

데이터센터용 DC Distributed Power Supply의 운용 특성에 관한 연구

박찬욱, 이진호, 신건, 곽충근, 노대석
한국기술교육대학교

e-mail : chanwook0929@koreatech.ac.kr

A Study on Operation Characteristics of DC Distributed Power Supply in Data Center

Chan-Wook Park, Jin-ho Lee, Jian Shen, Chung-Guen Kwak, and Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical, Electronic & Communication Engineering, Koreatech

요약

최근, IT 산업의 발전으로 급격하게 증가하는 데이터센터는 단일 시설 중에서 가장 많은 전력을 소비하고 있어, 대규모 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 방식을 채택하고 있다. 반면, 국내 기업들은 최근에서야 분산형 DC DPS의 도입을 고려하고 있으며, 아직 상용화 사례가 적어 성능과 안정성의 검증을 위한 선행 연구가 요구되고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 분산형 DC DPS의 운용 특성을 분석하기 위하여, DC DPS부, 계통모의장치부, DC 전자부하장치부로 구성된 성능평가 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 효율 특성, 입력 전원 품질에 따른 DC DPS의 응답특성, 계통 사고 및 복구 시 rectifier - BBU 전환 동작 특성 시험을 수행한 결과, 효율특성 시험에서는 기존 AC UPS의 전원공급 방식과 비교할 경우, 최소 2.5%에서 최대 11.7%의 효율 개선이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 220V 입력 전원의 $\pm 30\%$ 급변 조건에서 DC DPS는 정상적인 DC 전력을 공급하고, 계통 전압 사고 및 복구 조건에서도 rectifier와 BBU 간에 정상적인 절체가 이루어지는 것을 알 수 있어, 본 연구에서 제시한 DC DPS의 유용성을 확인하였다.

1. 서론

최근 정부가 '2050 탄소중립'을 선언하면서, 산업·건물·수송 분야에서는 고효율 기기 및 제품의 보급과 함께 수요관리 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 전원공급방식으로의 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, 분산형 DC DPS의 운용 특성을 분석하기 위하여, DC DPS부, 계통모의장치부, DC 전자부하장치부로 구성된 성능평가

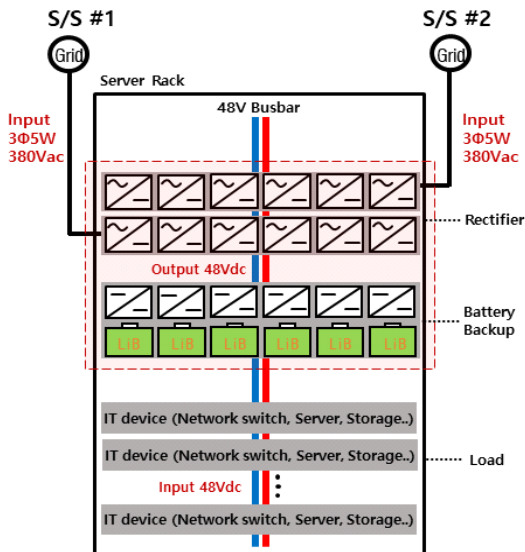
시험장치를 구현한다. 또한, 이를 바탕으로 DC DPS의 기존 AC UPS와 다른 구조적 차이를 고려하여 제시한, “효율특성, 입력 전원 품질에 따른 DC DPS의 응답특성, 계통 사고 및 복구 시 rectifier - BBU 전환 동작 특성” 시험을 수행하고, 이를 통해 본 연구에서 제시한 DC DPS의 유용성을 확인한다.

2. 데이터센터용 분산형 DC DPS 구성

기존의 중앙집중형 AC UPS는 컨버터, 인버터, 연축전지 및 바이패스 회로로 구성되어, 연축전지의 충전을 위하여, 380V의 AC 전력을 DC 전력으로 변환하고, 다시 인버터를 통해서 DC 전력을 AC 전력으로 변환하여 수천 대의 IT 기기에 정제된 전원을 공급한다. 여기서, AC 전력을 DC로 변환한 다음 다시 AC로 변환하는 과정으로 최소 3%에서 최대 8%의 전력손실이 발생하게 되는데, 이러한 이중 변환은 365일 24시간 가동하는 데이터센터의 특성에 따라 경제적인 측면에서 매우 비효율적이다. 또한, 여러 대의 MW급 대용량 UPS가 중앙에서 일괄적으로 IT 기기에 전원공급을 담당하는 방식은 고

장 발생 시 유지보수 비용은 물론이고 사고파급력 또한 커질 수 있어 신뢰성을 최우선으로 하는 데이터센터에는 큰 문제점으로 작용할 수 있다.

