데이터센터용 DC Distributed Power Supply의 성능 평가 방안에 관한 연구

박찬욱, 원종흥, 신건, 이진호, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail : chanwook0929@koreatech.ac.kr

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

Chan-Wook Park, Jong-Heung Won, Jian Shen, Jin-ho Lee and Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical, Electronic & Communication Engineering, Koreatech

요 약

최근, 정부의 탄소중립 정책으로 산업·건물·운송 분야에 대한 에너지 절감 및 수요관리가 요구되고 있으며, 단일 시설 중 가장 많은 전력을 소모하는 데이터센터의 효율 개선에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서, 기존의 데이터센터 전원공급방식은 중앙집중형 AC UPS를 구내 메인 수배전반에 대용량으로 설치하고, 여러 번의 AC/DC, DC/AC 전력 변환을 거쳐야 하므로, 전력손실이 매우 큰 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 국내에서 분산형 DC DPS의 도입이 추진되고 있지만, DC DPS는 기존 AC UPS와는 달리, 국내 상용화 사례는 물론, 성능 검증 또한 전무한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 데이터 센터용 DC DPS의 운용특성을 제시하고, 기존의 중앙집중형 AC UPS의 성능 평가에 대한 사례 분석을 수행한다. 또한, 이를 바탕으로, 입력공급 호환성, 입력전류, 출력응답특성 등 시험항목으로 구성된 DC DPS용 성능 평가 방안을 제안하여, 향후 DC DPS의 도입에 따른 성능 평가 기준에 대한 발판을 마련하고자 한다.

1. 서 론

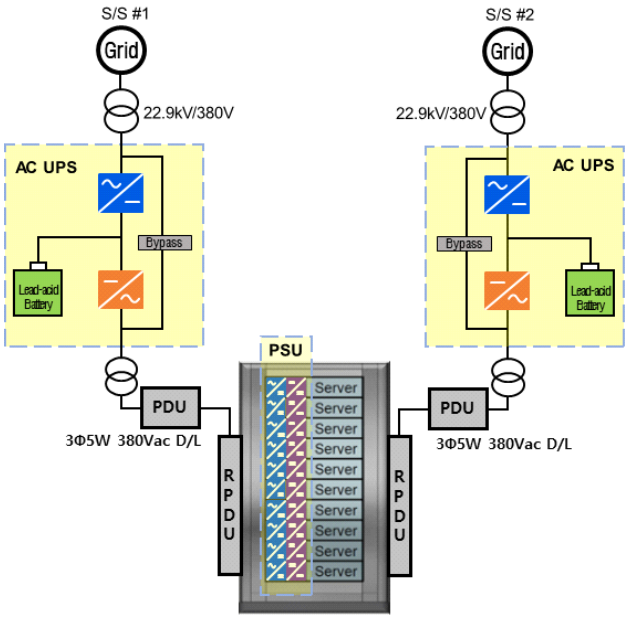
최근 정부의 '2050 탄소중립' 선언과 이를 달성하기 위한 여러 방향의 정책이 발표된 가운데, 산업·건물·수송 분야에서는 고효율 기기·제품 보급뿐만 아니라 수요관리 강화를 통한 에너지 효율 제고를 권고하고 있다 [1]. 이에 따라, 수천, 수만 대의 IT 장비가 24시간, 365일 중단 없이 운영되고 있는 데이터센터는 건물 부문에서 단일 시설로는 최대 규모의 전력을 소비하고 있어 효율 개선에 대한 역할과 책임이 크게 높아지고 있다. 한편, 기존 데이터센터의 전원공급방식은 구내 메인 수배전반에 설치된 대용량 AC UPS (Uninterruptible Power Supply)를 중심으로 서버, 스토리지, 네트워크 장치와 같은 IT 부하에 일괄적으로 전력을 공급하는 중앙 집중 방식을 적용하고 있다. 여기서, AC UPS는 비상용 연축전지를 충전하기 위한 AC-DC 변환 후 다시 DC-AC 변환을 통해 IT부하에 정제된 AC 전원을 공급하고, IT 부하는 별도로 내장된 소형 PSU(Power Supply Unit)를 통해 AC 입력전원을 다시 내부에 필요한 12V DC 전원으로 변환한다. 결과적으로 구내 메인 수배전반에서부터 IT 부하에 이르기까지 전력전송 과정에서의 삼중 전력변환은 매우 큰 전력손실을 발생시킨다. 이에, 최근에는 기존의 중앙집중형 AC 전원공급방식의 대안으로 메인 수배전반의 AC UPS를 제거하고, Rack 단위의 소용량 AC/DC 컨버터와 비상용 배터리를 조합하여 IT 부하에 DC 전원을 직접 공급하는 분산형 DC DPS(Distributed Power Supply)의 도입이 시도되고 있다. 하지만, DC DPS는 기존 AC UPS와는 달리, 국내 상용화 사례는 물론, 성능 검증 또한 전무한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 데이터 센터용 AC UPS와 DC DPS의 운용특성을 비교하고, 기존의 중앙집중형 AC UPS의 성능 평가에 대한 사례분석을 수행한다. 또한, 이를 바탕으로, 입력공급 호환성, 입력전류, 출력응답특성 등 시험항목으로 구성된 DC DPS용 성능 평가 방안을 제안하여, 향후 DC DPS의 도입에 따른 성능 평가 기준에 대한 발판을 마련하고자 한다.

