

데이터센터용 DC Distributed Power Supply의 성능평가 모델링에 관한 연구

박찬욱, 이예빈, 신건, 이민행, 노대석
한국기술교육대학교

e-mail : chanwook0929@koreatech.ac.kr

A Study on Performance Evaluation Modeling for DC Distributed Power Supply in Data Center

Chan-Wook Park, Ye-bin Lee, Jian Shen, Min-Haeng-Lee, and Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical, Electronic & Communication Engineering, Koreatech

요약

최근, 전 세계적으로 탄소중립 정책이 시행되면서, 산업계는 에너지 절감 및 수요관리를 강화하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, IT 산업의 발전으로 급격하게 증가하는 데이터센터는 단일 시설 중에서 가장 많은 전력을 소비하고 있어, 대규모로 자체 서버를 운영하는 글로벌 선진 기업들은 수년 전부터 기존의 비효율적인 AC UPS 방식 대신에, 서버 랙 단위로 IT 기기에 DC 전원을 직접 공급하여 효율을 대폭 개선할 수 있는 분산형 DC 전원공급 방식(DC distributed power supply, DC DPS)을 채택하고 있다. 반면, 국내 기업들은 최근에서야 분산형 DC DPS의 도입을 고려하고 있어, 아직 상용화 사례는 물론 성능과 안정성을 검증한 사례가 거의 없기 때문에 이와 관련된 선행 연구가 요구되는 상황이다. 따라서, 본 논문에서는, 분산형 DC DPS의 운용특성을 제시하고, 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 단상 풀-브릿지 인버터 및 벽 컨버터로 구성된 DC DPS의 rectifier부와 양방향 벽-부스트 컨버터 및 리튬이온 배터리로 구성된 BBU부를 모델링한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 220V 입력 전원의 $\pm 10\%$ 급변 조건에서 rectifier는 정상적인 DC 전원을 출력하고, 계통 전압 사고 및 복구 조건에서 rectifier와 BBU간에 정상적인 이종화 전환이 이루어지며, 또한 정격 부하 조건에서 6개로 구성된 rectifier 모듈의 부하분담이 균등하게 배분되어, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인하였다.

1. 서론

최근 정부가 '2050 탄소중립'을 선언하면서, 산업·건설·수송 분야에서는 고효율 기기 및 제품의 보급과 함께 수요 관리 강화를 통한 에너지 효율 개선을 권고하고 있다 [1]. 이에 따라, 수천, 수만 대의 IT 장비가 24시간 365일 중단 없이 운영되는 데이터센터는 단일 시설 중 최대 규모의 전력을 소비하고 있어, 효율 개선에 대한 역할과 책임이 크게 높아졌다. 이러한 이유로 대규모의 자체 서버를 운영하는 글로벌 선진 기업들은 수년 전부터 기존의 비효율적인 중앙집중형 AC UPS 방식 대신에, 서버랙 단위로 IT 기기에 DC 전원을 직접 공급하여 효율을 대폭 개선할 수 있는 분산형 DC 전원공급방식(분산형 DC DPS)으로의 전환을 시도해왔다. 반면, 국내 데이터센터 관련 기업들은 최근에서야 DC DPS의 도입을 고려하고 있으나, 아직 국내에서의 상용화 사례는 물론 성능과 안정성을 검증한 사례가 거의 없기 때문에 이와 관련된 선행 연구가 요구되는 상황이다. 따라서, 본 논문에서는, DC DPS의 운용특성을 분석하고, 전력계통 상용 해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 단상-브릿지 인버터 및 벽 컨버터로 구성된 DC DPS의 rectifier