한편, 본 논문에서 제안하는 분산형 DC DPS는 그림 1과 같이 15~30kW급의 정류장치부(rectifier)와 배터리 백업장치부(battery back-up unit, BBU)로 구성되어, 서버 랙 내부에 장착된다. 여기서, rectifier는 상용전원으로부터 공급받는 220V의 AC 전력을 48V DC로 변환하여 IT 기기에 직접 공급하고, BBU는 계통사고 발생 시 비상발전기가 투입될 때까지 해당 랙의 IT 기기에 전원공급을 유지하는 역할을 수행한다. 이러한 구성은 서버 랙 단위로 이중화된 전원공급을 담당하기 때문에 일부에 고장이 발생하더라도 사고 파급을 최소화할 수 있고, 기존 AC UPS의 AC-DC 및 DC-AC의 이중 전력변환 과정이 모두 생략되므로, 전력손실이 매우 적다.



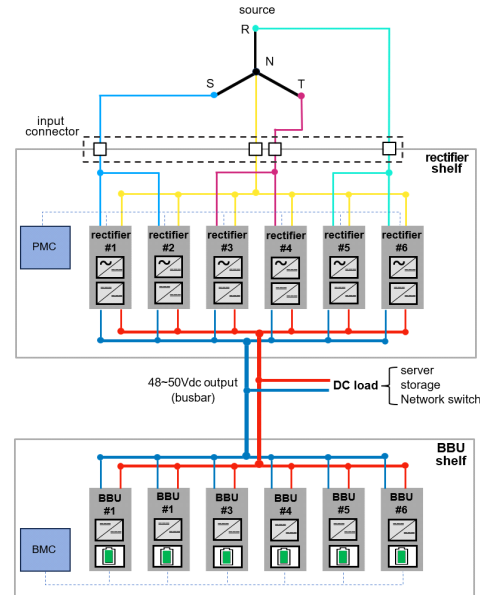
[그림 1] 데이터센터용 분산형 DC DPS 구성도

3. DC DPS 성능평가 시험장치의 구현

3.1 DC DPS부

DC DPS의 rectifier부는 단위 모듈 하나에 3kW AC-DC / DC-DC 컨버터로 구성되고, BBU는 DC-DC 컨버터와 리튬이온 배터리로 구성된다. 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

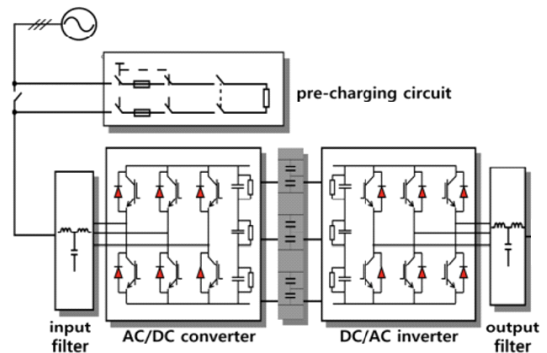
IT 기기를 계속해서 운영할 수 있다. 본 논문에서는 그림 2와 같이, 3kW rectifier 단위 모듈 6대를 N+1 구조로 최대 출력 15kW를 구현하고, BBU부는 3kW/239Wh 단위 모듈 6대의 병렬 구성으로 총 15kW/1434Wh를 구현한다. 여기서, DC DPS의 출력 전압은 rectifier로 동작 시 DC 50.5에서 51V, BBU로 동작 시 DC 47.5에서 48V를 출력한다.



[그림 2] rectifier/BBU 내부 구성 및 단선도

3.2 계통모의장치부

계통모의장치는 그림 3과 같이, AC-DC / DC-AC 변환을 통해 계통에서 발생할 수 있는 외란(sag, swell, interruption 등)을 모의할 수 있는 programmable AC source이며, 최대 출력은 100kVA이고, 출력전압 범위는 0에서 305Vrms(L-N)이다. 본 논문에서 해당 장비는 DC DPS의 강건성을 분석하기 위해 데이터센터에서 발생할 수 있는 입력 전원측 사고를 시험조건에 따라 모의한다.

