

# 데이터센터용 분산형 DC UPS의 성능 평가에 관한 연구

박찬우, 이민행, 호삼 살라, 이수용, 노대석

한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail : chanwook0929@koreatech.ac.kr

## A Study on Performance Evaluation of Distributed DC UPS for Data Center

Chan-Wook Park, Min-Haeng Lee, Hossam S. Mohamed,

Soo-Yong Lee, and Dae-Seok Rho

\*Dept. of Electrical, Electronic, Korea University of Technology and Education

### 요약

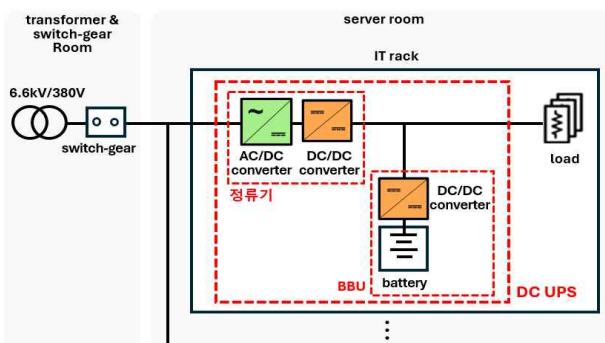
최근 AI 산업의 급속한 발전으로 데이터센터의 연산 부하가 크게 증가하고 변동성도 커지면서, 안정적인 전력 공급이 더욱 중요해지고 있다. 이러한 상황에서 기존 중앙집중형 AC UPS는 확장성과 효율성, 유지보수 측면에서 한계를 나타내고 있어, 분산형 DC UPS가 대안으로 부각되고 있다. 그러나 분산형 DC UPS는 실제 운용 경험과 성능·안정성 검증 사례가 부족하므로, 현장 적용 가능성을 평가하기 위한 체계적 분석과 시험이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 계통 모의장치부와 분산형 DC UPS의 정류기, BBU(battery back-up unit), 모의 부하장치부, 등으로 구성된 분산형 DC UPS 모델링을 수행하며, 이를 바탕으로 평가시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 모델링과 시험장치를 바탕으로 데이터센터용 DC UPS의 출력 특성을 평가한 결과, DC UPS는 부하 변동 조건에서 정상범위 내의 DC 출력 전압을 유지하고, 계통 사고 및 복구 시 정류기-BBU간의 절체시간이 IEC 62040-3에서 제시한 기준과 업계에서 요구하는 10[ms] 이내를 만족함을 알 수 있다. 또한, PSCAD/EMTDC의 모델링과 시험장치에 의한 DC UPS의 운용특성이 거의 유사하여, 본 연구에서 제시한 모델링과 시험장치의 유효성을 알 수 있다.

### 1. 서 론

최근 AI 산업의 급속한 발전으로 데이터 처리량과 연산 부하의 변동성이 높아짐에 따라, 높은 에너지 효율을 유지하면서도 안정적으로 전력을 공급하기 위한 연구가 활발해지고 있다[1]. 이러한 상황에서 기존 중앙집중형 AC UPS는 확장성과 효율성, 유지보수 측면에서 구조적 한계를 나타내고 있다. 이에 대규모 서버를 운영하는 글로벌 기업들은 이미 수년 전부터 서버랙 단위로 DC 전원을 직접 공급하는 분산형 DC UPS로의 전환을 적극 추진해왔다. 그러나 국내에서는 아직 분산형 DC UPS의 운용 경험과 성능·안정성 검증 사례가 부족하므로, 현장 적용 가능성을 평가하기 위한 체계적인 분석과 시험이 요구된다[2]. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 계통 모의장치부와 분산형 DC UPS의 정류기, BBU(battery back-up unit), 모의 부하장치부, 등으로 구성된 데이터센터의 DC UPS 모델링을 수행하고, 이를 기반으로 평가시험장치를 구현한다. 또한, 제시한 모델링과 시험장치를 바탕으로, 부하변동에 따른 DC UPS의 출력 특성과 계통 사고 및 복구 시 정류기-BBU 절체 동작 특성 시험하여, 이를 통해 분산형 DC UPS의 운용특성 및 제시한 모델링과 시험장치의 유효성을 확인한다.

