

AI 데이터센터용 분산형 DC UPS의 출력 전압 안정화 평가방안에 관한 연구

박찬욱*, 이민행*, 송두리*, 김혜원*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: qkrcksnr@koreatech.ac.kr

A Study on Stability Evaluation Method for Output Voltage of Distributed DC UPS in AI Data Center

Chan-Wook Park*, Min-Haeng Lee*, Doo-Ri Song*, Hye-Won Kim*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, IT 산업의 발전으로 급격하게 증가하는 데이터센터는 단일 시설 중에서 가장 많은 전력을 소비하고 있어, 효율 개선에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 효율 저하와 사고 과급 위험성이 높은 기존 중앙집중형 AC UPS를 대체하기 위하여, 랙 단위의 분산형 DC UPS가 도입되고 있다. 하지만, 분산형 DC UPS는 AI 서버의 급격한 부하 변동 특성으로 인해, 출력전압의 안정성 확보가 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 슈퍼캐프을 고려한 DC UPS의 출력전압 보상방안을 제시하고, 이에 따른 분산형 DC UPS의 출력 전압 안정성 평가방안을 수행하기 위하여, 슈퍼캐프 기반 보상 구조를 반영한 수학적 모델링과 시험장치 구성방안을 제안한다. 여기서, 수학적 모델링은 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC 기반 해석에 적용하기 위하여, DC 버스 전압, AI 서버 부하 전류, 슈퍼캐프 보상부 등의 관계식으로 구성한다. 또한, 시험장치는 100[μ s] 이하의 고속 부하 변동을 모의하기 위하여, AC 전원부, PSU부, 슈퍼캐프 보상부, 계측장치부, DC 전자부 등으로 구성하고, 상정 시나리오는 정부하, step 부하, pulse 부하, 실측 모사 부하로 분류한다. 한편, 평가 항목은 슈퍼캐프 기반 능동형 보상 구조의 적용 전과 후를 비교하기 위하여, 최대 전압 변동폭, 전압 회복 시간, 최대 보상전류, 보상 전류 응답 시간, 출력전압 변동 저감 효과, 등으로 산정한다.

1. 서론

최근, AI 산업의 확대로 데이터센터의 랙당 전력밀도가 급증함에 따라, 전력 변환 손실과 사고 과급 위험이 높은 기존 중앙집중형 AC UPS 구조의 한계가 대두되고 있다. 이에 대한 대안으로, 해외 주요 데이터센터 기업들은 에너지 효율과 계통 안정성을 개선할 수 있는 랙 단위 분산형 DC UPS 구조로의 전환을 추진하고 있다. 하지만, 분산형 DC UPS의 50[V] 출력단에서는 AI 서버의 급격한 부하 변동 특성으로 인해 출력전압 안정성이 저하될 수 있다. 또한, AI 학습 부하는 기존 클라우드 서버 부하와 달리 다수의 GPU가 동기화된 상태로 동일한 연산을 수행하므로, 랙 단위에서 밀리초 단위의 전력 급변이 반복적으로 발생한다. 이때, 부하전류의 변화 속도가 DC UPS 정류기의 응답 범위를 초과하는 구간에서는, 출력단 커패시터가 부족 전류를 공급하거나 잉여 전류를 흡수하므로, 50[V] 버스 전압이 저하와 상승을 반복한다. 이러한 전압 변동은 서버의 정상 동작을 저해할 수 있으므로, 이를 완화하기 위한 보상 방안이 요구된다.

한편, 슈퍼캐프은 높은 출력밀도와 빠른 충방전 특성을 가지므로,

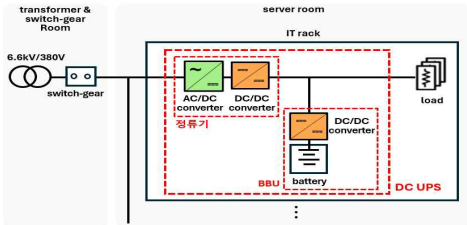
밀리초 단위 급변에 대응하는 에너지 저장 요소로 적정하다. 따라서, 본 논문에서는 분산형 DC UPS의 50[V] 출력전압 안정성을 평가하고, 슈퍼캐프 기반 능동형 보상 구조의 적용 가능성을 검토하기 위한 평가 방안을 제시한다. 이를 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC 기반 해석에 적용 가능한 분산형 DC UPS와 슈퍼캐프 보상부의 수식적 모델링과 이를 반영한 시험장치 및 평가 시나리오를 함께 제시한다.

