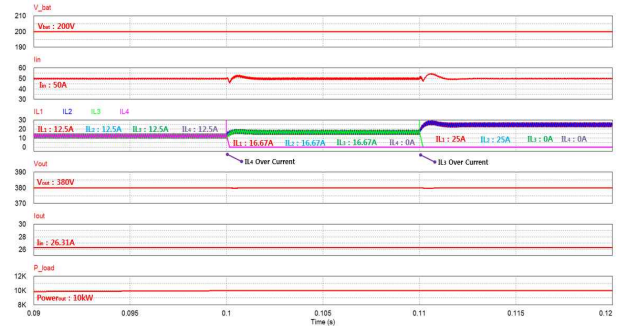
(a) Simulation result of leg fault in charge mode



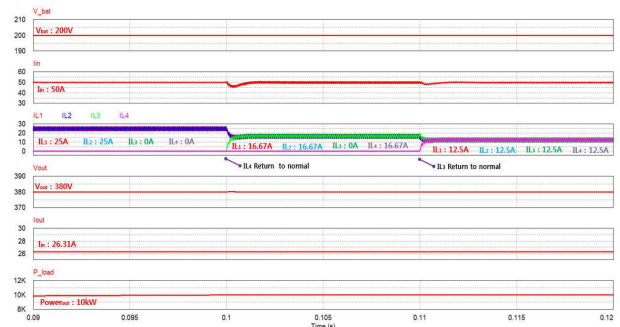
(b) Simulation result of leg fault return in charge mode

그림 10 충전 시 고장 허용 제어 시뮬레이션 결과

Fig. 10 Simulation result of fault tolerance control in charge mode



(a) Simulation result of leg fault in discharge mode



(b) Simulation result of leg fault return in discharge mode

그림 11 방전 시 고장 허용 제어 시뮬레이션 결과

Fig. 11 Simulation result of fault tolerance control in discharge mode

그림 10은 충전 시 4 leg DC/DC 컨버터의 leg 고장허용제어에 대한 파형을 나타낸다. 10(a)는 충전 시 leg 고장에 대한 시뮬레이션 결과로서 0.1초에 L3에 해당하는 leg 고장과 0.11초에 L4에 해당하는 leg 고장을 모의하였다. Leg 고장 시 정상인 Leg에 양호하게 전류가 분배되었으며 출력 전압 및 전류가 정상동작 됨을 확인하였다. 10(b)는 충전 시 leg 고장 복구에 대한 시뮬레이션 결과로서 0.1초에 L3에 해당하는 leg 고장 복구와 0.11초에 L4에 해당하는 leg 고장 복구를 모의하였다. Leg 고장 복구 시에도 전류 분배 및 컨버터의 출력이 양호하게 동작됨을 확인하였다.

그림 11은 방전 시 4 leg DC/DC 컨버터의 leg 고장 허용제어에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 방전 시에도 충전 시와 같이 leg 고장 및 고장 복구에 대한 응답파형이 양호하게 나타나고 있음을 확인하였다.

5. 실험 및 결과

그림 12는 제안한 4 leg 양방향 DC/DC 컨버터 성능시험을 위한 구성을 나타낸 것이다. 시험용 컨버터에 대한 양방향 충방전 실험을 위해 배터리모의 장치와 부하기 및 계측기를 사용하

였으며 DC 배전망 계통전압 380Vdc, 배터리전압 200Vdc를 설정하였다. 실험을 위한 파라미터는 시뮬레이션과 동일하게 설정하였다.

표 2는 제시한 알고리즘 검증을 위한 실험 파라미터를 나타낸 것이다.