### 2. 데이터센터용 분산형 DC DPS의 구성

분산형 DC UPS는 그림 1과 같이, IT rack 단위에 정류기(AC/DC 및 DC/DC 컨버터)와 BBU(battery back-up unit), 등으로 구성되는데, 이는 기존 AC UPS와 다르게 서버실 내부에서 단일 전력변환 과정(AC→DC)에 의하여 IT 부하에 DC 전력을 직접 공급하는 구조로, 효율 향상 및 부하 변동에 대해 신속한 동적 응답 특성을 확보할 수 있다[3]. 또한, IT rack은 독립적으로 운용할 수 있어 유지 보수 시 특정 랙만 분리 가능하며, 모듈 단위의 용량 증설을 통해 유연한 확장성을 가지고 있다.

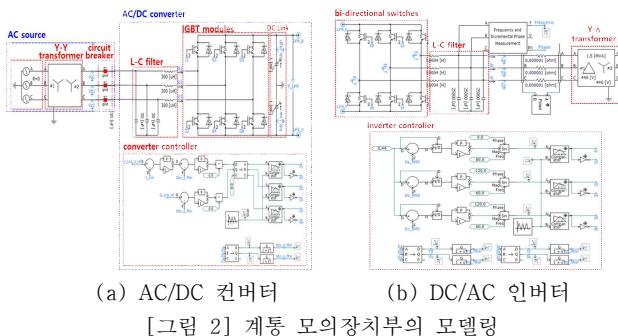


[그림 1] 데이터센터용 분산형 DC UPS의 구성

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 분산형 DC UPS의 평가 시험장치 모델링

#### 3.1 계통 모의장치부

먼저, 계통 모의장치부는 그림 2와 같이, AC/DC 컨버터, DC/AC 인버터로 구성된다. 이 중 그림 2(a)의 AC/DC 컨버터는 L-C 필터, IGBT 모듈, DC Link 커패시터로 구성된다. 여기서, 제어기는 d-q 축 변환 기반 제어로 DC Link 전압을 안정화하며, d축 기준전류는 목표값과 실제값의 차이로 산정하고 q축 기준전류는 0으로 설정해 무효전류를 억제·역률을 1로 유지한다. 또한, 그림 2(b)의 DC/AC 인버터부는  $\Delta$ -Yg 변압기, 양방향 스위치, L-C 필터, 인버터 제어기로 구성된다. 여기서, 제어기는 출력·기준전압 차이를 PI 보상해 목표 주파수·위상에 맞는 정현파를 출력한다.



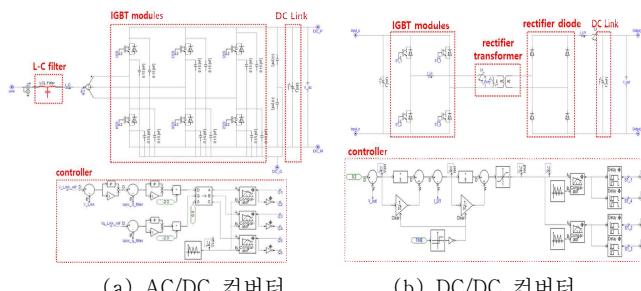
(a) AC/DC 컨버터

(b) DC/AC 인버터

[그림 2] 계통 모의장치부의 모델링

#### 3.2 분산형 DC UPS부

한편, 분산형 DC UPS부는 그림 3과 같이, AC/DC 컨버터와 고주파 절연형 DC/DC 컨버터로 구성된 정류기, 그리고 그림 4와 같이, 배터리·buck-boost 컨버터로 구성된 BBU로 나뉜다. 여기서, 정류기의 AC/DC 컨버터(그림 3(a))는 IGBT 3-leg 구조와 DC Link 커패시터로 구성돼 AC 220[V]를 DC 600[V]로 변환하며, 제어기는 PI 연산으로 DC Link 전압을 제어한다. 또한, 정류기의 DC/DC 컨버터(그림 3(b))는 IGBT 풀브리지, 고주파 변압기, 정류용 다이오드 모듈, DC-Link 커패시터, 전압제어기로 이루어진다. 여기서, 고주파 변압기가 절연과 전압 변환을 수행하고 다이오드 모듈이 DC로 정류한다. 또한, 전압 제어기는 이 중 루프와 PI 제어를 적용해 AC/DC 컨버터의 출력을 강압한다.