2. AI 데이터센터용 분산형 DC UPS의 운용특성

2.1 분산형 DC UPS의 구성

분산형 DC UPS는 그림 1과 같이, 기존 AC UPS와 다르게 서버실 내부에서 단일 전력변환 과정(AC→DC)에 의하여 IT 부하에 DC 전력을 직접 공급하는 구조로, IT 랙 단위에 정류기(AC/DC 컨버터)와 BBU 등으로 구성된다. 여기서, 정류기는 상위 AC 전원을 50[V]급 DC로 변환하여 랙 내 공통 버스바를 통해 부하에 공급하며, BBU는 계통 사고 시 정류기로부터 절체되어 부하에 연속적인 전원을 공급한다. 즉, 분산형 DC UPS는 전

력 변환 단계의 단순화 및 효율화, 랙 단위 독립 운용, 모듈 단위의 확장성 등을 통하여 AI 데이터센터 환경에 적합한 대안으로 평가된다. 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

2.2 AI 데이터센터의 부하 특성

클라우드 서버 부하는 다수의 서버가 서로 다른 작업을 비동기로 수행함에 따라, 랙 단위에서 개별 서버의 부하 변동이 상호 상쇄되어, 전체 전력 소비가 평균화되는 특성을 나타낸다. 하지만, AI 부하는 다수의 GPU가 동일한 연산을 동기화된 상태로 수행함에 따라, 개별 GPU의 전력 변동이 상쇄되지 않고 랙 단위에서 중첩되는 특성을 가진다. 즉, AI 학습 부하는 표 1과 같이, 기존 클라우드 서버 부하의 점진적 변동과 달리 수백 μs ~ 수 ms 로 최대 전력 대비 60~90[%] 수준의 급격한 전력 변동 특성을 나타낸다. 또한, AI 학습 부하는 연산 동작 중 소비 전력이 일정하게 유지되는 정전력 부하(constant power load, CPL) 특성을 가지므로, 버스 전압이 저하되는 구간에서 소비전류가 증가하여 전압 변동이 확대될 가능성이 있다.

[표 1] 클라우드 서버 부하와 AI 학습 부하의 비교

항목	클라우드 서버 부하	AI 학습 부하
동작 방식	비동기 (서버 독립 동작)	동기화 (다수 GPU 동시 전환)
전력 변동 양상	개별 변동이 상쇄되어 평균화	개별 변동이 랙 단위에서 중첩
변동 주기	초 단위 이상 (점진적)	수백 μs ~ 수 ms (급격)
변동 폭	랙 단위 평균화로 안정적	최대 전력 대비 60~90[%]
전원공급장치 응답	정상 운전 응답 범위 이내	정상 운전 응답 범위 초과 가능

2.3 AI 데이터센터용 분산형 DC UPS의 출력전압 변동 특성

DC UPS 정류기의 PFC(power factor correction) 단은 AC 입력의 2차 고조파 리플 영향을 최소화하기 위하여, 외부 전압 제어 루프의 대역폭을 20[Hz] 미만으로 설계한다. 이에 따라, 부하 급변에 대한 정류기의 AC 입력 전류 응답에 수십 ms 수준의 지연이 발생한다. 이러한 응답 지연 구간에서 부하전류가 급증하는 경우, 정류기가 부족 전류를 즉시 공급하지 못하므로, 출력단 커패시터가 저장된 전하를 방출하여 부족분을 공급하고, 이 과정에서 DC 링크 전압(50[V])이 저하된다. 하지만, 부하전류가 급격하게 감소하는 경우, 잉여 전류가 커패시터에 유입되고, 버스 전압의 일시적인 상승을 발생시킨다. 즉, 전압 변동의 크기는 부하 전류의 변화량과 출력단 커패시터의 정전용량에 의하여 결정된

다. 즉, 반복적인 변동은 IT 부하의 장기 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, AI 데이터센터용 분산형 DC UPS는 표 2와 같이, 정상 상태 외에도 부하 급변 구간의 최대 전압 변동폭, 회복 특성, 반복 변동 구간의 전압 유지 능력, 등을 요구함을 알 수 있다.

