

데이터센터용 DC Distributed Power Supply 성능평가 시험장치의 구현

박찬욱*, 신건*, 송두리*, 김지명*, 노대석*
*한국기술교육대학교

e-mail : chanwook0929@koreatech.ac.kr

An Implementation of Performance Test Device for DC Distributed Power Supply in Data Center

Chan-Wook Park*, Jian Shen*, Du-Ri Song*, Ji-Myung Kim*, and Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical, Electronic & Communication Engineering, Koreatech

요약

최근, 정보통신 기술의 발전으로 대량의 데이터를 처리하기 위하여 데이터센터의 전력 소비가 급증하고 있다. 이에 따라, 대규모 서버를 운용하는 글로벌 기업들은 기존의 중앙집중형 AC UPS 방식에서 분산형 DC 전원공급방식(DC DPS)으로의 전환을 추진하고 있지만, DC DPS의 도입이 초기 단계에 머물러 있어, 성능 및 안정성을 검증할 수 있는 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 데이터센터용 DC DPS의 운용특성을 평가하기 위하여 DC DPS부, 계통모의장치부, DC 전자부하장치부로 구성된 성능평가 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 전원공급 방식에 따른 효율특성과 DC DPS의 응답특성, 계통 사고 시 rectifier-BBU 전환 동작 특성 시험을 수행한 결과, DC DPS는 기존 AC UPS 방식보다 효율이 최대 11.7% 정도 개선되어, 에너지 소비 절감에 기여할 수 있음을 알 수 있다. 또한, DC DPS는 입력 전원측에 품질 저하가 발생하더라도 안정적인 DC 출력을 유지할 수 있고, 계통 고장 시 rectifier와 BBU 간의 원활한 전환이 가능함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구현한 데이터센터용 DC DPS 성능평가 시험장치가 DPS의 효율성과 안정성을 효과적으로 검증할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

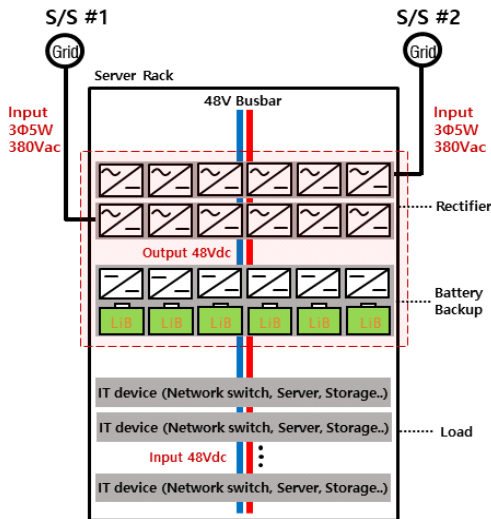
최근 정보통신 기술의 급속한 발전으로 데이터 처리량이 폭발적으로 증가하면서, 데이터센터의 전력 소비 또한 급증하고 있다. 이는 글로벌 에너지 문제의 중요 이슈로 떠오르고 있으며, 특히 정부의 '2050 탄소중립' 선언 이후, 대규모 전력 소비 시설인 데이터센터의 에너지 효율 개선은 산업계의 시급한 과제가 되었다. 이러한 배경으로 대규모 서버를 운용하는 글로벌 기업들은 수년 전부터 기존의 중앙집중형 AC UPS 방식 대신, 서버 랙 단위로 IT 기기에 DC 전원을 직접 공급하는 분산형 DC 전원공급방식(DC Distributed Power Supply, 이하 DC DPS)으로의 전환을 추진해왔다. 그러나 국내 데이터센터 업계에서는 DC DPS의 도입이 초기 단계에 머물러 있다. 아직 국내에서의 상용화 사례가 부족하고, 그 성능과 안정성을 검증한 연구도 미비한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC DPS의 운용 특성을 정밀하게 분석하기 위하여 DC DPS부, 계통모의장치부, DC 전자부하장치부로 구성된 성능평가 시험장치를 구현한다. 또한, 이를 바탕으로 DC DPS의 효율특성, 입력 전원 품질에 따른 응답특성, 계통 사고 및 복구 시 rectifier-BBU 전환 동작 특성 등 주요 성능을 검증하기 위한 시험을

수행하고, 이를 통해 본 연구에서 제시한 DC DPS의 성능평가 시험장치의 유용성을 확인한다.