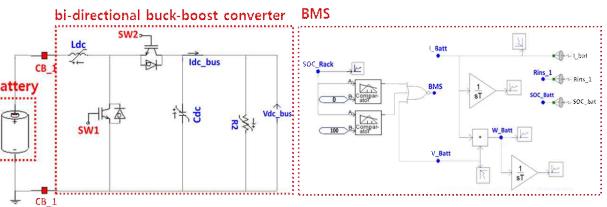
(a) AC/DC 컨버터

(b) DC/DC 컨버터

[그림 3] 정류기의 모델링

#### 3.3 BBU부

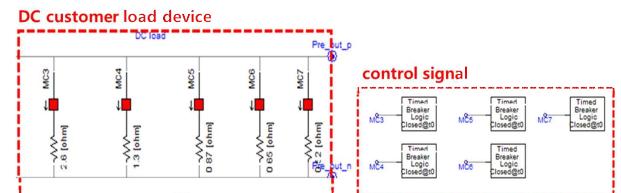
한편, 분산형 DC UPS부의 BBU(battery back-up unit)는 그림 4와 같이 배터리, 양방향 buck-boost 컨버터, BMS로 구성된다. 여기서, 배터리는 42[V] 공칭전압과 5[kWh] 용량을 가지며, buck-boost 컨버터는 2개의 IGBT 스위치(SW1·SW2)와 인덕터로 이루어진 양방향 토클로지를 적용한다. 또한, 충전은 SW1 on·SW2 off의 buck 모드로 수행되며, 방전은 SW1 off·SW2 on의 boost 모드로 전환된다. 마지막으로, BMS는 전압·전류를 계측해 SOC를 산정하고, 적정 범위 내에서 충방전을 제어한다.



[그림 4] BBU의 모델링

#### 3.4 모의 부하장치부

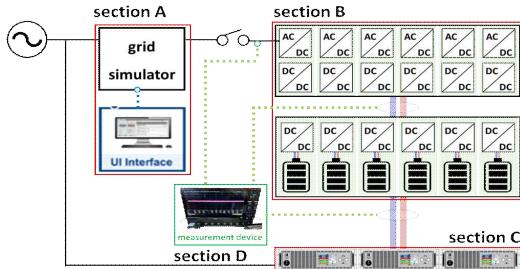
한편, 모의 부하장치부는 그림 5와 같이 분산형 DC UPS로부터 공급받는 DC 부하를 나타내며, 1[kW], 2[kW], 3[kW], 5[kW]의 저항을 조합하여 최대 15[kW]로 가변할 수 있도록 구성된다. 또한, 개폐기는 개별 부하에 각각 설치하여, 제어신호에 따라 데이터센터의 연속 운전 특성과 급격한 부하 변동을 모의한다.



[그림 5] 모의 부하장치부의 모델링

### 4. 데이터센터용 분산형 DC UPS의 시험장치 구현

상기의 3장에서 제시한 모델링을 바탕으로, 데이터센터용 분산형 DC UPS의 시험장치의 전체 시스템을 구현하면, 그림 6과 같다. 여기서, section A는 AC 전원과 AC/DC 컨버터, 인버터 등으로 구성된 계통모의장치부이며, section B는 정류기 (AC/DC 컨버터, DC/DC 컨버터, 등)와 BBU(리튬이온배터리, buck-boost 컨버터, 등)로 구성된 DC UPS부를 나타낸다. 또한, section C는 DC 전자부하와 험수발생기, 인터페이스, 모니터링 부(HMI), 등으로 구성된 DC 전자부하장치부이며, section D는 DC UPS부의 입력단과 출력단, DC 전자 부하장치부의 입력단과 출력단에 전압 및 전류를 계측하는 측정장치부를 나타낸다.



[그림 6] 분산형 DC UPS 평가시험장치의 전체 시스템

## 5. 시뮬레이션 및 시험 결과분석

### 5.1 시뮬레이션 및 시험 조건

본 논문에서 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링과 15kW급 분산형 DC UPS용 시험장치를 바탕으로, DC UPS의 운용특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 및 시험 조건은 표 1과 같다. 먼저, 부하변동에 따른 DC UPS의 출력 특성 시험은 데이터센터의 서버 및 GPU 부하의 단시간 내 급격한 변화를 고려하여, 정격 부하의 10[%]와 60[%]에 대하여 20[ms]의 주기와 50[%]의 데티 사이클로 구형과 형태로 수행한다. 또한, 정류기-BBU의 절체 동작 시험은 계통 사고 및 복구 조건에서 정류기-BBU의 절체 시간과 출력 전압의 특성을 확인한다. 여기서, 입력전압은 220[V]에서 0[V]로 50[s] 동안 차단하고, 이후 0[V]에서 220[V]로 복구하는 조건을 설정한다.