2. 데이터센터용 전원공급장치의 운용특성

2.1 중앙집중형 AC UPS의 운용특성

기존의 중앙집중형 AC UPS는 그림 1과 같이, 컨버터, 인버터, 연축전지 및 바이패스 회로로 구성된다. 여기서,

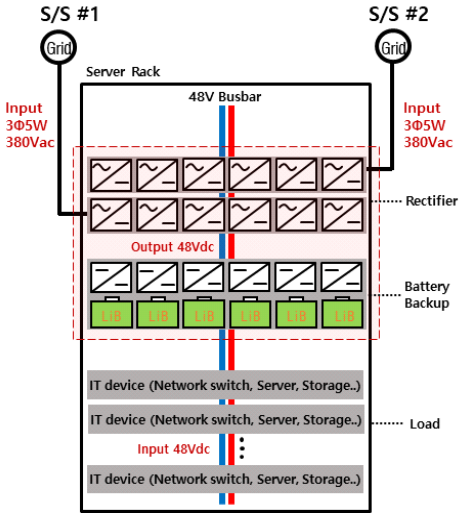
컨버터는 연축전지의 충전을 위하여, 구내 메인 수배전반으로부터 수전 받은 380V의 AC 전력을 DC 전력으로 변환하고, 다시 인버터를 통해서 DC 전력을 AC 전력으로 변환하여 수천, 수만 대의 IT장비에 정제된 전원을 공급한다. 또한, 연축전지는 비상시 데이터센터 IT설비의 무정전 운전을 위하여, 비상발전기가 투입되는 시간동안 전력 공급을 유지한다. 따라서, 기존의 중앙집중형 AC UPS는 AC 전력을 DC로 변환한 다음 다시 AC로 변환하는 과정으로 최소 2%에서 최대 10%의 전력손실이 발생하게 되는데, 이러한 이중변환은 365일 24시간 가동하는 데이터센터의 특성에 따라 경제적인 측면에서 매우 비효율적이다. 또한, 중앙에서 UPS를 통해 일괄적으로 전력을 전송하는 방식은 고장 발생 시 유지보수 비용은 물론이고 사고파급력 또한 커질 수 있어 신뢰성을 최우선으로 하는 데이터센터에는 큰 문제점으로 작용할 수 있다.



[그림 1] 중앙집중형 AC UPS 방식의 전력전송 구성도

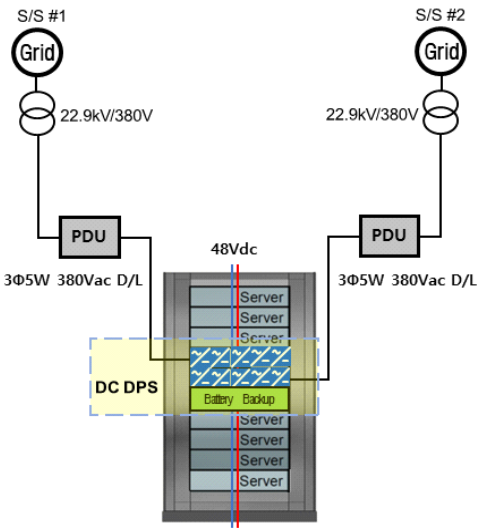
2.2 분산형 DC DPS의 운용특성

기존의 중앙집중형 AC UPS의 낮은 효율과 고장파급 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 그림 2와 같이 소용량 AC/DC 컨버터와 리튬이온배터리 기반의 전력 백업장치로 구성된 분산형 DC DPS를 제안한다. 여기서, AC/DC 컨버터는 서버랙 단위로 장착되며, 상용전원으로부터 공급받는 380V의 AC 전력을 48V의 IT기기용 DC 전력으로 변환하여 공급하는 역할을 하고, 최소 10분 동안 IT기기에 전력을 공급할 수 있는 용량의 리튬이온배터리로 구성된 전력 백업장치 또한 각 서버랙에 장착되어 비상시 비상발전기가 투입될 때까지 해당 랙의 서버기기를 담당하여 전원 공급을 유지하는 역할을 수행한다.