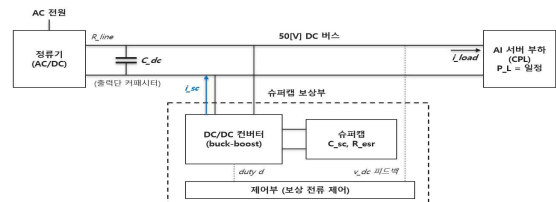
[표 2] AI 부하에 따른 분산형 DC UPS의 출력전압 평가기준

항목	평가 기준
정상상태 전압 유지	정격 출력전압을 허용범위 내에서 유지
최대 전압강하폭	부하 급증 시 허용범위 이내
최대 전압상승폭	부하 급감 시 허용범위 이내
회복 시간	과대상태 발생 후 규정시간 이내 회복
부하 변동 대응 능력	반복 부하변동 시에도 안정적 전압유지

3. AI 데이터센터용 분산형 DC UPS의 출력전압 안정화 방안

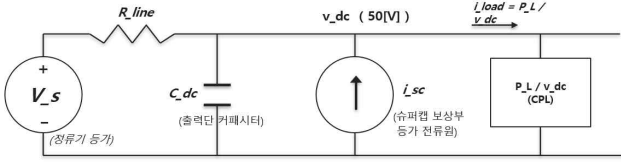
3.1 DC UPS의 출력전압 보상방안

DC 출력단에서 발생하는 전압 변동을 완화하기 위하여, 정류기의 응답 지연 구간에서 부족 전류를 즉각적으로 공급하고, 잉여 전류를 흡수할 수 있는 에너지 저장 방식이 요구된다. 여기서, 슈퍼캡은 높은 출력밀도, 빠른 충·방전 특성, 긴 반복 수명을 가지므로, 반복 급변 부하 조건의 보상 수단으로 적합하다. 따라서, 부하 변동 구간에서 필요한 방향과 크기의 보상 전류를 공급할 수 있도록, 그림 2와 같이 슈퍼캡과 50[V] 버스 사이에 양방향 DC/DC 컨버터를 적용한 능동형 보상 구조로 결정한다.



[그림 2] 슈퍼캡 기반 능동형 출력전압 보상 구조

한편, 상기의 구조를 해석하기 위하여, 등가회로도를 나타내면 그림 3과 같다. 먼저, 정류기는 전압원 V_s 와 선로 저항 R_{line} 의 직렬 구조이고, 출력단 커패시터(C_{dc})와 슈퍼캡 보상부는 50[V] 버스에 병렬로 연결된다. 여기서, 슈퍼캡 보상부는 제어할 수 있는 등가 전류원(I_{sc})으로 나타내고, I_{sc} 의 양의 방향은 버스로 유입되는 것으로 상정한다. 또한, 부하는 정전력부하(constant power load, CPL)로, 부하 전류(i_{load})는 P_L/V_{dc} 로 나타내고, 제어부는 50[V] 버스 전압의 정격 값과 측정 값의 편차를 검출하고, 이를 반영하여 I_{sc} 의 지령 값을 산출하며, 양방향 DC/DC 컨버터는 이 지령에 따라 I_{sc} 의 크기와 방향을 제어한다. 또한, 제어부는 전압 편차를 검출하여 슈퍼캡에서 50[V] 버스 방향으로 I_{sc} 를 공급한다. 즉, 보상부가 부하 전류의 급변분을 분담하게 되고, 정류기 측 전류 변화율과 선로 전압 강하가 완화되므로 출력단 전압 V_{dc} 의 저하가 억제될 수 있다.