2. 데이터센터용 분산형 DC DPS의 운용특성

기존의 중앙집중형 AC UPS 시스템은 일반적으로 단위 용량 500kVA 이상의 전력변환장치로 구성되며, 주요 요소로는 AC-DC 컨버터, DC-AC 인버터, 대용량 납축 전지, 그리고 바이패스 회로를 포함한다. 이 시스템은 380V AC 전력을 DC로 변환한 후 다시 AC로 변환하는 이중 변환 과정을 거치게 되는데, 이 과정에서 최소 3%에서 최대 8%의 전력손실이 발생한다. 24시간 연중무휴 운영되는 데이터센터의 특성상, 이러한 손실은 상당한 에너지 비효율을 초래한다. 또한, MW급 대용량 UPS의 중앙집중식 구조는 단일 장애점(Single Point of Failure) 위험을 내포하고 있어, 고장 발생 시 유지보수 비용 증가와 광범위한 서비스 중단으로 이어질 수 있다. 반면, 본 논문에서 제안하는 분산형 DC DPS는 서버 랙 스케일의 분산형 전원공급 방식을 채택한다. 이 시스템은 그림 1과 같이 15kW에서 30kW 용량의 고효율 정류장치(rectifier)와 리튬이온 기반의 배터리 백업 장치(BBU)로 구성되며, 각 서버 랙에 직접 장착된다.

여기서, Rectifier는 220V AC를 48V DC로 직접 변환하여 IT 장비에 공급하며, BBU는 계통 사고 시 무정전 전원을 제공하여 비상 발전기 가동 전까지 시스템의 연속성을 보장한다. 이러한 분산형 구조는 여러 가지 장점을 제공한다. 첫째, 서버 랙 단위의 모듈화된 전원공급으로 인해 시스템의 확장성과 유연성이 크게 향상된다. 둘째, N+1 또는 2N 이중화 구성이 용이하여 시스템의 가용성과 신뢰성이 제고된다. 셋째, AC-DC-AC의 이중 변환 과정이 제거되어 전력 변환 효율이 크게 개선된다. 넷째, 고장 발생 시 영향 범위가 해당 랙으로 국한되어 전체 시스템의 안정성이 향상된다. 더불어, 48V DC 배전 방식의 채택으로 인한 전압 강하 감소, 케이블 단면적 축소, 그리고 구리 사용량 절감 등의 부가적인 이점도 기대할 수 있다. 이는 데이터센터의 총소유비용(TCO) 절감에 기여할 뿐만 아니라, 전체적인 에너지 효율 개선과 탄소 배출량 감소로 이어질 수 있다.



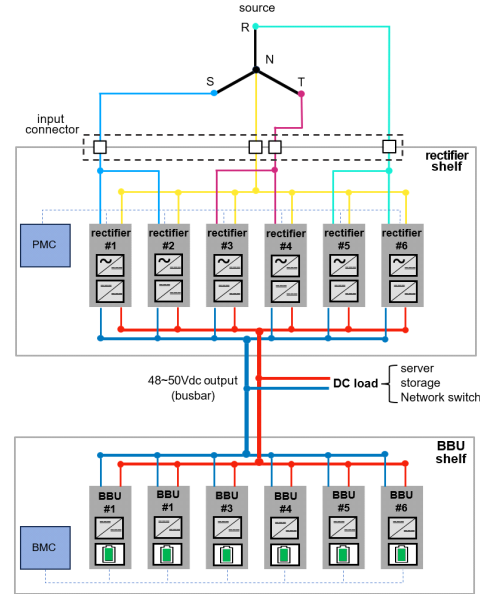
[그림 1] 데이터센터용 분산형 DC DPS 구성도

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 그

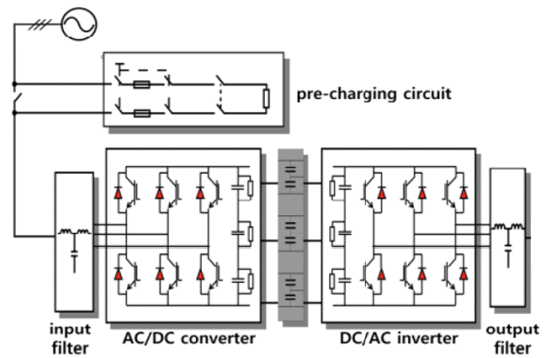
림 2와 같이, 3kW rectifier 단위 모듈 6대를 N+1 구조로 최대 출력 15kW를 구현하고, BBU부는 3kW/239Wh 단위 모듈 6대의 병렬 구성으로 총 15kW/1434Wh를 구현한다. 여기서, DC DPS는 rectifier로 동작 시 DC 50.5에서 51V, BBU로 동작 시 DC 47.5에서 48V를 출력한다.