[그림 2] 데이터센터용 분산형 DC DPS의 구성

상기 구성에 따라, 분산형 DC DPS는 그림 3과 같이, 랙 단위로 이중화된 전원을 공급할 수 있으므로, 백업장비의 고장으로 인한 사고 파급을 최소화 할 수 있고, 기존 AC UPS의 AC/DC 및 DC/AC의 이중 전력변환 과정과 IT기기에 내장된 PSU의 AC/DC 변환 과정이 모두 생략되므로, 기존의 전력전송 방식에 비해 전력손실이 매우 적다. 하지만, DC DPS는 기존 AC UPS와는 달리, 국내 상용화 사례는 물론 이고, 성능 검증 또한 전무한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 기존 AC UPS의 성능 평가 사례를 분석하고, 이를 바탕으로 DC DPS의 성능을 검증하기 위한 시험평가 방법과 그에 따른 시험장치 구성을 제안하고자 한다.



[그림 3] 분산형 DC DPS 방식의 전력전송 구성도

3. UPS의 성능 평가 사례분석

UPS 시험 관련 국내 표준은 대표적으로 국가표준인 KS C 4310 무정전 전원 장치, KS C IEC 62040-1-1 무정전 전

원 장치(UPS) - 제1-1부 : 사용자 접근 지역용 UPS의 안전 요구 사항, KS C IEC 62040-3 무정전 전원 장치(UPS) - 제3부 : 성능 및 시험 방법 등이 있다. 이들 중에서 UPS의 시험평가 방법이 종합적으로 제시된 표준은 KS C IEC 62040-3 이며, 해당 표준의 시험항목 중 UPS의 전기적인 성능 평가와 관련된 항목을 정리하면, 표 1과 같다.

한편, DC DPS는 IT 부하의 무정전 운전을 위해 전력을 백업저장하고, 비상시 공급하는 기능으로써 기존의 AC UPS와 그 목적은 동일하지만, 전원 출력부의 차이로 인해 아키텍쳐와 동작 매커니즘은 일부 상이하다. 따라서, 표 1의 시험 항목 중 포괄적으로 DC DPS에 적용이 가능한 사항과 보완이 필요한 사항을 분석하고, 이를 바탕으로 DC DPS용 성능 평가 항목과 시험 방법을 제안하고자 한다.

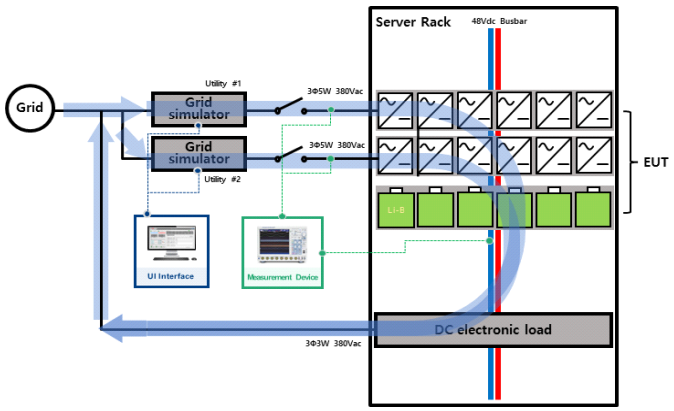
[표 1] KS C IEC 62040-3 표준 제시 시험항목

분류	시험 항목
입력 공급 호환성	정상 상태 입력 전압 허용차
	입력 주파수 허용차
입력 유입 전류	입력 전류의 고조파 왜곡
	역률
	효율
	대기 발전 호환성
출력	일반 모드 - 전부하
	일반 모드 - 전부하
	충전 에너지 모드 - 무부하
	충전 에너지 모드 - 전부하
	삼상 전압 불평형
	직류 전압 요소
	병렬 UPS 사이의 전류 분배
	출력 과전압 시험
	주기적 출력 전압 변이 시험
	과부하 - 일반 모드
	과부하 - 충전 에너지 모드
	동적 성능 - 일반모드에서 충전 에너지 모드
	동적 성능 - 충전 에너지 모드에서 일반 모드
	스텝 부하 - 일반 모드
	스텝 부하 - 충전에너지 모드
충전 및 재충전 에너지 시간	충전 에너지 시간
	재 충전 에너지 시간
	배터리 리플 전류
	재시작 시험