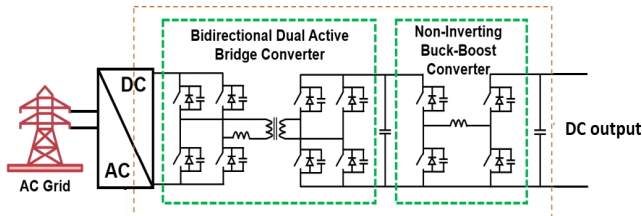


[그림 3] 계통모의장치부 내부 구성 및 단선도

3.3 DC 전자부하장치부

DC 전자부하장치는 그림 4와 같이, AC-DC/DC-DC

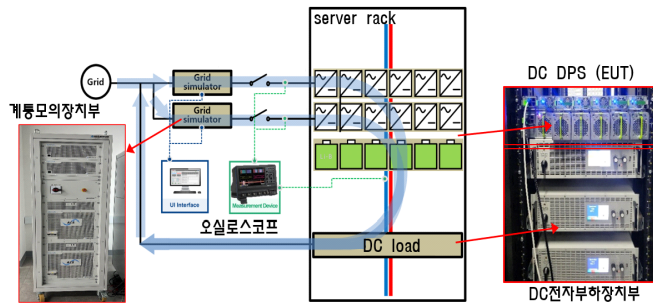
변환을 통해, DC 전원을 입력받아 작동하는 IT 부하기기의 전력 소비 패턴과 부하의 크기를 모사할 수 있는 programmable DC source이며, 최대 출력은 15kW이고, 출력전압 범위는 0에서 60Vdc이다. 본 논문에서 해당 장비는 DC DPS의 효율 및 부하특성을 분석하기 위해 시험조건에 따라 DC DPS 정격의 30%에서 100% 범위로 부하전력을 모의한다.



[그림 4] DC 전자부하장치 내부 구성 및 단선도

3.4 전체 시스템

DC DPS 시험장치의 전체 시스템은 그림 5와 같이, 계통모의장치, DC 전자부하장치, 모니터링 및 계측장치와 시험 대상인 DC DPS로 구성한다.



[그림 5] DC DPS 시험장치 전체 시스템 구성도

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서는 DC DPS의 운용 특성을 분석하기 위하여 표 1과 같은 시험조건을 바탕으로 효율특성, 입력 전원 품질에 따른 DC DPS의 응답특성, 계통 사고 및 복구시 rectifier - BBU 전환 동작 특성 시험을 수행한다.

먼저, 효율특성 시험은 DC 전자부하장치를 이용하여, DPS의 출력을 4.5kW(30%)에서 정격 15kW(100%)까지 10%씩 계단 형태로 증가하면서, 각 구간의 효율을 측정하고, 기존의 AC UPS 방식의 효율 데이터와 비교를 통해 DPS의 DC 전원공급 방식에 대한 에너지 효율 개선 효과를 분석한다. 또한, 입력 전원 품질에 따른 DC DPS의 응답특성 시험은 계통모의장치를 이용하여, DPS의 입력 전압 허용범위 이내인 ±30%만큼 sag 및 swell을

모의하여, Fault 없이 DC 전자부하에 정상적인 DC 전원을 공급하는지 확인한다. 마지막으로, 계통 사고 및 복구시 rectifier - BBU 전환 동작 특성 시험은 계통모의장치를 이용하여, 계통 정전사고와 복구 상황에 대한 모의를 통해 rectifier와 BBU 간에 정상적인 절체 동작 여부를 확인한다.