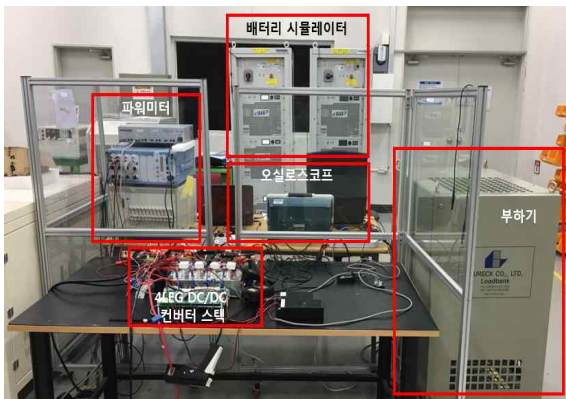


그림 12 제시한 4 leg DC/DC 컨버터의 시험 구성도

Fig. 12 Experiment configuration of proposed 4 leg DC/DC converter

표 2 실험 파라미터

Table 2 Experimental parameter

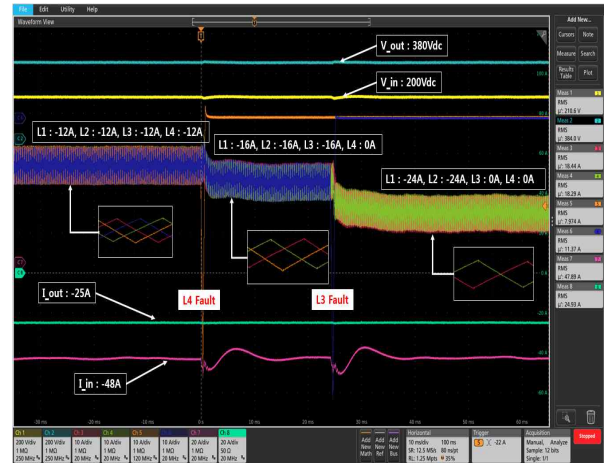
파라미터	값	파라미터	값
$V_{battery}$	200[V]	$V_{distribution}$	380[V]
이득값	1.9	f_s	10[kHz]
L	1500[uH]	k	0
C_{in}	1000[uF]	C_{out}	1000[uF]

5.1 Fault tolerance control result

그림 13은 충전 시 leg 고장에 따른 고장허용 제어에 대한 응답파형을 나타낸 것이다. 그림 13(a)는 L3와 L4에 임의로 과전류를 인가하여 fault를 낸 상황에서의 응답파형으로서 leg 고장 시 정상 동작하는 leg(1,2)에 전류가 적절히 분배됨을 확인 하였다. 또한 leg 고장 시에도 컨버터의 출력 전압 및 출력 전류는 양호한 응답성을 나타낸다. 그림 13(b)는 leg 고장 복구에 대한 응답파형으로 고장 복구 후 각 leg는 90° 위상차를 갖으며 안정적으로 운전됨을 확인하였다.

그림 14는 방전 시 leg 고장에 따른 고장허용 제어에 대한 응답파형을 나타낸 것이다.

그림 14(a)는 L3와 L4에 임의로 과전류를 인가하여 fault를 낸 상황에서의 응답파형으로서 1개의 leg 고장 시 120°, 2개의 leg 고장 시 180° 위상 지연 제어를 통해 정상 동작하는 leg(1,2)에 전류가 적절히 분배됨을 확인 하였다. 충전 시와 마찬가지로 leg 고장 시에도 컨버터의 출력 전압 및 출력 전류는 양호한 응



(a) Response wave form of leg fault in charge mode



(b) Response wave form of fault return in charge mode

그림 13 충전 시 고장 허용 제어 응답파형

Fig. 13 Response wave form of fault tolerance control in charge mode

답성을 나타낸다. 그림 14(b)는 leg 고장 복구에 대한 응답파형으로 고장 복구 후 Leg 위상차는 180°에서 90°로 변환되어 안정적으로 운전됨을 확인하였다.

5.2 High efficiency control result with load variation

전 부하영역에서 고효율 제어를 위해 앞장에서 구한 이론값의 손실을 이용하여 해당 부하영역에서 leg 운전 개수를 조정하여 수행하였다. 이를 위해 먼저 2leg 운전 시 DC/DC 컨버터의 부하에 따른 효율 데이터와 4 leg 운전 시 효율 데이터를 취득하였다.

그림 15는 2leg 운전 시 1kW(10%부하) 효율 데이터와 10kW(100%) 효율 데이터를 나타낸 것이다. 2 leg 운전 시 저 부하영역에서 95.1%, 고 부하영역에서 97%를 나타내고 있다. 그림 16은 4 leg 운전 시 1kW(10%부하) 효율 데이터와 10kW



(a) Response wave form of leg fault in discharge mode



(b) Response wave form of fault return in discharge mode

그림 14 방전 시 고장 허용 제어 응답파형

Fig. 14 Response wave form of fault tolerance control in discharge mode



(a) Efficiency data with 10% load



(b) Efficiency data with 100% load

그림 15 2 leg 운전 시 컨버터 효율 데이터

Fig. 15 Converter efficiency data in 2 leg operation



(a) Efficiency data with 10% load



(b) Efficiency data with 100% load

그림 16 4 leg 운전 시 컨버터 효율 데이터

Fig. 16 Converter efficiency data in 4 leg operation

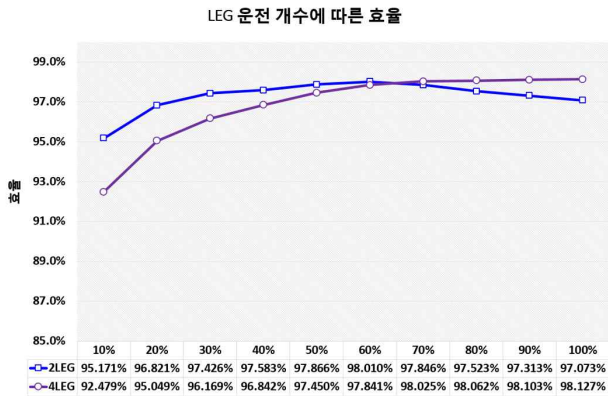


그림 17 Leg 운전 개수에 따른 효율 데이터 분석
Fig. 17 Efficiency data analysis with number of leg operation