4. 데이터센터용 DC DPS의 성능 평가 방안

4.1 DC DPS용 성능 평가 시험장치의 구성

DC DPS용 성능 평가 시험장치의 구성은 그림 4와 같이, 계통모의장치(Grid simulator), DC 전자부하장치, 전력분석장치, 오실로스코프로 제안한다. 여기서, 계통모의장치는 실계통에서 발생할 수 있는 외란(sag, swell, interruption, harmonic, phase unbalancing 등)을 모의할 수 있는 Programmable AC 전원공급장치이다. 그리고 DC 전자부하장치는 DC 전원을 입력 받아 작동하는 IT 부하장치의 전력 소비 패턴과 부하의 크기를 모사할 수 있는 Programmable DC 전원공급장치이다. 또한, 시험 결과 분석에 매우 중요한 역할로써 계측장치로 분류되는 전력분석장치는 DC DPS의 장시간 출력 측정 데이터의 로깅을 통해 효율, 역률, 왜형률 등의 분석에 사용되며, 오실로스코프는 DC DPS의 노이즈, 돌입전류와 같은 순시적인 과도상태 출력 파형을 측정 및 분석하기 위해 사용된다.



[그림 4] 분산형 DC DPS용 성능 평가 시험장치의 구성

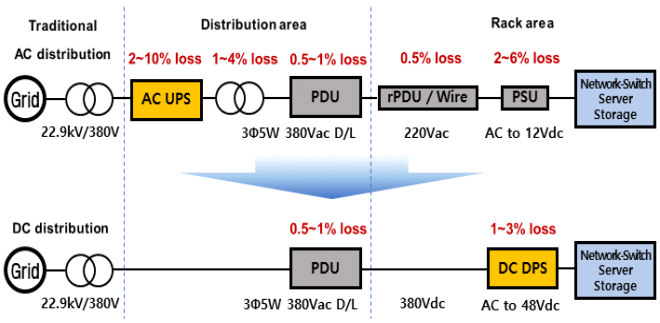
4.2 DC DPS의 성능 평가 방안

앞서 2장에서 언급한 바와 같이, DC DPS는 에너지 효율과 고장시 사고파급 측면에서 기존의 AC UPS 대비 매우 큰 장점을 가지지만, Track-record와 성능 검증이 미흡하다는 점은 상용화를 저해하는 요소가 된다. 이를 해결하기 위한 성능 평가 방안은 크게 세 가지 목표를 달성하도록 고안해야 한다. 첫 번째는 DPS 입력측 계통 전압의 품질에 따른 DPS의 강건성과 DC Link 출력 품질을 검증하는 것이고, 두 번째는 계통 주전원의 사고 발생 시 정상적인 이중화 전환 작동 또는 백업 전원의 전환 작동으로 데이터센터 IT 부하 기기의 무정전 운전이라는 역할적인 측면에서의 성능을 보장하는지를 검증하는 것이다. 마지막 세 번째는 기존의 AC UPS를 사용한 AC 전력전송 방식과 비교하여, 새로운 DC DPS를 사용한 DC 전력전송 방식의 에너지 효율 절감 효과에 대해 검증하는 것이다. 상기 세 가지 목표에 따라 본 논문에서는 표 2와 같이, DC DPS용 성능 평가 항목을 “입력 공급 호환성, 입력 전류, 출력 응답특성” 세 가지 범주로 분류하고, 하위 13개의 시험항목을 제안한다. 먼저, 입력 공급 호환성은 “DPS 제조사에서 제시한 입력 전압 및 주파수”의 허용 범위 안에서 계통모의장치를 이용하여 가변 하였을 때, DPS가 정상적으로 배터리 백업 장치를 충전함과 동시에 부하에 정제된 DC 전력을 공급하는지를 확인하는 시험이다. 본 시험은 무부하와 부하상태에

서 모두 수행하며, DC 전자부하장치를 이용하여, 0 / 25 / 50 / 75 / 100% 조건에서 각각 수행한다.