[표 1] DC DPS의 시험조건

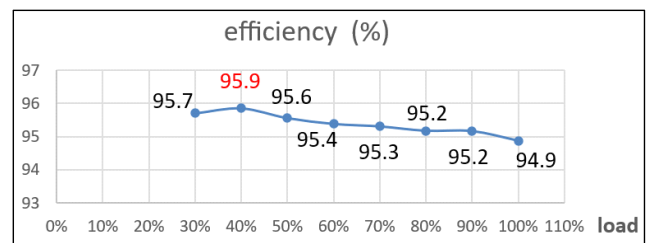
구분	항목	사양
rectifier	구성	3kW rectifier module x 6ea
	입력 전압	380V, 3φ 5w, 60Hz
	정격 출력	n+1 (15kW + 3kW)
	정격 출력 전압	50Vdc
BBU	구성	3kW BBU module x 6ea
	정격 출력 및 용량	15kW @ > 5min (1434Wh)
	정격 출력 전압	48Vdc
grid simulator	입력전압	380V(L-L), 3φ 4w, 60Hz
	출력범위	0 - 100kVA
	출력전압범위	0 - 305Vrms (L-N)
	출력전류범위	0 - 144A
DC electronic load	입력전압	380V(L-L), 3φ 4w, 60Hz
	출력범위	0 - 100kVA
	출력전압범위	0 - 305Vrms (L-N)
	출력전류범위	0 - 144A

4.2 효율특성

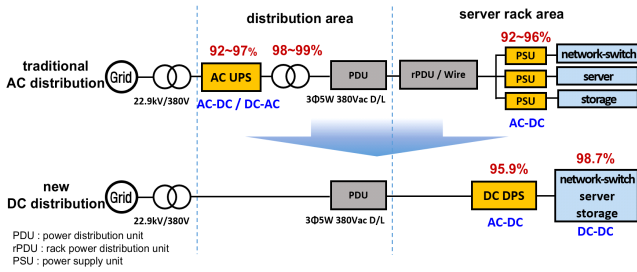
DC DPS의 효율은 그림 6과 같이, 40% 부하에서 최대 효율 95.9%가 측정되었다. 한편, 그림 7과 식 1에 따라, 기존 AC UPS의 전원공급 방식과 비교할 경우, 최소 2.5%에서 최대 11.7%의 효율 개선이 나타나는 것을 확인하였다. 여기서, DC DPS의 실측 효율을 제외한 나머지 효율은 특정 상용화 제품의 데이터 시트를 활용하였다.

$$AVG(\eta_{DC.DPS} \times \eta_{server.dc.dc}) - AVG(\eta_{AC.UPS} \times \eta_{trans} \times \eta_{PSU}) \quad (1)$$

여기서, $\eta_{AC.UPS}$: 분산형 DC DPS 효율, $\eta_{server.dc.dc}$: DC 용 서버 내부의 DC/DC 변환 효율, $\eta_{AC.UPS}$: 중앙집중형 AC UPS 효율, η_{trans} : UPS용 변압기 효율, η_{PSU} : 서버용 power supply unit 효율



