

UPS DC 전원 안전 사고 분석: 유지보수 과정의 화재 및 폭발 전기적 위험 메커니즘 심층 분석 연구 (A Deep Analytical Study on Electrical Hazard Mechanisms in UPS DC Power System Maintenance)

Smartspace KDM, jaysys@smartspace.co.kr

1. 개요 및 직류 시스템 안전 위험의 특수성: 화재 및 폭발의 두 가지 근본 전기적 원인 분석

이 보고서는 무정전 전원 공급 장치(UPS) 및 대규모 배터리 에너지 저장 시스템(BESS)과 같은 고전류 직류(DC) 전원 시스템의 유지보수 과정에서 발생하는 화재 및 폭발을 유발하는 두 가지 핵심적인 전기적 근본 원인에 대한 심층적인 기술적 분석을 제공한다.

배터리 시스템에서 화재를 발생시킬 수 있는 근본 원인은 셀 제조 결함, 열 폭주 관리 시스템(BMS) 오류, 과충전 상태 등 다양하다. 그러나 본 연구는 그중에서도 시스템의 운영 및 유지보수 과정에서의 전기적 오작동 및 인적 부주의에 의해 직접적으로 발생하는 두 가지 치명적인 위험 메커니즘에 초점을 맞춘다.

본 보고서가 심도 있게 분석하는 두 가지 근본 원인은 다음과 같다:

1. 직류 전원 케이블 분리 트랜지언트: 전원이 완전히 차단되지 않은 상태에서 케이블을 분리할 때 발생하는 **급격한 고전압 서지(유도성 역기전력)**가 시스템의 절연을 파괴하고 장기적인 전기적 화재 위험을 초래하는 메커니즘에 대한 분석.
2. 부적절한 도구 사용으로 인한 단락: 배터리 터미널 작업 시 절연되지 않은 도구 사용으로 인해 초저 임피던스 단락이 발생하고, 이로 인해 치명적인 직류 아크 플래시 및 배터리 열 폭주 폭발을 촉발하는 메커니즘에 대한 분석.

분석 범위는 데이터 센터, 산업 시설, 유틸리티 규모 BESS에 일반적으로 사용되는 48V DC를 초과하는 시스템, 특히 100V DC에서 1500V DC 범위의 고전압/고전류 DC 회로에 초점을 맞춘다.

직류 시스템의 전기적 위험은 교류(AC) 시스템의 위험과는 근본적으로 다른 특성을 지닌다. AC

회로에서는 전류가 주기적으로 영점(Zero Crossing)을 통과하며, 이 특성이 자연적인 아크 소호 메커니즘을 제공한다. 그러나 DC 시스템에서는 이러한 전류 영점 통과가 없기 때문에¹, 일단 아크가 점화되면 보호 장치가 물리적으로 회로를 차단할 때까지 아크가

지속적으로 유지되는 경향이 있다.¹ 이러한 지속성은 동일한 전압 및 전류 조건에서 AC 시스템보다 DC 시스템이 훨씬 더 많은 치명적인 사고 에너지(Incident Energy)를 방출할 수 있음을 의미한다.

이 두 가지 위험은 시설 관리자와 안전 규정 준수 책임자가 반드시 이해하고 완화해야 하는, 유지보수 단계에서 발생하는 가장 치명적인 전기적 발화 근본 원인이다.

2. 직류 전원 케이블 분리 시 스파크 및 절연 파괴 메커니즘 (Failure Mode 1: Sparking and Insulation Breakdown)

2.1. 직류 회로 내 트랜지언트 현상의 전기 물리학적 원리

직류 전원 케이블을 부하가 걸린 상태에서 분리하거나, 전류가 흐르는 회로를 차단할 때 발생하는 스파크와 그에 수반되는 고전압 트랜지언트는 유도성 역기전력(Inductive Kickback) 현상에 의해 발생한다. UPS 및 BESS 시스템은 배터리 스트링 자체 외에도 인버터, 정류기, 대형 필터 코일, 긴 케이블 루프 등 상당한 유도성(L) 요소를 포함하고 있다.

인덕터 방정식은 유도 전압(v)이 인덕턴스(L)와 전류의 시간 변화율($\frac{di}{dt}$)에 비례함을 명확히 보여준다: $v = L \frac{di}{dt}$.²

고전류 DC 회로의 연결 지점(예: 케이블 터미널)을 물리적으로 분리할 때, 흐르던 전류(i)는 매우 짧은 시간(dt) 내에 '0'으로 급격히 떨어진다. 이 때 $\frac{di}{dt}$ 는 극도로 큰 음의 값(또는 절댓값이 큰 값)을 갖게 되며, 이는 인덕터 양단에 회로 전압을 훨씬 초과하는 거대한 역방향 전압 스파이크(v)를 유도한다.⁴ 이 전압 스파이크는 제어되지 않을 경우 수천 볼트 수준에 도달할 수 있으며, 이러한 높은 전압은 잠재적으로

치명적인(LETHAL) 위험을 초래할 수 있다.⁵ 스파크 또는 아크는 사실상 인덕터가 저장된 자기장 에너지를 해방시키기 위해 절연체인 공기를 이온화시켜 일시적인 전도 경로를 만들어 전류를 지속시키려는 현상의 시각적 발현이다.⁴

이러한 분리 시 스파크는 배터리 연결 시 스파크와 구분되어야 한다. 연결 시 스파크는 주로 인버터/컨버터 입력단의 방전된 DC 필터 커패시터(Capacitive Inrush)가 급속도로 충전될 때

발생하는 돌입 전류에 기인하며⁶, 장비 손상의 위험은 있으나 분리 시 발생하는 유도성 역기전력만큼 치명적인 고전압 서지 위험을 내포하지는 않는다. 따라서 안전 절차는 단순한 돌입 전류 방지(연결 시)를 넘어, 유도성 부하의 에너지 방출을 제어하는 것(분리 시)에 중점을 두어야 한다.