다음으로, 입력측 전류와 관련하여, “돌입전류, 부하분담, 왜형률, 역률” 시험을 제안한다. 여기서, 돌입전류 시험은 DPS에 초기 전원 투입시 또는 전력용 반도체 스위칭이 시작되는 시점에 발생할 수 있는 순시 과도성 과전류를 제한하는 기능이 정상적으로 작동하는지를 확인하는 시험이며, 계통 전압의 위상이나 영점위치에 따라 시험 결과가 달라질 수 있으므로 여러 번 반복 시험한다. 한편, 부하분담 시험은 DPS의 균등한 전력 배분 및 입력 전압의 삼상 평형을 검증하는 것이 목적이다. DPS는 내부 구조상 소용량의 AC-DC 컨버터 여러 대가 220V 단상 입력전원을 받아 병렬로 운전되기 때문에 균등한 부하분담이 매우 중요하다. 따라서, 이를 검증하기 위해 초기 삼상 평형상태의 실계통 전원 입력 조건으로 DPS를 가동하고, 이후 DC 전자부하장치를 이용하여 패턴 부하를 일정시간 걸어준다. 이때, 전력분석장치를 통해 AC/DC 컨버터의 부하 분담이 균등하게 이뤄지는지와 입력측 계통 전원의 삼상 평형이 유지되는지를 확인한다. 또한, 동일한 조건의 운전 중에 입력측 전류의 왜형률과 역률도 함께 측정한다.

마지막으로, 출력 응답특성과 관련하여, “효율, 계통외란, 부하, 과부하, 동적 성능, 배터리 동작시 출력/용량” 시험을 제안한다. 여기서, 효율 시험은 새로운 DC DPS를 사용한 DC 전력전송 방식의 에너지 효율 절감 효과를 검증하는 것이 목적이다. 기존의 AC UPS 방식은 그림 5와 같이, 구내 메인 수배전반에서부터 IT 부하에 이르기까지의 전력전송 과정으로 최소 6%에서 최대 21.5% 가량의 손실이 발생하지만, DC DPS 방식은 최소 1.5%에서 최대 4%의 손실만이 발생한다. 해당 자료는 통상적인 제품의 평균 사양을 토대로 상정한 것이므로, 제안한 효율 시험을 통해 각 컴퍼넌트의 입출력 전력을 측정 및 효율을 계산하여, 실제의 개선 효과를 검증할 필요가 있다.



[그림 5] 분산형 DPS 도입에 따른 효율 개선 기대효과 예시

한편, 계통외란 시험은 계통모의장치를 이용한 DPS의 입력 전압 및 주파수 허용범위 안에서의 외란(sag, swell, interruption, harmonic, phase unbalancing 등)을 모의하여, DC Link 출력 전압의 노이즈, 오프셋 등의 출력 품질을 검증하고, 허용범위 밖에서의 외란을 모의할 때에는 이중화 전원의 정상 작동과 배터리 백업 전력 전환의 정상 작동을 모두 검증한다. 또한, 배터리 백업 전력으로 전환되고 복구되는 과정에서, 표 1에 제시한 “동적성능, 배터리 동작시 출력 품질, 방전 가능 용량”을 함께 검증한다. 본 시험은 무부하와 부하상태에서 모두 수행하며, DC 전자부하장치를 이용하여, 25 / 50 / 75 / 100% 조건에서 각각 수행한다. 한편, 부하 시험은 서서히 부하를 증감하는 램프조건과 계단형식으로 증감하는 급변조건, 그리고 임의의 가혹하게 운영되는 IT 부하기기의 소비전력 패턴조건으로 일정 시간 운전하였을 때, DPS의 강건성과 정상 작동 여부를 검증한다.

[표 2] 분산형 DC DPS의 성능 시험평가 항목(안)

분류	시험 항목
입력 공급 호환성	입력 전압 허용차
	입력 주파수 허용차
입력 전류	돌입전류
	부하분담
	왜형률
	역률
출력 응답특성	효율
	계통외란
	부하 (램프, 급변, 패턴)
	과부하 (정격의 110%)
	동적 성능 - 출력 모드 전환
	배터리 동작시 출력
	배터리 동작시 용량 (방전)

5. 결 론

본 논문에서는 국내에서 DC DPS의 성능 검증이 전무한 문제점을 해결하기 위하여, 데이터 센터용 DC DPS의 운용 특성을 제시하고, 기존의 중앙집중형 AC UPS의 성능 평가에 대한 사례분석을 수행한다. 또한, 이를 바탕으로, 입력공급 호환성, 입력전류, 출력응답특성 등 시험항목으로 구성된 DC DPS용 성능 평가 방안을 제안하여, 향후 DC DPS의 도입에 따른 성능 평가 기준에 대한 발판을 마련하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090), (No.20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

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