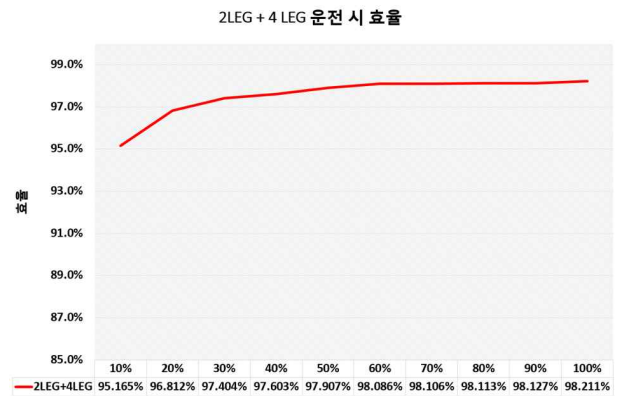
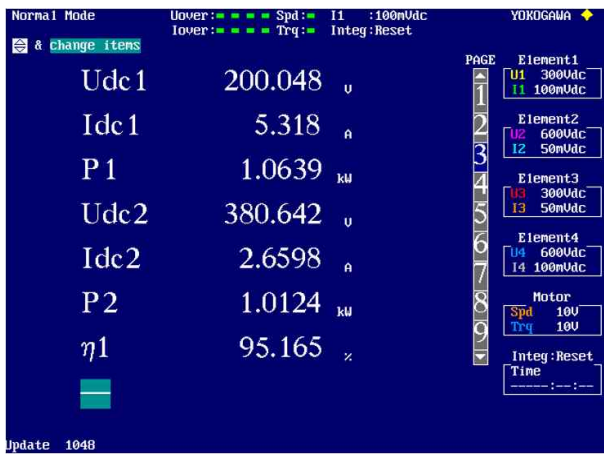
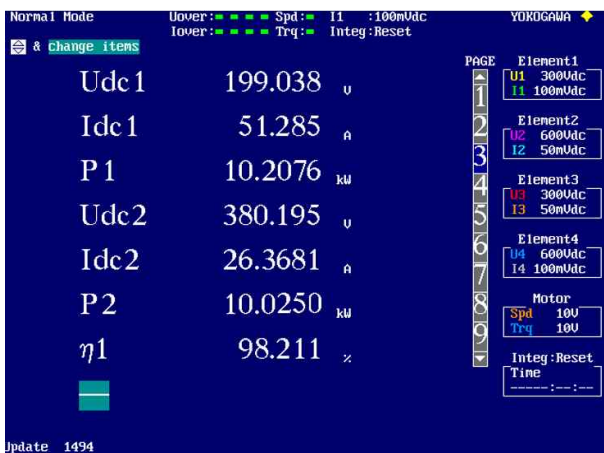


그림 19 제시한 방법에 의한 컨버터 효율 데이터 분석
Fig. 19 Efficiency data analysis with proposed method



(a) Efficiency data with 10% load



(b) Efficiency data with 100% load

그림 18 제시한 방법에 의한 컨버터 효율 데이터
Fig. 18 Converter efficiency data with proposed method

(100%) 효율 데이터를 나타낸 것이다. 4 leg 운전 시 저 부하영역에서 92.4%, 고 부하영역에서 98.1%를 나타내고 있다.

그림 17은 2 leg 운전 시와 4 leg 운전 시 부하변화에 따른 효율 데이터를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 스위칭 손실에 대한 이론값과 거의 일치하게 나타나고 있으며 약 60% 이상 부하에서 leg 운전 개수에 따른 효율의 변곡점이 나타난 것을 확인할 수 있었다.

이러한 데이터를 통하여 출력 기준, 즉 출력 전압과 출력 전류 데이터를 기반으로 초기 저 부하(0~60%)에서는 leg을 2개로 운전하고 60%(6kW) 부하 초과할 때는 leg을 4개로 운용하였다.