2.2. 고전압 트랜지언트로 인한 절연 파괴 및 발화 위험의 근본 원인

분리 과정에서 발생하는 고전압 트랜지언트는 전기 시스템의 절연 재료에 심각한 유전체 스트레스(Dielectric Stress)를 가한다.⁸ 이러한 순간적인 전압 서지는 번개에 의한 외부 서지⁹ 또는 계통 스위칭 서지와 유사하게, 절연 시스템의 내압 한계를 초과하여 파괴를 유발할 수 있다.¹⁰

가장 심각한 결과는 절연 파괴 및 열화이다. 단 한 번의 고전압 서지 노출은 즉각적인 파괴를 일으키지 않더라도, 절연 재료 내부에 미세한 손상, 부분 방전(Partial Discharges, PD) 및 미세 균열을 야기하여 절연체의 수명을 비가역적으로 단축시킨다.¹⁰ 반복적인 서지 노출은 절연체의 전기적 강도를 점진적으로 저하시킨다.

또한, 스파크나 미세한 아크가 발생한 지점은 절연 재료 표면에 영구적인 탄소 경로(Carbon Tracking)를 형성할 수 있다. 이 탄소 경로는 정상 작동 중에도 누설 전류를 발생시키는 낮은 저항 경로가 되며, 이로 인한 국부적인 과열이 지속될 수 있다. 전원이 완전히 차단되지 않은 상태에서 케이블을 분리하여 발생한 절연 파괴는 결국 이러한 트래킹 경로에서의 지속적인 과열을 통해 주변의 가연성 케이블 재킷이나 배터리 케이스 등을 점화시켜 화재를 발생시킬 수 있는 직접적인 인과 관계를 형성한다. 따라서 안전하지 않은 분리 작업은 단기적인 위험뿐만 아니라 장기적인 시스템 신뢰성 저하와 화재 위험을 동시에 증대시키는 행위이다. 이는 전기적 화재의 근본 원인 중 하나로 작용한다.

3. 부적절한 장비 사용으로 인한 단락 및 직류 아크 플래시 위험 (Failure Mode 2: Short Circuit and DC Arc Flash)

3.1. 배터리 시스템의 고유한 단락 특성 및 아크 플래시 폭발 근본 원인

배터리 터미널과 같은 고전류 DC 시스템에서 절연되지 않은 도구(예: 일반 금속 렌치 또는

스패너)를 사용하여 작업하는 행위는 재앙적인 사고의 직접적인 원인이 된다. 이러한 도구는 양극과 음극 터미널 사이에 접촉하는 순간, 거의 0에 가까운 저항을 가진 초저 임피던스 단락 경로를 형성한다.

이 단락은 배터리 시스템이 공급할 수 있는 최대의 ****볼트 단락 전류 (Idc bolted)****를 순간적으로 발생시킨다. DC 시스템의 단락 전류 크기는 주로 직류 전압(Vdc)과 총 시스템 저항(Rtotal)에 의해 결정된다: $I_{dc\ bolted} = V_{dc} / R_{total}$.¹¹

대규모 UPS나 BESS에 사용되는 배터리 스트링은 낮은 내부 저항(Rbattery)을 갖도록 설계되어 있으며, 전체 시스템의 총 저항(Rtotal=Rbattery+Rconductor)은 매우 낮다. 예를 들어, 256V 시스템에서 총 저항이 0.01344Ω에 불과할 경우, 계산된 볼트 단락 전류는 $19,048\ \text{A}$ 에 달할 수 있다.[11, 12] 이러한 수십 킬로암페어(kA)의 고장 전류는 직류 아크 플래시 폭발의 직접적인 근본 원인이 된다.

3.2. 직류 아크 플래시의 메커니즘 및 치명적인 지속성

DC 아크 플래시의 위험은 그 지속적인 특성 때문에 AC 아크보다 더 예측하기 어렵고 치명적이다. 단락이 발생한 후, 비절연 도구가 터미널에서 분리되는 순간, 공기가 이온화되면서 아크가 점화된다. DC 전류에는 영점 통과가 없기 때문에¹, 일단 점화된 아크는 보호 장치(예: 고속 퓨즈나 차단기)가 물리적으로 전류 흐름을 차단하기 전까지 계속 유지된다.¹

아크 플래시에서 방출되는 총 에너지(Earc)는 아크 전력(Parc)과 아크 지속 시간(tarc)에 의해 직접적으로 결정된다 ($E_{arc} = P_{arc} \times t_{arc}$).¹¹ 만약 보호 장치가 느리거나 작동하지 않는 경우, NFPA 70E 표준은 작업자가 위험 상황에서 몸을 피하는 데 걸리는 반응 시간(Reaction Time)을 기반으로 최대

2초의 아크 지속 시간을 적용할 것을 권장한다.¹¹ 고전류 조건에서 이 2초의 지속 시간은 사고 에너지를 엄청나게 증가시켜 작업자에게 치명적인 2도 또는 3도 화상을 입힐 수 있다.