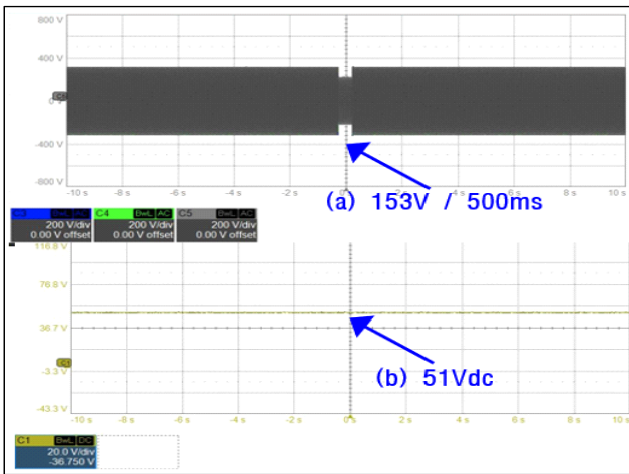
[그림 6] DC DPS 효율측정 결과



[그림 7] 데이터센터 전원공급 방식에 따른 효율 비교

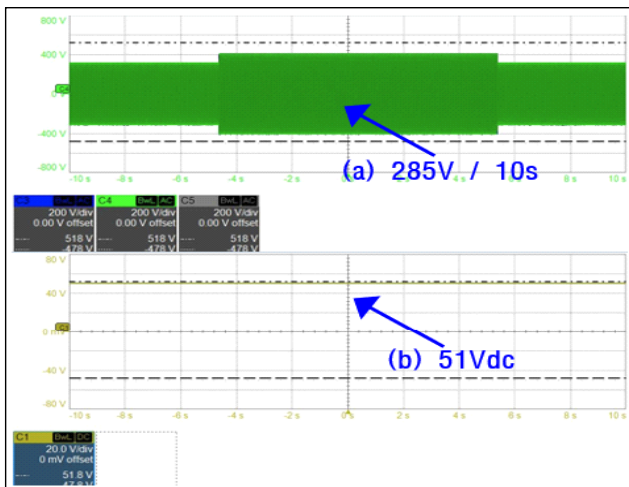
4.3 입력 전원 품질에 따른 DC DPS 응답특성

입력 전원 품질에 따른 DC DPS 응답특성 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)과 같이, 계통 220V 전압을 500ms 동안 -30% (153V)로 급격히 강하하였을 때, 그림 8(b)에서 DC DPS의 출력단 전압은 변동 없이 51V DC 전압을 정상적으로 공급하는 것을 확인하였다.



[그림 8] -30% 전압 강하시 DC DPS 응답특성

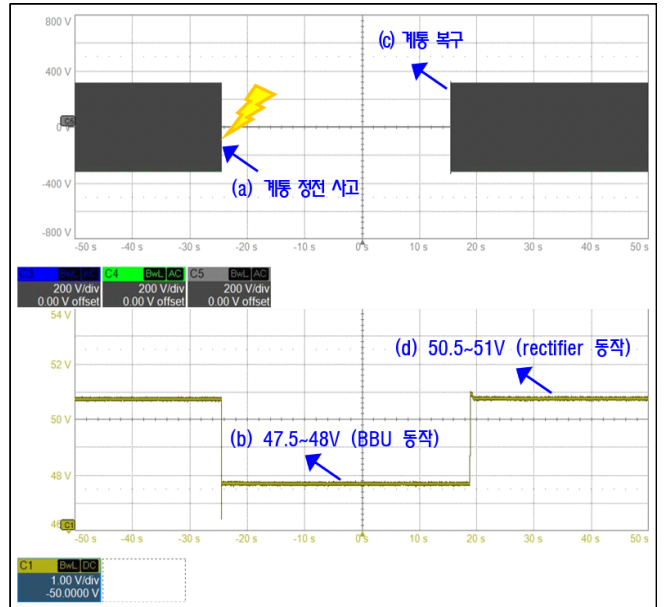
또한, 그림 9(a)와 같이, 계통 220V 전압을 10s 동안 +30% (285V)로 급격히 상승하였을 때, 그림 9(b)에서 DC DPS의 출력단 전압은 변동 없이 51V DC 전압을 정상적으로 공급하는 것을 확인하였다.



[그림 9] +30% 전압 상승시 DC DPS 응답특성

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

계통 사고 및 복구 시 rectifier-BBU 전환 동작 특성 결과는 그림 10(a)와 같이, 계통 정전 사고를 모의하였을 때, 그림 10(b)에서 rectifier는 Off, BBU는 On 되어 DC bus-bar에 47.5에서 48V의 DC 전압을 정상적으로 출력하고, 그림 10(c)에서 계통을 복구하였을 때, 그림 10(d)에서 rectifier는 On, BBU는 Off 되어, DC bus-bar에 50.5에서 51V DC 전압을 정상적으로 출력하는 것을 확인하였다.



[그림 10] 계통 사고 및 복구 시 rectifier-BBU 전환 동작 특성 결과

5. 결론

본 논문에서는 최근 국내 데이터센터 기업에서 도입을 추진하고 있는 분산형 DC DPS의 운용 특성을 분석하기 위하여, DC DPS부, 계통모의장치부, DC 전자부하장치부로 구성된 성능평가 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 효율 특성, 입력 전원 품질에 따른 DC DPS의 응답특성, 계통 사고 및 복구 시 rectifier - BBU 전환 동작 특성 시험을 수행한 결과, 효율특성 시험에서는 기존 AC UPS의 전원공급 방식과 비교할 경우, 최소 2.5%에서 최대 11.7%의 효율 개선이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 220V 입력 전원의 ±30% 급변 조건에서 DC DPS는 정상적인 DC 전원을 출력하고, 계통 전압 사고 및 복구 조건에서 rectifier와 BBU간에 정상적인 절체가 이루어지는 것을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 DC DPS의 유용성을 확인하였다.

참고문헌

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