[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 source기반으로 구현한다. 최대 출력은 100kVA, 출력 전압 범위는 0에서 305Vrms(L-N)이다. 본 논문에서 해당 장비는 DC DPS의 강건성을 분석하기 위해 데이터센터에서 발생할 수 있는 입력 전압축 사고를 시험조건에 따라 모의한다.

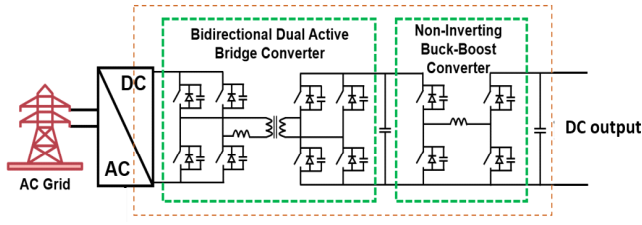


[그림 3] 계통모의장치부 내부 구성 및 단선도

3.3 DC 전자부하장치부

DC 전자부하장치는 그림 4와 같이, AC-DC/DC-DC 변환을 통해, DC 전원을 입력받아 작동하는 IT 부하기의 전력 소비 패턴과 부하의 크기를 모사할 수 있는

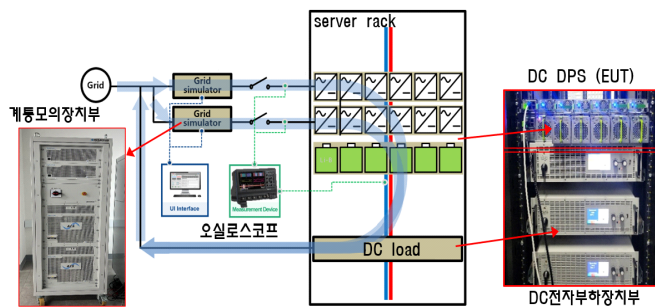
programmable DC load 기반으로 구현한다. 최대 출력은 15kW이고, 출력전압 범위는 0에서 60Vdc이다. 본 논문에서 해당 장비는 DC DPS의 효율 및 부하특성을 분석하기 위해 시험조건에 따라 DC DPS 정격의 30%에서 100% 범위로 부하전력을 모의한다.



[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 구성하여, 각 구성요소를 유기적으로 연동하고 정밀한 데이터 수집 및 분석을 위한 통합 제어 및 모니터링 시스템을 구축한다.



[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 복구 시 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 전원

을 공급하는지 확인한다. 마지막으로, 계통 사고 및 복구 시 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

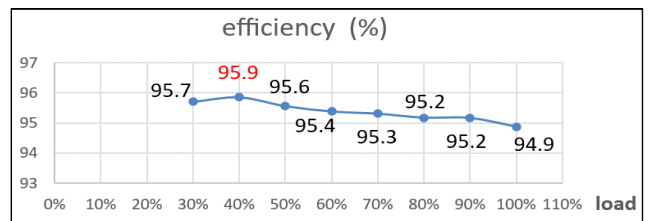
구분	항목	사양
rectifier	구성	3kW rectifier module x 6ea
	입력 전압	380V, 3φ 5w, 60Hz
	정격 출력	n+1 (15kW + 3kW)
	정격 출력 전압	50Vdc
BBU	구성	3kW BBU module x 6ea
	정격 출력 및 용량	15kW @ > 5min (1434Wh)
	정격 출력 전압	48Vdc
grid simulator	입력전압	380V(L-L), 3φ 4w, 60Hz
	출력범위	0 - 100kVA
	출력전압범위	0 - 305Vrms (L-N)
	출력전류범위	0 - 144A
DC electronic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