[그림 3] 분산형 DC UPS 출력단의 보상회로 등가 구성

3.2 DC UPS의 파라미터 정의

DC UPS의 정류기는 출력전압 V_s 를 가지는 등가 전원으로 나타내고, 정류기와 50[V] DC 버스 사이의 배선 저항을 R_{line} 으로 정의한다. 또한, 50[V] DC 버스에 병렬로 연결되는 출력단 커패시터의 정전용량을 C_{dc} 로 정의하며, 슈퍼캐프의 정전용량과 직렬 등가저항을 각각 C_{sc} 와 R_{esr} 로 정의한다. 한편, 양방향 DC/DC 컨버터의 인덕턴스를 L_{conv} 로 정의하고, AI 서버 부하의 소비 전력을 P_L 로 정의한다. 상기의 주요 파라미터와 공칭 값은 표 3과 같다.

[표 3] DC UPS의 파라미터 정의

구분	기호	공칭 값
정류기 등가 출력 전압	V_s	50 [V]
DC 버스 배선 저항	R_{line}	10 ~ 50 [mΩ]
출력단 커패시터	C_{dc}	2 ~ 10 [mF]
슈퍼캐프 정전용량	C_{sc}	10 ~ 100 [F]
슈퍼캐프 등가저항	R_{esr}	5 ~ 20 [mΩ]
보상부 인덕턴스	L_{conv}	50 ~ 200 [μH]
AI 서버 부하 전력	P_L	0 ~ 15 [kW]

3.3. 분산형 DC UPS의 수학적 모델링

3.3.1 DC 버스 전압 관계식

분산형 DC UPS의 50[V] DC 버스 노드에는 정류기로부터 공급되는 전류, 슈퍼캐프 보상부로부터 공급되는 보상 전류, AI 서버 부하에 의한 소비 전류가 동시에 흐르며, 버스에 병렬 연결된 출력단 커패시터가 각 전류의 불균형을 흡수하는 역할을 수행한다. 이러한 노드에 키르히호프의 전류법칙을 적용하고, 정류기와 DC 버스 사이의 배선 저항에 의한 전압 강하를 함께 고려하면, 50[V] DC 버스 전압과 각 전류의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{DC} \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{V_s - V_{dc}(t)}{R_{line}} + i_{sc}(t) - i_{load}(t) \quad (1)$$

여기서, $V_{dc}(t)$: 50[V] DC 버스 전압, C_{dc} : 출력단 커패시터의 정전용량, V_s : 정류기의 등가 출력전압, R_{line} : 정류기와 DC 버스 사이의 배선 저항, $i_{sc}(t)$: 슈퍼캐프 보상부에서 공급되는 보상 전류, $i_{load}(t)$: AI 서버 부하에서 소비되는 전류

3.3.2 AI 서버 부하 전류 관계식

AI 서버 부하는 연산 동작 중 GPU의 내부 전압 레귤레이터가 공급 전압의 변동에 대응하여 입력 전류를 조정하므로, 50[V] DC 버스 측에서 관측되는 소비 전력은 일정한 값을 유지하는 정전력 부하(constant power load, CPL) 특성을 나타낸다. 또한,

AI 서버 부하에서 소비되는 전류는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, AI 서버 부하의 소비 전류는 소비 전력이 비례하고 DC 버스 전압에 반비례한다. 또한, 부하 급변에 의하여 DC 버스 전압이 저하되는 구간에서는 부하 소비 전류가 증가하며, 이는 식 (1)의 관계에 따라 출력단 커패시터의 추가적인 방전 요인으로 적용한다.

$$i_{load}(t) = \frac{P_L}{V_{dc}(t)} \quad (2)$$

여기서, P_L : AI 서버 부하의 소비 전력

3.3.3 슈퍼캐프 보상부 관계식

슈퍼캐프 보상부는 슈퍼캐프와 양방향 DC/DC 컨버터로 구성되며, 슈퍼캐프는 충방전 과정에서 단자 전압이 저장된 전하량에 비례하여 변화하는 특성을 가진다. 즉, 슈퍼캐프에서 50[V] DC 버스 방향으로 보상 전류가 공급되는 방전 구간에서는 슈퍼캐프의 단자 전압이 감소하고, 반대로 DC 버스로부터 슈퍼캐프에 전류가 유입되는 충전 구간에서는 슈퍼캐프의 단자 전압이 증가한다. 이러한 슈퍼캐프의 단자 전압과 보상 전류의 관계는 직렬 등가저항을 고려한 등가 모델에 의해 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{sc} \frac{dV_{sc}(t)}{dt} = -i_{sc}(t) \quad (3)$$