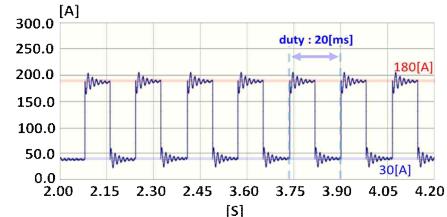
[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

항목		내역	
부하변동	계통전원	220[V]	
	부하 용량	period : 20ms duty : 50%	Low : 30A(10%) (10ms) High : 180A (60%) (10ms)
계통 사고 및 복구	계통전원	220[V]	
	부하용량	정전 : 0V (50s) 복구 : 220V	

### 5.2 분산형 DC UPS의 모델링에 의한 운용특성

#### 5.2.1 부하변동에 따른 출력 특성

5.1절에서 제시한 부하변동 조건에서, 모델링에 의한 DC UPS의 출력 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 정격 부하의 10[%]인 30[A]와 정격 부하의 60[%]인 180[A]를 20[ms]의 주기로 변동하는 부하 전류를 나타내며, 그림 7(b)는 출력단 전압이 49.8[V]~51.1[V]의 범위 이내로 정상적으로 공급됨을 알 수 있다. 따라서, 부하변동에 따라 DC UPS는 정격전압(51[V])을 기준으로  $\pm 0.3[V]$  이내의 전압 변동폭을 나타내며, 안정적인 전원을 공급함을 알 수 있다.



(a) 부하변동 조건

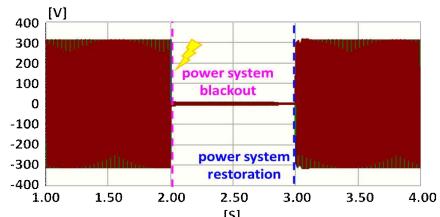


(b) 출력단 전압

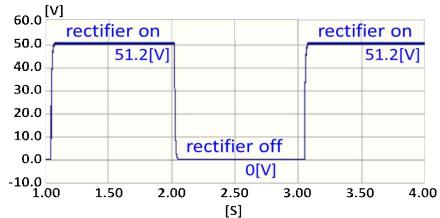
[그림 7] 모델링에 의한 부하변동에 따른 DC UPS의 출력 특성

#### 5.2.2 계통 사고 및 복구 시 정류기-BBU 절체 동작 특성

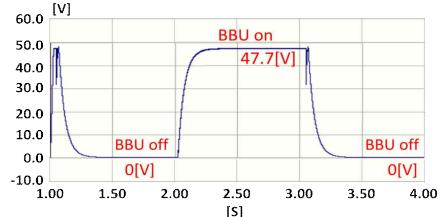
5.1절에서 제시한 계통 사고 및 복구 조건에서, 모델링에 의한 DC UPS의 정류기-BBU 절체 동작 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8(a)와 같이, 입력단 전압은 계통 사고 발생 시 220[V]에서 정전이 되는 경우와 계통 복구 시 220[V]로 회복되는 경우를 나타낸다. 또한, 그림 8(b)와 같이, 정류기의 출력단 전압은 계통 사고 발생 시 0[V]로 유지되고, 계통 복구 시 51.2[V]를 출력함을 알 수 있다. 한편, 그림 8(c)와 같이, BBU의 출력단 전압은 계통 사고 발생 시 동작하여 47.7[V]로 공급되고, 계통 복구 시 대기 상태로 전환됨을 알 수 있다.



(a) 입력단 전압



(b) 정류기 동작 전압



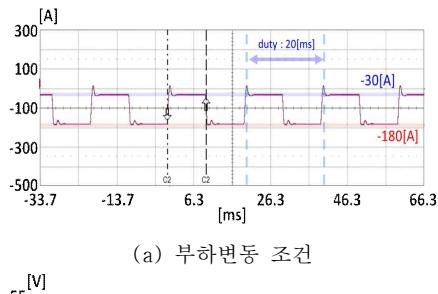
(c) BBU 동작 전압

[그림 8] 모델링에 의한 계통 사고 및 복구 시 정류기-BBU 절체 동작 특성

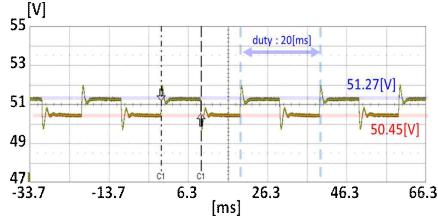
### 5.3 분산형 DC UPS의 시험장치에 의한 운용특성

#### 5.3.1 부하변동에 따른 출력 특성

5.1절에서 제시한 부하변동 조건에서, 시험장치에 의한 DC UPS의 출력 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9(a)는 정격 부하의 10[%]인 30[A]와 정격 부하의 60[%]인 180[A]를 20[ms]의 주기로 변동하는 부하 전류를 나타내며, 그림 9(b)는 출력단 전압이 50.45[V]~51.27[V]의 범위 이내로 정상적으로 공급됨을 알 수 있다. 따라서, 부하변동에 따라 DC UPS는 정격 전압(51[V])을 기준으로  $\pm 0.8[V]$  이내의 전압 변동폭을 나타내며, 안정적인 전원을 공급함을 알 수 있다.