아크 플래시는 고온 플라즈마(17,000K)에서 발생하는 복사열(Flash)뿐만 아니라, 도체와 주변 공기가 급격히 가열되면서 발생하는 초음속 충격파인 ****아크 블라스트(Arc Blast)****를 동반한다.¹³ 아크 블라스트는 용융된 금속 파편이나 장비 파편을 고속으로 비산시키며 심각한 물리적 외상을 유발한다. 개인 보호 장비(PPE)는 복사열로부터 작업자를 보호할 수 있지만, 아크 블라스트의 물리적 충격파나 비산물에 대해서는 효과가 제한적일 수 있다.¹³

3.3. 부적절한 도구로 인한 2차 위험: 배터리 열 폭주(Thermal Runaway)로의 전이

수 킬로암페어의 단락 전류가 비절연 도구를 통해 흐르는 순간, 도구의 자체 저항에서 발생하는 I^2R 열 손실은 막대한 에너지를 방출한다.¹⁴ 이 엄청난 열은 도구를 즉시 용융시키거나 심지어 기화시켜 아크를 더욱 격렬하게 만들고, 용융 금속의 비산(Molten Metal Spray)을 유발하여 작업자에게 직접적인 열 및 화학적 화상을 입힐 수 있다.

더욱 심각한 근본적인 화재/폭발 위험은 리튬 이온(Li-ion) 배터리를 사용하는 UPS/BESS 시스템에서 발생한다. 외부의 극심한 전기적 단락(Short Circuit)은 배터리 셀 내부에 심각한 ****내부 단락(Internal Short Circuit, ISC)****을 유발할 수 있으며¹⁶, 이로 인한 급격한 온도 상승 및 저항 변화는 배터리 ****열 폭주(Thermal Runaway, TR)****를 촉발할 수 있다.¹⁷

열 폭주가 발생하면 배터리는 폭발적인 화학적 반응을 일으키며 연기가 아닌 화염과 폭발을 동반한다.¹⁸ 최근 SK C&C 판교와 같은 대규모 데이터 센터 화재 사고 사례는 배터리실의 발화가 전체 시설을 마비시키는 대규모 재난으로 확대될 수 있음을 명확하게 보여주며²⁰, 이는 DC 단락 사고가 단순한 전기적 사고를 넘어선

위험 전이(Hazard Transition) 현상임을 증명한다.

결론적으로, 이 두 번째 근본 원인은 단순한 전기적 사고가 아니라, 배터리의 초저 임피던스로 인한 ****초기 볼트 단락 전류의 크기($I_{dc\ bolted}$)****와 ****아크 지속 시간(t_{arc})****이 복합적으로 작용하여 열 폭주 및 대형 폭발/화재를 유발하는 치명적인 경로이다.²¹

4. 직류 아크 플래시 위험 정량적 평가 및 보호 조치

4.1. 직류 아크 플래시 계산 방법론 및 NFPA 70E 적용

직류 아크 플래시 위험 평가는 NFPA 70E (Standard for Electrical Safety in the Workplace)를 핵심 기준으로 삼는다.¹⁸ 기존 IEEE 1584 표준은 AC 시스템에 중점을 두었기 때문에¹, NFPA 70E는 보수적인 이론적 및 경험적 모델을 기반으로 DC 아크 플래시 위험을 평가하도록 요구한다.²²

정확한 DC 아크 사고 에너지를 산정하기 위해서는 고유한 계산 절차가 필요하다. DC 아크는 AC와 달리 아크 저항(R_{arc})이 아크 전류($I_{dc\ arc}$)에 따라 비선형적으로 변동한다. 따라서 엔지니어링 계산은 볼트 단락 전류($I_{dc\ bolted}$)를 먼저 계산한 후, 이를 기반으로 아크 전류를 추정하고, 아크 저항을 계산하는 과정을 반복하여 두 값이 수렴할 때까지 진행되는 반복적

계산(**Iterative Solution**) 모델을 사용해야 한다.¹¹ NFPA 70E 기반의 아크 사고 에너지(E_{arc}) 계산은 고장 전류(F)와 아크 지속 시간(t_A)에 크게 의존하는 경험적 공식에 기반한다.²⁴

DC 시스템의 사고 에너지를 결정하는 가장 중요한 변수는 **아크 지속 시간(t_{arc})**이다. 보호 장치(차단기 또는 퓨즈)의 개방 시간 성능에 따라 t_{arc} 가 결정되지만, 보호 장치가 느리거나 작동하지 않는 경우, NFPA 70E는 최악의 시나리오로 작업자의 탈출 반응 시간인 최대 2초를 t_{arc} 로 적용할 것을 권장한다.¹¹ 이러한 보수적인 시간 적용은 계산된 사고 에너지를 극도로 높게 만들어 고위험 시스템에서는 아크 플래시 경계와 PPE 요구사항을 엄격하게 만든다.