여기서, $V_{sc}(t)$: 슈퍼캐프의 단자 전압, C_{sc} : 슈퍼캐프의 정전용량

한편, 슈퍼캐프와 50[V] DC 버스 사이에는 양방향 DC/DC 컨버터가 배치되어 보상 전류의 방향과 크기를 조정하며, 컨버터 내부의 인덕터 전류와 양단 전압의 관계는 buck-boost 평균 모델에 의해 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)에서 보상 전류의 시간 변화는 슈퍼캐프 단자 전압과 DC 버스 전압의 차이, 그리고 직렬 등가저항에 의한 전압 강하에 의해 결정된다. 즉, 컨버터의 평균 듀티비의 조정을 통하여 보상 전류의 방향과 크기를 제어할 수 있다. 따라서, 식 (1)~(4)는 분산형 DC UPS의 50[V] 출력단 전압 변동 특성을 해석하기 위한 기본 관계식이며, AI 서버 부하의 급변 조건에서의 50[V] DC 버스 전압 변동과 슈퍼캐프 보상부의 응답 특성을 정량적으로 해석하기 위한 근거로 적용된다.

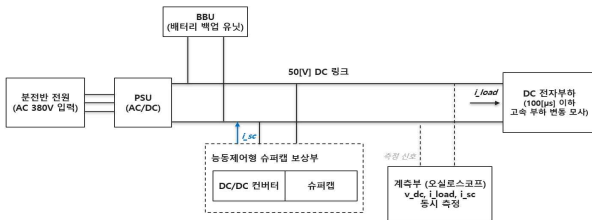
$$L_{conv} \frac{di_{sc}(t)}{dt} = d \cdot V_{sc}(t) - V_{dc}(t) - R_{esr} \cdot i_{dc}(t) \quad (4)$$

여기서, L_{conv} : 양방향 DC/DC 컨버터의 인덕턴스, d : 컨버터의 평균 듀티비, R_{esr} : 슈퍼캐프의 직렬 등가저항

5. AI 데이터센터용 분산형 DC UPS의 시험장치 구성방안

5.1 시험장치의 구성

AI 데이터센터용 분산형 DC UPS의 시험장치 구성도를 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 시험장치는 분전반 전원, PSU(power supply unit), BBU(battery back-up unit), DC 전자부하, 능동 제어형 슈퍼캡 보상부, 계측부, 등으로 구성된다. 여기서, 분전반 전원은 PSU에 AC 입력 전력을 공급하며, PSU는 DC 링크에 전원을 공급한다. 또한, BBU는 50[V] DC 링크에 병렬로 연결되어 계통 사고 시 부하에 연속적인 전원을 공급한다. 한편, DC 전자부하는 AI 서버 부하의 급변 특성을 재현하기 위한 구성 요소이며, 기존 연구의 실측 파형을 재현할 수 있도록 100[μs] 이하의 고속 부하 변동 모사와 임의 부하 패턴 설정이 가능한 사양으로 산정한다. 한편, 능동제어형 슈퍼캡 보상부는 슈퍼캡과 양방향 buck-boost 컨버터로 구성되는 보상 시스템으로, 50[V] DC 링크에 병렬로 연결된다. 또한, 계측장치는 50[V] 출력 전압, 부하 전류, 보상 전류를 동일 시간축에서 동시 측정가능하도록 설계한다. 따라서, 시험장치는 능동제어형 슈퍼캡 보상부의 적용 전후를 동일 조건에서 비교 평가할 수 있는 구성 방안으로 제시된다.