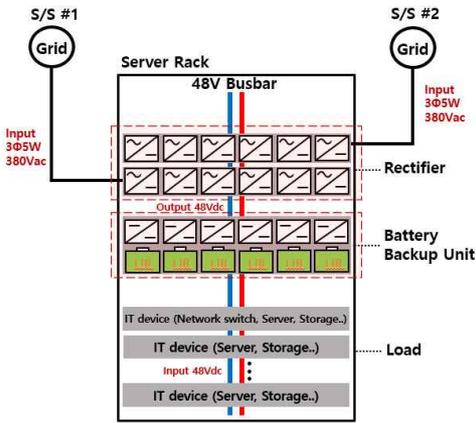
부와 양방향 벽-부스트 컨버터 및 리튬이온 배터리로 구성된 BBU부를 모델링한다. 이를 바탕으로 기존의 AC UPS와 다른 DC DPS의 아키텍처를 고려하여, 제한한 "입력 전원 품질에 따른 rectifier 응답특성, 계통 사고 및 복구 시 rectifier - BBU 전환 동작 특성, rectifier 모듈 간 균등 부하분담 특성" 시험에 대해 시뮬레이션을 수행하고, 이를 통해 제시한 모델링의 유효성을 확인한다.

2. 데이터센터용 분산형 DC DPS의 개념

2.1 분산형 DC DPS의 구성

DC DPS는 그림 1과 같이, 서버 랙 단위로 장착되며, 크게 rectifier부와 배터리백업장치부(battery back-up unit, BBU)로 구성된다. 먼저, rectifier부는 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터로 구성되어 계통의 단상 220V의 AC 전원을 48V DC 전원으로 변환하여 IT 기기에 공급한다. 일반적으로 데이터센터는 무중단 운전상태를 유지하기 위해 전원공급장치를 $2(N+1)$ 수준으로 구성하는데, 여기서 "N"은 시스템에서 필요한 전원공급장치의 수를

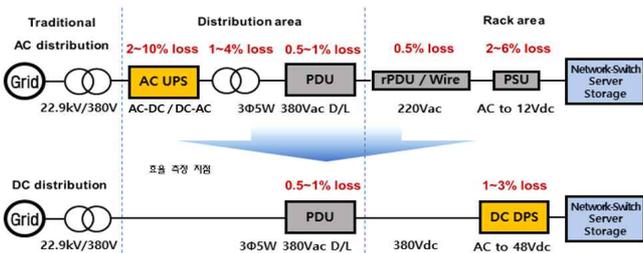
나타내며, "+1"은 하나의 예비 전원공급장치를 추가로 구성하여 시스템의 안정성을 높이는 것을 의미한다. 그리고, "2"는 상기의 N+1 구성의 전원공급장치를 2배로 설치하는 것으로, 이러한 이중화 구성을 통해 서로 다른 변전소로부터 각각 전력을 수전함으로써 하나의 계통에 문제가 발생하여도 IT 기기를 계속해서 운영할 수 있다. 한편, BBU는 DC-DC 컨버터와 리튬이온배터리로 구성된다. 여기서, DC-DC 컨버터는 평상시 off 상태를 유지하다가 rectifier에 장애가 생기면, on 되어 배터리의 전력으로 별도의 비상발전기가 투입될 때까지 해당 랙의 IT 기기에 전원공급을 유지하는 역할을 수행한다.



[그림 1] 데이터센터용 분산형 DC DPS의 구성

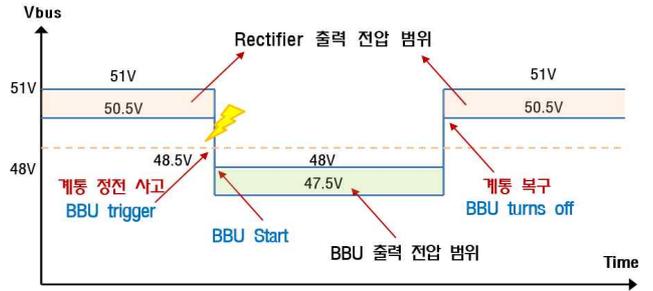
2.2 분산형 DC DPS의 운용특성

기존의 중앙집중형 AC UPS는 그림 2와 같이, AC 전력을 DC로 변환한 다음 다시 AC로 변환하는 과정에서 최소 2%에서 최대 10%의 전력손실이 발생하게 되는데, 이는 365일 24시간 가동하는 데이터센터의 특성에 따라 에너지 측면에서 매우 비효율적이다. 또한, 중앙에서 UPS를 통해 일괄적으로 전력을 전송하는 방식은 고장 발생 시 유지보수 비용은 물론 사고과급력 또한 커질 수 있어 신뢰성을 최우선으로 하는 데이터센터에는 큰 문제점으로 작용할 수 있다. 반면, 분산형 DC DPS는 랙 단위로 이중화된 전원을 공급하기 때문에 일부에 고장이 발생하더라도 사고 과급을 최소화할 수 있고, 기존 AC UPS의 AC-DC 및 DC-AC의 이중 전력변환 과정이 모두 생략되므로, 전력손실이 매우 적다.