4.2. 개인 보호 장비 (PPE) 요구 사항 및 선정 (NFPA 70E 기반)

NFPA 70E는 직류 시스템, 특히 저장 배터리 및 DC 스위치보드에 대해 특정 매개변수를 기반으로 PPE 범주를 할당하는 테이블(Table 130.7(C)(15)(b))을 제공한다.²¹ 이 테이블은 전압 범위, 가용 고장 전류, 그리고 최소 작업 거리를 고려하여 필요한 PPE 범주를 결정한다.

아래 표는 100V DC에서 250V DC 시스템에 대한 NFPA $70E$ 의 예시 기준을 요약한 것이다.

NFPA 70E 직류 시스템 아크 플래시 PPE 범주표 (100V~250V 예시)

장비 및 전압 범위 (Equipment/Voltage)	가용 고장 전류 (Available Fault Current)	최대 아크 지속 시간 (Max Arc Duration)	최소 작업 거리 (Minimum Working Distance)	PPE 범주 (Category)
저장 배터리, DC 스위치보드, $100V \leq V_{dc} \leq 250V$	4kA 미만	2 sec @ 455 m m (18 in.)	900 mm (3 ft)	2
저장 배터리, DC 스위치보드, $100V \leq V_{dc} \leq 250V$	$4kA \leq I_{sc} < 7kA$	2 sec @ 455 m m (18 in.)	1.2 m (4 ft)	2

저장 배터리, DC 스위치보드, $100V \leq V_{dc} \leq 250$ V	$7kA \leq I_{sc} < 15kA$	2 sec @ 455 m m (18 in.)	1.8 m (6 ft)	3
---	--------------------------	-----------------------------	--------------	---

출처: NFPA 70E Table 130.7(C)(15)(b) 요약 및 해석 ²¹

이러한 범주에 따라 작업자는 최소 아크 정격(Minimum Arc Rating)을 충족하는 아크 정격(Arc-Rated) 의류를 착용해야 한다. 특히 위험도가 12 cal/cm²를 초과하는 작업에서는 아크 정격 후드(Hood)의 단독 사용이 필수적이다.²⁵ 배터리 터미널 작업의 경우, 아크 플래시 위험뿐만 아니라 감전 위험도 존재하므로, 절연 고무 장갑과 가죽 보호대가 함께 사용되어야 한다.²⁶

이 테이블 방법은 특정 조건(주로 100V~250V, 15kA 미만)에서만 적용될 수 있다. 대규모 BESS와 같이 이보다 높은 전압이나 전류를 사용하는 시스템에서는 NFPA 70E 테이블을 사용할 수 없으므로 ²², 반드시 현장별

아크 플래시 엔지니어링 계산을 수행하여 정확한 위험도(cal/cm²)와 아크 플래시 경계를 결정해야 한다.¹¹

5. 완화 전략, 안전 설계 및 작업 절차

5.1. 위험 완화 전략 (Hazard 1: 트랜지언트 방지)

DC 케이블 분리 시 발생하는 고전압 트랜지언트로 인한 절연 파괴 위험을 완화하기 위한 전략은 설계 단계와 작업 절차 단계로 구분된다.

5.1.1. 설계 단계: 트랜지언트 제어

유도성 부하를 포함하는 회로에서 전류 차단 시 $\frac{di}{dt}$ 를 제한하기 위한 회로적 장치가 요구된다.

- 스너버 및 프리휠링 다이오드: 대형 솔레노이드나 모터 부하와 같은 유도성 컴포넌트에는 전류 차단 시 유도성 에너지를 흡수하고 $\frac{di}{dt}$ 를 낮추기 위해 병렬로 프리휠링 다이오드(Freewheeling Diode)나 RC 스너버 회로를 설치해야 한다.³
- 프리-차지/디스차지 회로: 인버터/컨버터 입력단에 대용량 커패시터가 있는 경우, 연결 시 돌입 전류를 제한하기 위한 프리-차징 저항 회로와, 분리 전 회로 잔류 전하를 안전하게 방전하기 위한 방전 회로를 구현해야 한다.²⁸

5.1.2. 작업 절차: 무부하 분리 순서 준수

가장 효과적인 완화책은 고전류 부하가 흐르지 않는 무부하 상태에서 회로를 분리하는 것이다. 작업자는 케이블 분리 전에 반드시 상위 DC 스위치 또는 차단기를 개방하여 회로를 완전히 무전압(De-energized) 상태로 만들고, 인덕턴스에 저장된 에너지가 소멸될 충분한 시간을 부여해야 한다.

5.2. 위험 완화 전략 (Hazard 2: 아크 플래시 및 단락 방지)

직류 아크 플래시 위험은 절연 도구 사용 의무화와 고속 보호 장치 채택을 통해 완화된다.

5.2.1. 무전압 확인 및 LOTO (Lockout/Tagout)

DC 시스템 작업의 시작은 무전압 상태의 확인에서 시작되어야 한다. 배터리 시스템은 전원이 꺼진 것처럼 보여도 배터리 전원 자체가 항상 활성화되어 있으므로, 반드시 적절한 전압 측정 장치를 사용하여 전압이 0인 상태를 확인한 후 잠금/표지(LOTO) 절차를 적용해야 한다. NFPA 70E 및 OSHA/KOSHA²⁹의 산업 안전 규정은 이러한 공식적인 작업 통제를 법적 의무로 규정한다.