4.2 전원공급 방식에 따른 효율특성

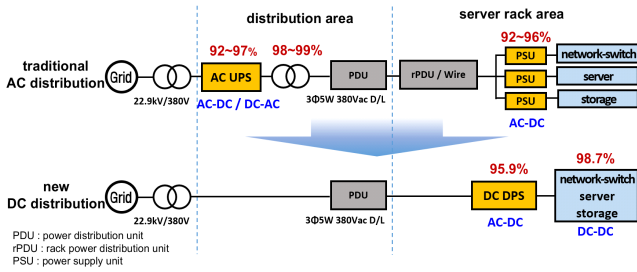
DC DPS의 효율은 그림 6과 같이, 40% 부하에서 최대 효율 95.9%가 측정되었다. 한편, 그림 7과 식 1에 따라, 기존 AC UPS의 전원공급 방식과 비교할 경우, 최소 2.5%에서 최대 11.7%의 효율 개선이 나타나는 것을 확인하였다. 여기서, DC DPS의 실측 효율을 제외하 나머지 효율은 특정 상용화 제품의 데이터 시트를 활용하였다.

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

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



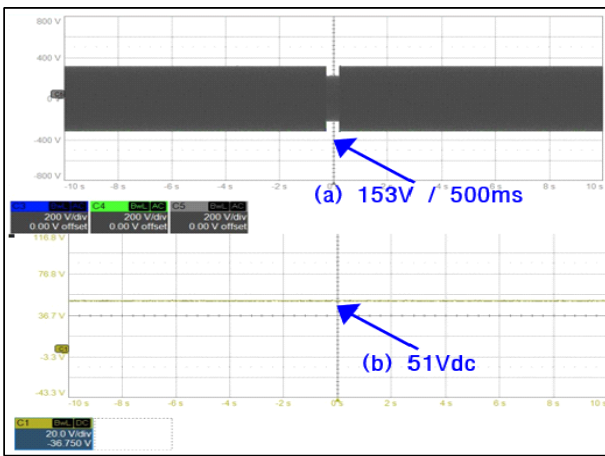
[그림 6] DC DPS 효율측정 결과



[그림 7] 데이터센터 전원공급 방식에 따른 효율 비교

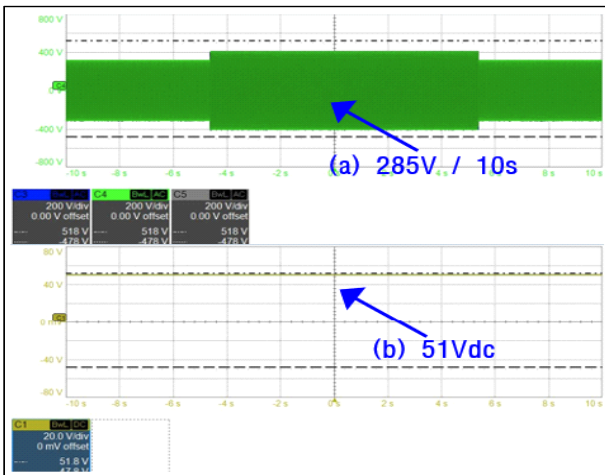
4.3 입력 전원 품질에 따른 DC DPS 응답특성

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 10초 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 연구에서는 데이터센터용 분산형 DC DPS의 성능을 정밀하게 평가할 수 있는 종합적인 시험장치를 구현하고, 이를 활용하여 DC DPS의 다양한 운용 특성을 실증적으로 분석한다. 구현된 시험장치는 최신 전력전자 기술과 정밀 계측 기술을 결합하여 실제 데이터센터 환경을 고도로 모사할 수 있도록 설계되었다. 이를 바탕으로 효율특성, 입력 전원 품질에 따른 DC DPS의 응답특성, 계통 사고 및 복구 시 rectifier -BBU 전환 동작 특성 시험을 수행한 결과, DC DPS는 기존 AC UPS 방식 대비 최대 11.7%의 효율 개선 효과를 보여 데이터센터의 에너지 소비 절감에 기여할 수 있음을 확인하였다. 또한, 입력 전원의 품질 저하(±30% 전압 변동, 순간 정전 등)에도 안정적인 DC 출력을 유지하고, 계통 사고 및 복구 상황에서 rectifier와 BBU 간의 원활한 전환이 이루어짐을 검증하여 시스템의 안정성을 검증하였다. 이를 통해 본 연구에서 구현한 DC DPS 성능평가 시험장치가 데이터센터용 DC DPS의 효율성과 안정성을 효과적으로 검증할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

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