그림 18은 부하 영역에 따라 leg 운전 개수를 조절하여 컨버터를 운용할 경우의 효율 데이터를 나타낸 것이며 그림 19는 전 부하영역에서의 효율을 분석한 데이터를 나타낸 것이다. 저 부하영역에서 95% 이상 효율을 나타내고 있으며 고 부하영역에서도 98% 이상의 높은 효율을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 저압 직류배전망으로 구성된 독립형 DC 마이크로그리드 내의 BESS용 4 leg DC/DC 컨버터의 고장허용 및 고효율 운전 제어 알고리즘을 제시하였다. 그리드 내 임여전력과 부족전력에 대해 자율적으로 충/방전하기 위해 BESS용 DC/DC 컨버터가 주 전원을 형성하게 된다. 독립형 DC 마이크로 그리드 내의 주 전원용 BESS는 상시 운전을 함으로서 고장허용 제어 및 부하에 따른 고효율 운전이 요구된다. 고장허용 제어는 하드웨어적으로 전력용 퓨즈를 사용하여 단락고장을 개방고장으로 변경할 수 있다. 또한 소프트웨어적으로는 위상 변이 제어를 통해 4 leg 일 경우 90°, 2 leg일 경우 180°로 제어함으로써 leg 고장 시에 안정적으로 운전함을 확인하였다.

고효율 운전 제어에서는 전력반도체의 스위칭 손실과 전도손실을 고려하여 저 부하영역에서는 leg 운용 개수를 낮추고 고 부하영역에서는 leg 운용 개수를 늘려 전 부하영역에서 높은 효율이 유지됨을 확인하였다.

이로서 본 논문에서 제시한 독립형 마이크로그리드 내 BESS 용 4 leg 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지의 고장허용 제어 및 전 부하영역에서의 고효율 운전 알고리즘에 대한 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 산업기술혁신사업(20141010502280)의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

References

- [1] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- [2] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids", in *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, No. 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007.
- [3] F. Nejabatkhah and Y. W. Li, "Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 12, pp. 7072-7089, Dec. 2015.
- [4] D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control", in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1905-1919, July 2014.
- [5] B. Wang, M. Sechilariu and F. Locment, "Intelligent DC Microgrid With Smart Grid Communications: Control Strategy Consideration and Design", in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 2148-2156, Dec. 2012.
- [6] T. Zhou and B. Francois, "Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 1, pp. 95-104, 2011.
- [7] M. Ahmadi, K. Shenai. "New, Efficient, Low-Stress Buck/Boost Bidirectional DC-DC Converter", in *Proc. IEEE Energy Tech*, pp. 1-6, 2012.
- [8] L. Maharjan, T. Yamagishi, H. Akagi, and J. Asakura, "Fault-Tolerant Operation of a Battery-Energy-Storage System Based on a Multilevel Cascade PWM Converter With Star Configuration", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 9, pp. 2386-2396, Sep. 2010.
- [9] D.S. Cha, J.S. Choi, S.Y. Oh, Y.C. Lim "A Study on the Development of DC/DC Converter for Battery Charging and Discharging in DC microgrid applied to a Ship", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 31(7), pp. 108-116. Jul. 2017.
- [10] June-Seok Lee and Kyo-Beum Lee, "Tolerance controls for open-switch fault in a grid-connected T-type rectifier at low modulation index", *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1846-1851, Mar. 2014.
- [11] Dae Joong Kim, Jin-Hyuk Park and Kyo-Beum Lee, "Power Loss Analysis of EV Fast Charger with Wide Charging Voltage Range for High Efficiency Operation", *The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)*, Vol. 63, No. 8, pp. 1055-1063, Aug. 2014.

저 자 소 개



최 정 식 (Jung-Sik Choi)

He received the B.S. degree in electrical control engineering from Sunchon University, Jeollanam-do, Korea, in 2005, and the M.S. degrees from same graduate school electrical engineering departure in February, 2007, and Ph.D degrees from same graduate school in February, 2011. He has been working for Korea Electrical Technology Institute since 2011 and is currently senior Researcher.



오 승 열 (Seung-Yeol Oh)

He received the M.S. degrees from Junnam University graduate school electrical engineering departure in February, 2004, And Ph.D degrees from same graduate school in February, 2013. He worked as a PM at Neo And B from 2005 to 2006. He has been working for Korea Electrical Technology Institute since 2007 and is currently Senior Researcher.



차 대 석 (Dae-Seok Cha)

He received the B.S. degree in electrical engineering from Honam University, Gwang-ju, Korea, in 2009, and the M.S. degrees from Junnam University graduate school electrical engineering departure in February, 2011, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the Department of Electrical Engineering. He has been working for Korea Electrical Technology Institute since 2011 and is currently Associate Researcher.



정 동 화 (Dong-Hea Chung)

He received the B.S. degree in electrical engineering from Yeungnam University, Gyeongsangbuk-do, Korea, in 1979, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1987, Ph.D degrees from same graduate school in 1987. He worked as a researcher at Hyundai Heavy Industries Technical Research Institute from 1987 to 1988. Currently, he is a professor at Suncheon University.