5.2.2. 절연 도구 및 보호 장벽 사용 의무화

부적절한 도구 사용으로 인한 치명적인 단락 사고를 방지하기 위해, 모든 배터리 터미널 및 고전류 도체 작업에는 1000V 정격 이상의 절연 핸드 도구 사용이 절대적으로 요구된다. 이는 작업자의 실수로 인한 양극/음극 간 단락 발생 시, 도구 자체가 낮은 저항 경로가 되는 것을

방지하여 단락을 막는 최후의 물리적 방벽 역할을 수행한다. 또한, 작업 중 우발적인 접촉을 방지하기 위해 터미널 주변에 아크 정격 담요 또는 보호 커버를 설치하여 보호 장벽을 형성해야 한다.

5.2.3. 고속 차단 장치 적용

DC 아크의 지속성을 최소화하는 것이 사고 에너지를 줄이는 가장 효과적인 방법이므로, 고전류 DC 시스템에는 아크 지속 시간(tarc)을 최소화할 수 있는 고속 퓨즈 또는 고속 **DC** 차단기의 적용이 필수적이다.¹² 보호 장치의 응답 속도가 빠를수록 아크가 2초 동안 지속되는 최악의 시나리오를 피할 수 있다.

5.3. 실제 사고 사례 분석 및 제도적 교훈

대규모 시설에서 발생하는 DC 전기 사고는 종종 엄청난 규모의 재난으로 확대된다. 최근 국내외 데이터 센터에서 발생한 대형 화재 사고¹⁹는 배터리실에서 DC 단락이 발생하고 이로 인해 리튬 이온 배터리의 열 폭주가 촉발될 경우, 초기 전기적 위험이 물리적 폭발(Arc Blast) 및 화학적 재난으로 전이될 수 있음을 보여준다.

사고 조사 보고서에 따르면²⁹, 많은 산업 재해의 근본 원인은 전기 안전에 대한 법적 및 제도적 의무를 이행하지 않은 데 있다. 아크 플래시 엔지니어링 계산의 미실시, 위험 경고 라벨의 미부착, 그리고 절연 도구 사용을 포함한 공식적인 작업 통제 절차의 실패는 NFPA 70E의 요구 사항을 충족하지 못한 것으로 간주된다.⁸ 이러한 규정 준수 미비는 중대재해 발생 시 기업의 법적 리스크를 최대화하며, KOSHA 및 OSHA와 같은 규제 기관은 이러한 절차 미준수에 대한 명확한 책임을 묻고 있다.³⁰ 따라서 고위험 DC 작업 시 절연 도구 사용 실패 및 안전한 분리 절차 미준수는 단순한 절차 위반이 아니라

법적 의무 불이행에 해당한다.

6. 결론 및 최종 권고 사항

DC 고전류 시스템, 특히 UPS 및 BESS의 안전 관리는 AC 시스템 관리보다 훨씬 더 복잡하고 엄격한 접근 방식을 요구한다. 직류 시스템은 전류 영점 통과와 부재로 인해 아크가 지속되며,

낮은 내부 임피던스로 인해 발생 가능한 단락 전류가 극도로 높다는 이중 위험에 노출되어 있다.

본 분석을 통해 도출된 핵심 결론과 이를 바탕으로 한 최종 권고 사항은 다음과 같다:

1. 아크 플래시 엔지니어링 연구의 의무화: 대용량 **DC** 전원을 사용하는 모든 시설에 대해 **NFPA 70E** 표준을 기반으로 한 아크 플래시 엔지니어링 연구를 의무적으로 수행하고, 위험도(**cal/cm²**) 및 아크 플래시 경계가 명시된 경고 라벨을 해당 장비에 부착해야 한다. 특히 고전류 시스템(>**15kA**)의 경우, 반드시 반복적 계산 모델을 사용하여 정확한 사고 에너지를 산정해야 한다.
2. 엄격한 무전압 작업 통제 및 트랜지언트 관리: 모든 **DC** 전원 분리 및 연결 작업은 **LOTO** 및 무전압 확인 절차를 통해 전원이 완전히 차단된 상태에서 이루어져야 한다. 무부하 상태에서 회로를 차단함으로써 유도성 역기전력 트랜지언트 발생을 근본적으로 방지하고, 절연 파괴로 인한 화재 위험을 제거해야 한다.
3. 절연 등급 도구 및 고속 보호 장치 사용의 강제: 배터리 터미널 및 고전류 도체 작업 시에는 **1000V** 절연 등급 도구 사용을 절대적으로 강제해야 한다. 또한, 아크 지속 시간을 최소화하여 사고 에너지를 통제할 수 있도록 고속 **DC** 차단 장치를 적용하여 인적 및 물적 피해 위험을 최소화해야 한다.