(a) 부하변동 조건

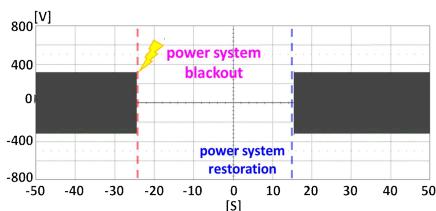


(b) 출력단 전압

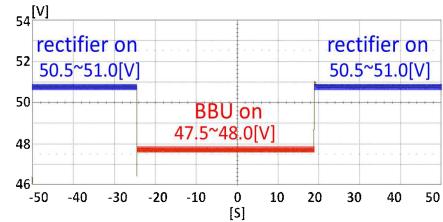
[그림 9] 시험장치에 의한 부하변동에 따른 DC UPS의 출력 특성

#### 5.3.2 계통 사고 및 복구 시 정류기-BBU 절체 동작 특성

5.1절에서 제시한 계통 사고 및 복구 조건에서, 시험장치에 의한 DC UPS의 정류기-BBU 절체 동작 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)와 같이, 입력단 전압은 계통 사고 발생 시 220[V]에서 정전이 되는 경우와 계통 복구 시 220[V]로 회복되는 경우를 나타낸다. 또한, 그림 10(b)와 같이, 계통 사고 발생 시 BBU가 동작하여 출력단 전압이 47.5~48.0[V] 범위로 유지됨을 알 수 있다. 또한, 계통 복구 시 정류기가 동작하여 출력단 전압이 50.5~51.0[V] 범위로 유지됨을 알 수 있다. 한편, 그림 11과 같이, 2.8[ms] 이내에 정류기에서 BBU로 절체 동작이 이루어지고, 출력단 전압은 50.7[V]~47.7[V] 이내로 유지되어, IEC 62040-3에서 제시한 절체 시간(10[ms] 이내)과 전압 변동 조건을 만족함을 알 수 있다.

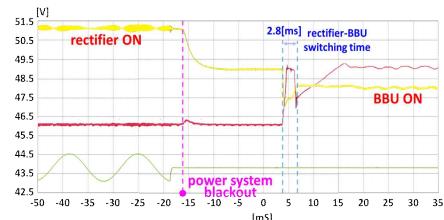


(a) 입력단 전압



(b) 출력단 전압

[그림 10] 시험장치에 의한 계통 사고 및 복구 시 정류기-BBU 절체 동작 특성



[그림 11] 정류기-BBU 절체 시간

## 6. 결 론

본 논문에서는 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링과 시험 장치를 이용해 입력 전원 및 부하 변동, 계통 사고 및 복구에 따른 정류기-BBU 절체 등 다양한 조건에서 DC UPS의 운용 특성을 평가하였다. 먼저, PSCAD/EMTDC 모델링으로 평가한 결과, 부하변동 시 DC UPS의 출력 전압은 정격 전압(51[V])을 기준으로  $\pm 0.3[V]$  범위 내에서 안정적으로 유지되었다. 또한, 시험 장치로 평가한 결과, 부하 변동 시 출력 전압은  $\pm 0.8[V]$  범위 내에서 안정적으로 유지되었다. 한편, 정류기-BBU 절체 시험에서 PSCAD/EMTDC 모델링으로 평가한 결과 계통 사고 및 복구 시 출력 전압이 47.5[V]~51.2[V] 범위로 유지되었으며, 시험 장치로 평가한 결과 47.7[V]~50.7[V] 범위로 유지되었고 IEC 62040-3에서 제시한 절체 시간(10[ms] 이내)과 전압 변동 조건을 모두 만족하여, DC UPS 출력 특성이 데이터센터 적용에 적합함을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향”, 대한민국 정책브리핑, 2021.10.18.
- [2] 이승호, 이중선, 유현상, 노성은, 최성문, 노대석, “PSCAD/EMTDC를 이용한 30kW급 UPS 시험장치의 모델링 및 사고특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 26, No. 5, pp. 1–9, 2025.
- [3] 최동훈, 이동주, “AI-Aided Design Optimization 기술을 이용한 UPS 정류기의 다분야통합최적설계”, 대한전기학회논문지, vol. 74, No. 4, pp. 586–593, 2025.