[그림 2] 중앙집중형 AC UPS 및 분산형 DC DPS의 운용특성 비교

한편, DC DPS의 동작 메커니즘은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 정상 상태에서는 rectifier만 동작하여 50.5V~51V 범위로 IT 기기에 DC 전원을 공급하고, 계통 정전사고로 rectifier가 불능이 되어, DC bus-bar의 전압이 떨어지게 되면, 48.5V 이하로 계측되는 시점에 BBU가 트리거 되어 계통이 복구되기 전까지 47.5V~48V 범위로 IT 기기에 DC 전원 공급을 유지한다.



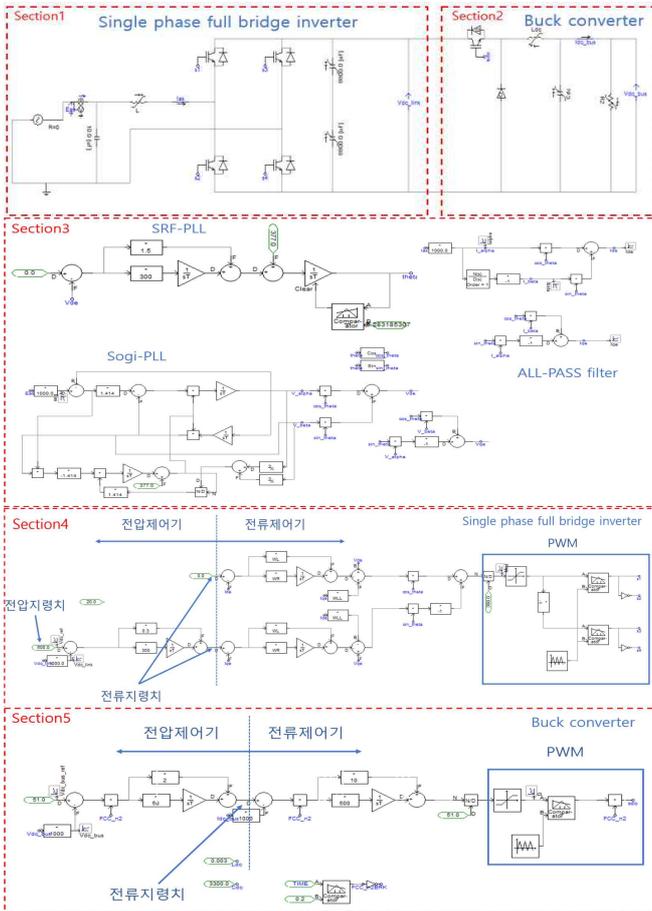
[그림 3] DC DPS의 동작 메커니즘

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 분산형 DC DPS의 성능평가 모델링

3.1 3kW rectifier module부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 DC DPS의 rectifier부 모델링을 수행하면, 그림 4와 같다. 3kW 단위 rectifier 모듈은 section 1과 같이, AC-DC 변환용 단상 풀-브릿지 인버터와 section 2와 같이, DC-DC 변환용 벽 컨버터로 구성된다. 여기서, 풀브릿지 인버터는 단상 교류 전압의 peak 값보다 큰 600V의 DC-link 전압을 생성하고, 벽 컨버터는 600V DC-link 전압을 DC bus-bar 공급전압인 51V로 강하한다. 한편, section 3은 SRF-PLL, sogi-PLL, all-pass filter 제어기를 나타낸다. SRF-PLL 제어기는 계통의 전압 위상과 동기화를 목적으로, DQ 변환의 d를 0으로 제어하여 d축을 무효분, q축을 유효분으로 설정하고, 위상각을 0~2π로 출력한다. 그리고 sogi-PLL과 all-pass filter 제어기는 계통의 전압과 전류의 αβ-DQ 변환을 수행한다.