참고 문헌 (References)

¹ Power Projects India, "DC Arc Flash,"

Power Projects India, (n.d.). URL: <https://powerprojectsindia.com/dc-arc-flash/> / URL: <https://www.kosha.or.kr/english/business/accidentInvestigation.do>

² (Formula derivation)

³ Willy McAllister, "Inductor kickback circuit,"

Spinning Numbers, (n.d.). URL: <https://spinningnumbers.org/a/inductor-kickback.html> / URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/99974/why-do-inductors-release-a-high-voltage-when-disconnected>

⁴ panic mode, "if at time t you have current I through inductor, then just after you turn off the switch...",

All About Circuits Forum, Mar 23, 2012. URL: <https://forum.allaboutcircuits.com/threads/inductor-v-l-di-dt.67860/> / URL: <https://forum.allaboutcircuits.com/threads/high-voltage-peaks-in-a-dc-voltage-supply-system.198039/>

⁵ Papabravo, "The magnitude of the voltage spike from an inductor is proportional to the inductance...",

All About Circuits Forum, (n.d.). URL:

<https://forum.allaboutcircuits.com/threads/high-voltage-peaks-in-a-dc-voltage-supply-system.198039/>

⁶ MWink64, "Yes. Unless you start to smell something burning, it's completely normal,"

Reddit: r/batteries, 1 yr. ago. URL:

https://www.reddit.com/r/batteries/comments/1ey8wof/spark_when_installing_new_ups_battery_is_that/

⁷ SkiBleu, "It really depends on the model, most APC UPSs are designed to be hot swapped and it prevents the DC filter caps from absorbing 100A initially...",

Reddit: r/batteries, 1 yr. ago. URL:

https://www.reddit.com/r/batteries/comments/1ey8wof/spark_when_installing_new_ups_battery_is_that/ / URL:

<https://journal.uptimeinstitute.com/major-data-center-fire-highlights-criticality-of-it-services/>

⁸ M. H. F. Abdellah, "Insulation breakdown due to surge and arc,"

Surgefree Blog, (n.d.). URL:

<https://surgefree.co.kr/en/blogs/technology/%EC%84%9C%EC%A7%80%EC%99%80-%EC%95%84%ED%81%AC%EB%A1%9C-%EC%9D%B8%ED%95%9C-%EC%A0%88%EC%97%B0-%ED%8C%8C%EA%B4%B4> / URL:

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:930753/FULLTEXT01.pdf>

⁹ R. A. Kuffel, "Effects of Voltage Spikes,"

EE Power, (n.d.). URL:

<https://eepower.com/technical-articles/examining-the-causes-of-transformer-insulation-failure/> / URL:

<https://surgefree.co.kr/en/blogs/technology/%EC%84%9C%EC%A7%80%EC%99%80-%EC%95%84%ED%81%AC%EB%A1%9C-%EC%9D%B8%ED%95%9C-%EC%A0%88%EC%97%B0-%ED%8C%8C%EA%B4%B4>

¹⁰ M. H. F. Abdellah, "Insulation breakdown due to surge and arc,"

Surgefree Blog, (n.d.). URL:

<https://surgefree.co.kr/en/blogs/technology/%EC%84%9C%EC%A7%80%EC%99%80-%EC%95%84%ED%81%AC%EB%A1%9C-%EC%9D%B8%ED%95%9C-%EC%A0%88%EC%97%B0-%ED%8C%8C%EA%B4%B4>

[ED%8C%8C%EA%B4%B4](#) / URL:

<https://eepower.com/technical-articles/examining-the-causes-of-transformer-insulation-failure/> / URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:930753/FULLTEXT01.pdf>

¹¹ T. A. Toney, "DC Arc Flash Calculations,"

Brainfiller, (n.d.). URL: <https://brainfiller.com/technical-articles/dc-arc-flash-calculations/> / URL:

<https://www.cedengineering.com/userfiles/Arc%20Flash%20Hazard%20Calculations%20in%20ODC%20Systems%20R1.pdf>

¹² T. A. Toney, "DC Arc Flash Calculations,"

Brainfiller, (n.d.). URL: <https://brainfiller.com/technical-articles/dc-arc-flash-calculations/> / URL:

<https://www.cedengineering.com/userfiles/Arc%20Flash%20Hazard%20Calculations%20in%20ODC%20Systems%20R1.pdf>

¹³ Wikipedia, "Arc flash," (n.d.). URL:

https://en.wikipedia.org/wiki/Arc_flash

¹⁴ K. V. S. S. S. Prasad, "Energy and temperature are related via heat capacity,"

Electronics Stack Exchange, (n.d.). URL:

<https://electronics.stackexchange.com/questions/32996/calculating-the-dc-voltage-and-current-needed-to-obtain-certain-heat-with-a-resistor>

¹⁵ Power Projects India, "DC Arc Flash,"

Power Projects India, (n.d.). URL: <https://powerprojectsindia.com/dc-arc-flash/> / URL: <https://nepsi.com/resources/calculators/short-time-current-rating-of-conductor.htm>

¹⁶ P. K. Bandyopadhyay et al., "Improved internal short circuit models for thermal,"

AIP Publishing, (2016). URL:

<https://pubs.aip.org/aip/ape/article/3/1/016102/3335766/Improved-internal-short-circuit-models-for-thermal>

¹⁷ P. K. Bandyopadhyay et al., "Improved internal short circuit models for thermal,"

AIP Publishing, (2016). URL:

<https://pubs.aip.org/aip/ape/article/3/1/016102/3335766/Improved-internal-short-circuit-models-for-thermal> / URL: <https://www.osti.gov/pages/biblio/2514505>

¹⁸ Uptime Institute, "Major Data Center Fire Highlights Criticality of IT Services,"

Uptime Institute Journal, (2022). URL:

<https://journal.uptimeinstitute.com/major-data-center-fire-highlights-criticality-of-it-services/> / URL: https://millersolar.com/MillerSolar/case_studies/safety/Battery%20Explosion.pdf