[그림 4] DC UPS 시험장치의 구성

5.2 상정 시나리오에 따른 분산형 DC UPS의 평가 항목

상정 시나리오는 표 4와 같이, 50[V] 출력단의 전압 변동 특성을 단계적으로 검토할 수 있도록 구성한다. 먼저, 정부하 시나리오는 정상 상태의 출력 전압과 기본 전류 공급 능력을 확인하는 조건이다. 또한, step 부하 시나리오는 순간적인 부하 증가와 감소를 인가하여 부하 급변 시의 최대 전압 저하와 회복 시간을 확인하는 조건이다. 한편, pulse 부하 시나리오는 저부하와 고부하가 ms 단위 주기로 반복되는 조건으로, 반복적인 부하 변동 구간에서의 전압 유지 범위를 확인한다. 이때, 반복 주기와 듀티 비율은 기존 연구에서 실측된 GPU 부하 파형의 특성을 반영하여 설정한다. 마지막으로, 실측 모사 부하 시나리오는 AI 서버 부하의 실측 파형으로부터 추출한 전류 특성을 DC 전자부하에 직접 인가하는 조건으로, 실제 AI 부하 운전 환경에 근접한 평가를 수행하기 위한 조건이다.

[표 4] 상정 시나리오

시나리오	부하 특성	내역
정부하	일정 전류 공급	정상 상태 기본 출력 특성 확인
step 부하	부하 단계적 증가·감소	최대 전압 저하·상승 및 회복 시간 확인
pulse 부하	저부하·고부하 주기적 반복	ms 단위 반복 변동 시 전압 유지 범위 확인
실측 모사 부하	실측 AI 파형 기반 전류	실제 AI 부하 환경 근접 평가

평가 항목은 표 5와 같이, 상정 시나리오를 바탕으로 50[V] 출력 전압의 최대 변동폭, 전압 회복 시간, 반복 부하 조건에서의 전압 유지 범위로 설정한다. 여기서, 최대 변동폭은 부하 급변 시 전원공급부가 허용할 수 있는 전압 저하·상승 수준을 나타내며, 전압 회복 시간은 출력 전압이 정격 범위로 회복되는 응답 특성을 나타낸다. 또한, 반복 부하 조건에서의 전압 유지 범위는 AI 부하 운전 환경에서 전원공급부가 안정적으로 동작할 수 있는지를 판단하는 기준이 된다. 한편, 능동제어형 슈퍼캡 보상부를 적용하는 경우에는 동일한 시나리오에서 보상 전류의 최대 값, 보상 전류의 응답 시간, 그리고 출력 전압 변동 저감 효과를 추가 평가 항목으로 설정하며, 보상부 적용 전과 적용 후의 평가 결과를 비교하여 제안된 보상 구조의 유효성을 검증하는 방안으로 제시된다.

[표 5] 평가 항목

평가 항목	내역
최대 전압 변동폭	부하 급변 시 50[V] 출력전압의 최대 저하 및 상승 폭을 평가
전압 회복 시간	출력전압이 정격 허용범위로 복귀하는 데 소요되는 시간을 평가
반복 부하 조건에서의 전압 유지 범위	AI 부하의 반복 변동 조건에서 출력전압이 안정적으로 유지되는 범위를 평가
최대 보상 전류	능동제어형 슈퍼캡 보상부가 공급 또는 흡수하는 최대 보상전류를 평가
보상 전류 응답 시간	부하 변동 발생 시 보상부가 보상전류를 출력하기까지의 응답속도를 평가
출력전압 변동 저감 효과	보상부 적용 전후의 출력전압 변동폭을 비교하여 전압 안정화 효과를 평가

6. 결론

본 논문은 AI 데이터센터용 분산형 DC UPS를 대상으로, 출력 전압의 안정성 평가를 수행하기 위한 수학적 모델링과 시험장치의 구성 방안을 제시한다. 향후 제시한 수학적 모델링 방안과 시험장치 구성 방안에 따른 유효성을 검증할 계획이다.

참고문헌

- [1] 박찬욱, 이민행, 김윤호, 장형안, 이명근, 노대석, “데이터센터용 분산형 DC UPS의 운용특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 27, No. 1, pp. 1209–1220, 2026.