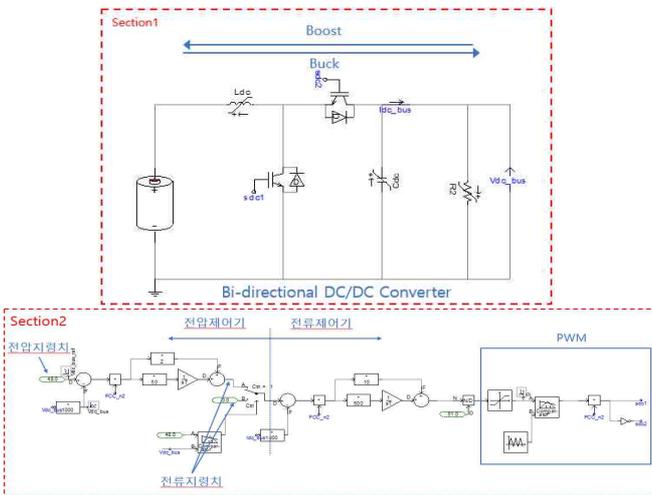
한편, section 4는 단상 풀-브릿지 인버터의 전압제어기, section 5는 벽 컨버터의 전압제어기를 나타낸다. PLL 제어기에서 d축을 무효분, q축 유효분으로 설정하였으므로, PI 제어를 통해 d축을 0으로 제어하고, q축을 Ref.전압으로 제어하여 풀-브릿지 인버터에서는 DC-link 전압 600V를 생성하고, 벽 컨버터에서는 DC bus-bar 전압 51V를 생성한다. 그리고, 벽 컨버터의 스위칭 주파수는 10kHz로 설계하였으며, PWM 스위칭 신호의 듀티비는 삼각파 비교기를 통해 출력된다.



[그림 4] rectifier 모델링

3.2 15kW/5kWh BBU부 모델링

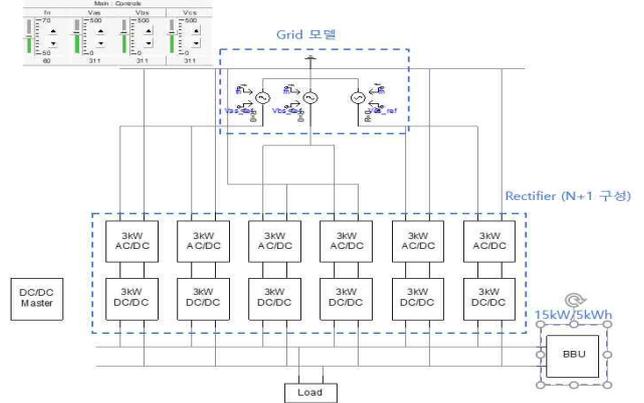
DC DPS의 BBU부 모델링을 수행하면, 그림 5와 같다. BBU는 section 1과 같이, 15kW 양방향 벅-부스트 컨버터와 공칭전압 42V, 용량 5kWh의 리튬이온 배터리 모델로 구성된다. 또한 section 2에서는 벅-부스트 컨버터의 제어기를 나타내며, PWM을 통해 buck으로 동작시 sdc1 on, sdc2 off로 제어하고, 반대로 boost로 동작시 sdc1 off, sdc2 on으로 제어한다.



[그림 5] battery back-up unit 모델링

3.3 전체 시스템 모델링

DC DPS의 전체 시스템은 그림 6과 같다. 먼저, grid 모델은 DC DPS의 성능평가 시뮬레이션 조건에 따라 계통 전압을 가변할 수 있도록 시퀀스로 구현하고, rectifier는 3kW 단위 모듈 6대를 N+1 구조로 설계하여, master 제어를 통해 모듈 간에 부하분담 및 이중화 동작이 되도록 구현한다. 또한 DC bus-bar에는 15kW/5kWh BBU 및 15kW 용량의 가변 부하를 연계한다.