¹⁹ Uptime Institute, "Major Data Center Fire Highlights Criticality of IT Services,"

Uptime Institute Journal, (2022). URL:

<https://journal.uptimeinstitute.com/major-data-center-fire-highlights-criticality-of-it-services/> / URL: <https://indico.cern.ch/event/45473/sessions/175559/attachments/946586/1342851/ASGC-DCIncident-20090311.pdf>

²⁰ Uptime Institute, "Major Data Center Fire Highlights Criticality of IT Services,"

Uptime Institute Journal, (2022). URL:

<https://journal.uptimeinstitute.com/major-data-center-fire-highlights-criticality-of-it-services/>

²¹ NFPA 70E Table 130.7(C)(15)(b), "Arc-Flash PPE Categories for Direct Current (dc) Systems,"

University of Notre Dame, (n.d.). URL:

https://riskmanagement.nd.edu/assets/445154/arc_flash_ppe_categories_for_direct_current_dc_systems.pdf

²² C. D. White, "Arc Flash Hazard Calculations in DC Systems,"

CED Engineering, (n.d.). URL:

<https://www.cedengineering.com/userfiles/Arc%20Flash%20Hazard%20Calculations%20in%20DC%20Systems%20R1.pdf> / URL: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1050&context=mng_etds

²⁴ Arc Advisor, "NFPA 70E Arc Flash Calculator,"

Arc Advisor, (n.d.). URL: https://arcadvisor.com/legacy/arc_procedure

²⁷ Willy McAllister, "Inductor kickback circuit,"

Spinning Numbers, (n.d.). URL: <https://spinningnumbers.org/a/inductor-kickback.html> / URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/296052/spark-when-connecting-battery-module-to-dc-power-supply>

²³ T. A. Toney, "DC Arc Flash Calculations,"

Brainfiller, (n.d.). URL: <https://brainfiller.com/technical-articles/dc-arc-flash-calculations/>

²⁵ Tyndale USA, "NFPA 70E,"

Tyndale FR Safety Resources, (n.d.). URL:
<https://tyndaleusa.com/fr-safety-resources/technical-library/standards-and-test-methods/arc-flash-standards/nfpa-70e/>

²⁸ L. lexio, "disconnect the power supply from the battery please set the voltage to the target voltage set...",

DIY Solar Forum, Aug 18, 2024. URL:
<https://diysolarforum.com/threads/avoid-drum-sparks-and-a-bell-the-dc.89257/> / URL:
<https://electronics.stackexchange.com/questions/296052/spark-when-connecting-battery-module-to-dc-power-supply>

²⁹ Duralabel, "Arc Flash Accident Reports,"

Duralabel Resources, (n.d.). URL:
<https://resources.duralabel.com/articles/arc-flash-accident-reports> / URL:
https://www.osha.gov/ords/imis/AccidentSearch.search?acc_keyword=%22Electric%20Arc%20Flash%22&keyword_list=on

³⁰ KOSHA, "Accident Investigation Process,"

KOSHA (Korean Occupational Safety and Health Agency), (n.d.). URL:
<https://www.kosha.or.kr/english/business/accidentInvestigation.do> / URL:
<https://www.kosha.or.kr/english/reviewandconfirmationofprocesssafetyreport.do>

³¹ OSHA, "Accident Search,"

OSHA (Occupational Safety and Health Administration), (n.d.). URL:
https://www.osha.gov/ords/imis/AccidentSearch.search?acc_keyword=%22Electric%20Arc%20Flash%22&keyword_list=on

²⁶ ESCO Group, "PPE Requirements,"

ESCO Group, (n.d.). URL:
<https://theescogroup.com/wp-content/uploads/2020/12/Arc-Flash-PPE-Categories.pdf>

참고 자료

1. DC Arc Flash | Understanding Risks and Safety Measures, 9월 28, 2025에 액세스, <https://powerprojectsindia.com/dc-arc-flash/>
2. Why do inductors release a high voltage when disconnected - Electronics Stack

- Exchange, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://electronics.stackexchange.com/questions/99974/why-do-inductors-release-a-high-voltage-when-disconnected>
3. Inductor kickback - Spinning Numbers, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://spinningnumbers.org/a/inductor-kickback.html>
 4. inductor: $v=L(di/dt)$ | All About Circuits, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://forum.allaboutcircuits.com/threads/inductor-v-l-di-dt.67860/>
 5. High voltage peaks in a dc voltage supply system | All About Circuits, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://forum.allaboutcircuits.com/threads/high-voltage-peaks-in-a-dc-voltage-supply-system.198039/>
 6. Spark when connecting battery module to DC power supply - Electrical Engineering Stack Exchange, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://electronics.stackexchange.com/questions/296052/spark-when-connecting-battery-module-to-dc-power-supply>
 7. Spark when installing new UPS battery. Is that normal? - Reddit, 9월 28, 2025에 액세스,
https://www.reddit.com/r/batteries/comments/1ey8wof/spark_when_installing_new_ups_battery_is_that/
 8. Insulation breakdown due to surge and arc - SURGEFREE, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://surgefree.co.kr/en/blogs/technology/%EC%84%9C%EC%A7%80%EC%99%80-%EC%95%84%ED%81%AC%EB%A1%9C-%EC%9D%B8%ED%95%9C-%EC%A0%88%EC%97%B0-%ED%8C%8C%EA%B4%B4>
 9. Examining the Causes of Transformer Insulation Failure - Technical Articles - EEPower, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://eepower.com/technical-articles/examining-the-causes-of-transformer-insulation-failure/>
 10. Dielectric Response and Partial Discharge Diagnostics of Insulation Systems by Utilizing High Voltage Impulses - DiVA portal, 9월 28, 2025에 액세스,
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:930753/FULLTEXT01.pdf>
 11. DC Arc Flash Calculations - Arc Flash & Electrical Power Training - Brainfiller, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://brainfiller.com/technical-articles/dc-arc-flash-calculations/>
 12. Arc Flash Hazard Calculations in DC Systems - CEDengineering.com, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://www.cedengineering.com/userfiles/Arc%20Flash%20Hazard%20Calculations%20in%20DC%20Systems%20R1.pdf>
 13. Arc flash - Wikipedia, 9월 28, 2025에 액세스,
https://en.wikipedia.org/wiki/Arc_flash
 14. Short-Time Current Rating of Conductor - Time Calculation - NEPSI, 9월 28, 2025에 액세스,
<https://nepsi.com/resources/calculators/short-time-current-rating-of-conductor.htm>
 15. Calculating the DC voltage and current needed to obtain certain heat with a resistor, 9월 28, 2025에 액세스,

- <https://electronics.stackexchange.com/questions/32996/calculating-the-dc-voltage-and-current-needed-to-obtain-certain-heat-with-a-resistor>
16. Improved internal short circuit models for thermal runaway simulations in lithium-ion batteries | APL Energy | AIP Publishing, 9월 28, 2025에 액세스, <https://pubs.aip.org/aip/aep/article/3/1/016102/3335766/Improved-internal-short-circuit-models-for-thermal>
 17. (PDF) Modelling Li-Ion Cell Thermal Runaway Triggered by an Internal Short Circuit Device Using an Efficiency Factor and Arrhenius Formulations - ResearchGate, 9월 28, 2025에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/313025321_Modelling_Li-Ion_Cell_Thermal_Runaway_Triggered_by_an_Internal_Short_Circuit_Device_Using_an_Efficiency_Factor_and_Arrhenius_Formulations
 18. Battery Explosion - Miller Solar Home, 9월 28, 2025에 액세스, https://millersolar.com/MillerSolar/case_studies/safety/Battery%20Explosion.pdf
 19. ASGC Incident Report - CERN Indico, 9월 28, 2025에 액세스, <https://indico.cern.ch/event/45473/sessions/175559/attachments/946586/1342851/ASGC-DCIncident-20090311.pdf>
 20. Major data center fire highlights criticality of IT services - Uptime Institute Blog, 9월 28, 2025에 액세스, <https://journal.uptimeinstitute.com/major-data-center-fire-highlights-criticality-of-it-services/>
 21. NFPA 70E Table 130.7(C)(15)(b) - Risk Management and Safety, 9월 28, 2025에 액세스, https://riskmanagement.nd.edu/assets/445154/arc_flash_ppe_categories_for_direct_current_dc_systems.pdf
 22. PREDICTIVE MODELING OF DC ARC FLASH IN 125 VOLT SYSTEM - UKnowledge, 9월 28, 2025에 액세스, https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1050&context=mng_etds
 23. TABLE 6 Arc Flash PPE Categories Equipment - ESCO Group, 9월 28, 2025에 액세스, <https://theescogroup.com/wp-content/uploads/2020/12/Arc-Flash-PPE-Categories.pdf>
 24. NFPA 70E arc flash calculations method, 9월 28, 2025에 액세스, https://arcadvisor.com/legacy/arc_procedure
 25. (NFPA 70E) Arc Flash Standard | Tyndale USA, 9월 28, 2025에 액세스, <https://tyndaleusa.com/fr-safety-resources/technical-library/standards-and-test-methods/arc-flash-standards/nfpa-70e/>
 26. Improved internal short circuit models for thermal runaway simulations in lithium-ion batteries (Journal Article) - OSTI, 9월 28, 2025에 액세스, <https://www.osti.gov/pages/biblio/2514505>
 27. How to use the new arc-flash PPE tables in the 2018 Edition of NFPA 70E - Wichita State University, 9월 28, 2025에 액세스, https://www.wichita.edu/services/environmental_health_and_safety/documents/Arc-Flash_PPE_Table_NFPA_70E.pdf
 28. Avoid drum sparks and a believe the DC | DIY Solar Power Forum, 9월 28, 2025에

엑세스,

<https://diysolarforum.com/threads/avoid-drum-sparks-and-a-bellie-the-dc.89257/>

29. Arc Flash Accident Reports | Duralabel, 9월 28, 2025에 엑세스,

<https://resources.duralabel.com/articles/arc-flash-accident-reports>

30. 한국산업안전보건공단 영문 | OSH Programs | Occupational Safety | Accident Investigation, 9월 28, 2025에 엑세스,

<https://www.kosha.or.kr/english/business/accidentInvestigation.do>

31. Electric Arc Flash - Accident Search Results | Occupational Safety and Health Administration osha.gov, 9월 28, 2025에 엑세스,

https://www.osha.gov/ords/imis/AccidentSearch.search?acc_keyword=%22Electric%20Arc%20Flash%22&keyword_list=on