[그림 6] DC DPS 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

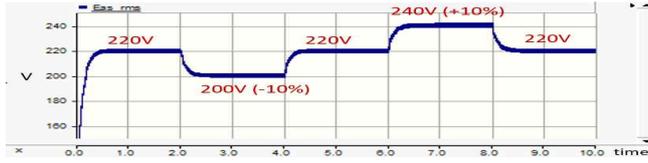
DC DPS의 성능평가 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 먼저, 입력 전원 품질에 따른 rectifier 응답특성 시험은 grid 모델을 이용하여 rectifier의 입력 전압을 허용범위 이내인 $\pm 10\%$ 만큼 가변하였을 때, load에 정제된 DC 전원을 공급하는지 확인한다. 다음, 계통 사고 및 복구시 rectifier - BBU 전환 동작 특성 시험은 계통 정전사고와 복구 상황을 모의하여 rectifier와 BBU 간에 전환 동작이 정상적으로 이뤄지는지 확인한다. 마지막으로 균등 부하분담 특성 시험은 3kW rectifier 6대의 병렬 운전의 유효성을 검증하기 위해 3상 평형상태의 입력 전원 조건에서 master 제어를 통해 개별 rectifier 모듈의 부하분담이 균등하게 이뤄지는지 확인한다.

[표 1] DC DPS의 성능평가 시뮬레이션 조건

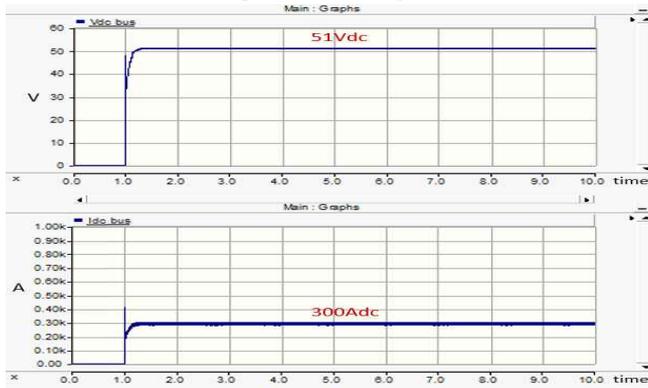
시험 목록	파라미터	시뮬레이션 조건
입력 전원 품질에 따른 rectifier 응답특성	grid	220V (2초) → 200V (2초) → 220V (2초) → 240V (2초) → 220V (2초)
	load	전원공급장치 정격 (15kW)
계통 사고 및 복구시 rectifier - BBU 전환 동작 특성	sensing	DC Bus 출력 전압, 전류
	grid	220V (2초) → 0V (4초) → 220V (4초)
rectifier 균등 부하분담 특성	load	전원공급장치 정격 50% (7.5kW)
	sensing	DC Bus 출력 전압, 전류 BBU 출력 전압 및 전류
rectifier 균등 부하분담 특성	grid	220V 정격
	load	전원공급장치 정격 (15kW)
	sensing	rectifier 단위 출력 전류

4.2 입력 전원 품질에 따른 rectifier 응답특성

입력 전원 품질에 따른 rectifier 응답특성 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)과 같이, 계통 220V 전압을 $\pm 10\%$ 이내로 가변하였을 때, 그림 7(b)에서 rectifier 출력단 전압은 51V DC 전압을 정상적으로 출력하고, load에 정격 300A DC 전류를 정상적으로 공급하는 것을 확인하였다.



(a) grid 모델 전압 profile

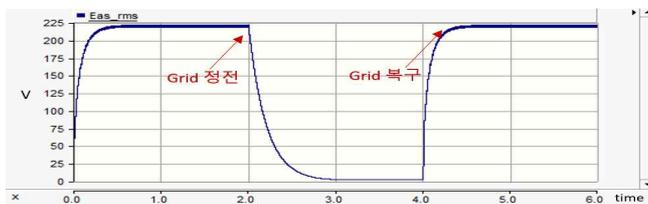


(b) DC bus-bar 전압, 전류 profile

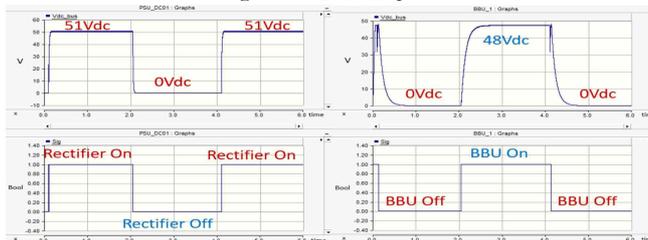
[그림 7] 입력전원 품질에 따른 rectifier 응답특성 시뮬레이션 결과

4.3 계통 사고 및 복구 시 rectifier-BBU 전환 동작 특성

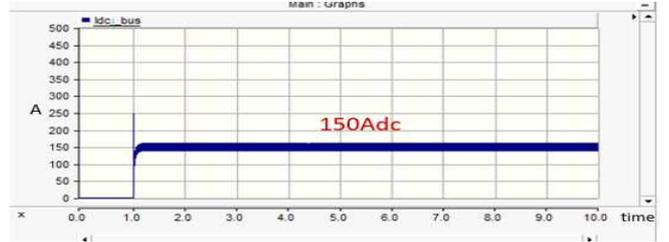
계통 사고 및 복구 시 rectifier-BBU 전환 동작 특성 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)에서는 2초 시점에 계통 정전을 모의하였을 때, 그림 8(b)에서 rectifier는 Off, BBU는 On 되어 DC bus-bar에 48V DC 전압을 정상적으로 출력하고, 그림 8(a)에서는 4초 시점에 계통 정전을 모의하였을 때, 그림 8(b)에서 rectifier는 On, BBU는 Off 되어, DC bus-bar에 51V DC 전압을 정상적으로 출력한다. 이에 따라, 그림 8(C)와 같이, 운전 중단 없이 load에 150A의 DC 전류를 정상적으로 공급하는 것을 확인하였다.



(a) grid 모델 전압 profile



(b) rectifier-BBU 간에 전환 동작 profile

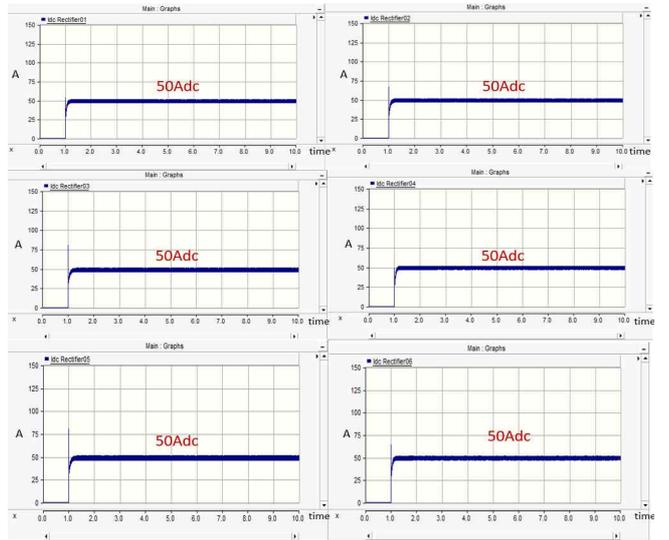


(c) DC bus-bar 전류 profile

[그림 8] rectifier-BBU 전환 동작 특성 시뮬레이션 결과

4.4 rectifier 모듈간 균등 부하분담 특성

rectifier 모듈 간에 균등 부하분담 특성 결과는 그림 9와 같이, 시뮬레이션 조건에 따라 정격 15kW의 수동부하를 연계하였을 때, rectifier 모듈별 출력단 전류는 50A씩 균등하게 분담하는 것을 확인하였다.



[그림 9] rectifier 모듈 간에 균등 부하분담 특성 시뮬레이션 결과

5. 결론

본 논문에서는 최근 국내 데이터센터 기업에서 도입을 추진하고 있는 분산형 DC DPS에 대하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 단상 풀 브릿지 인버터 및 벡 컨버터로 구성된 DC DPS의 rectifier부와 양방향 벡-부스트 컨버터 및 리튬이온 배터리로 구성된 BBU부를 모델링한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 220V 입력 전원의 $\pm 10\%$ 급변 조건에서 rectifier는 정상적인 DC 전원을 출력하고, 계통 전압 사고 및 복구 조건에서 rectifier와 BBU간에 정상적인 이중화 전환이 이루어지며, 또한 정격 부하 조건에서 6개로 구성된 rectifier 모듈의 부하분담이 균등하게 배분되어, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

[1] “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향”, 대한민국 정책브리핑, 2021.10.18