

Revision:	KOR-01
발행일:	2023-08-14
작성자:	Dr. Uwe Schilling, Grady
결재자:	Rainer Weiss, Kendrick

키워드: 우주선, 단일 이벤트 번아웃(SEB), 무작위 장애, 안정성

전력 전자 장치에서 우주선 장애

- 1. 일반 1
 - 1.1 지구의 우주선 1
 - 1.2 우주선과 전력 전자장치 2
- 2. 단일 장치 우주선 고장률 측정 3
 - 2.1 일반적인 방사 조건에서 우주선 고장률 측정 3
 - 2.2 우주선 고장률의 측정 가속화 4
- 3. 모듈 및 애플리케이션 고장률 계산 4
 - 3.1 모듈 고장률 4
 - 3.2 애플리케이션의 우주선 고장률 5
 - 3.2.1 전압 6
 - 3.2.2 온도 6
 - 3.2.3 고도 6
 - 3.2.4 기타 종속성 7
 - 3.3 예 7
 - 3.3.1 무정전 전력 공급(UPS) 7
 - 3.3.2 1000 V 솔라 인버터 8
- 4. 우주선 장애의 측면에서 2-Level (2L) vs. 3-Level (3L) 토폴로지 9
 - 4.1 2L vs. 3L NPC 9
 - 4.2 2L vs. 3L TNPC 10

1. 일반

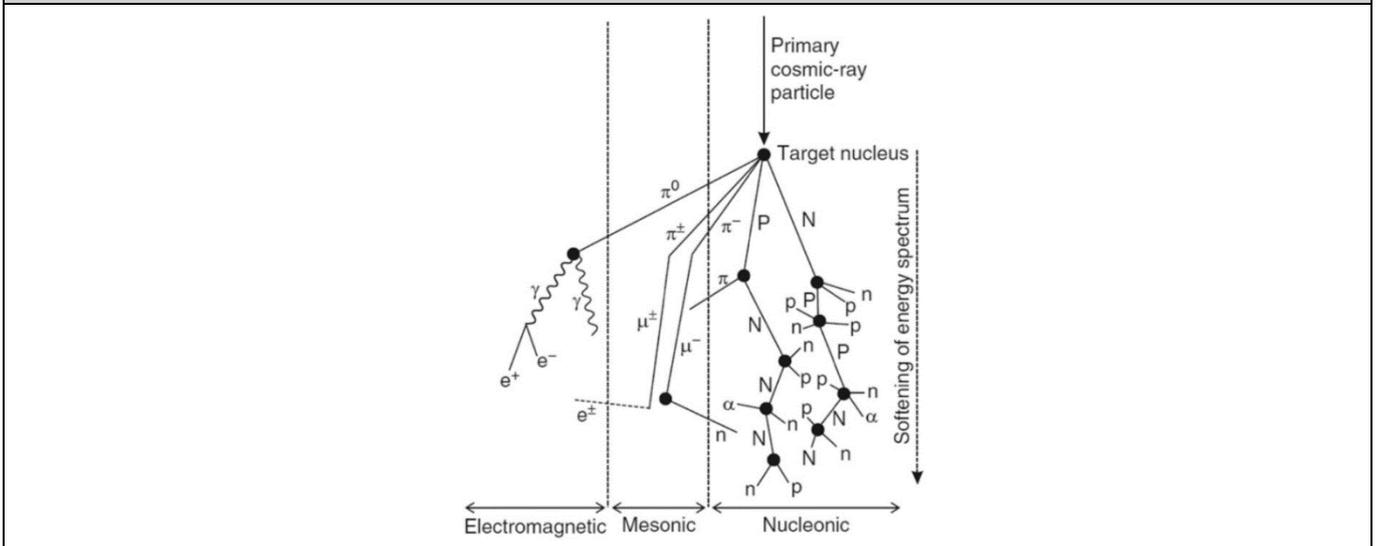
일반적으로 전력 전자 부품의 유효 수명은 초기 고장과 수명 종료 고장으로 제한된다고 간주됩니다. 그러나 전력 전자 시스템의 신뢰성을 고려할 때 무작위 고장을 무시해서는 안 됩니다. 우주선에 의한 단일 이벤트 소진 (SEB)은 일반적으로 무작위 고장률에 기여하는 요소입니다. 단일 이벤트는 무작위이지만, 인버터의 고장 확률, 즉 인버터의 고장률은 인버터의 적용 조건에서 예측할 수 있습니다. 이 애플리케이션 노트에서는 설계 중 또는 이미 존재하는 애플리케이션의 우주선 고장률을 추정하는 기본 방법을 제시합니다. 고장 메커니즘, 관련 신뢰성 테스트 및 문헌에 대한 자세한 내용은 [3]에서 찾을 수 있습니다.

1.1 지구의 우주선

우주에는 고에너지 입자가 도처에 존재합니다. 이 고에너지 입자는 모든 방향에서 지구에 끊임없이 도달합니다. 표면으로 향하는 경로에서 그들은 결국 외부 대기의 원자핵과 충돌합니다. 이 충돌은 주 입자의 에너지를 앗아가는

수많은 2 차 입자를 생성합니다. 일반적으로 이러한 2 차 입자는 후속 충돌에서 더 많은 입자를 생성할 수 있는 충분한 에너지를 가지고 있습니다 (그림 1). 따라서 눈사태 증폭이 발생하는 동시에 입자 강도는 대기 중 흡수로 감소합니다. 설명은 이미 특정 위치의 고도에 따라 지구 표면에 도달하는 2 차 입자 수 (다단계 과정으로 생성되더라도 일반적으로 "2 차"라고 함)에 따라 달라짐을 의미합니다. 이 과정에 대한 포괄적인 설명은 [4]에서 찾을 수 있습니다.

그림 1: 1 차 우주선을 통한 입자의 눈사태 생성([5]의 그림)



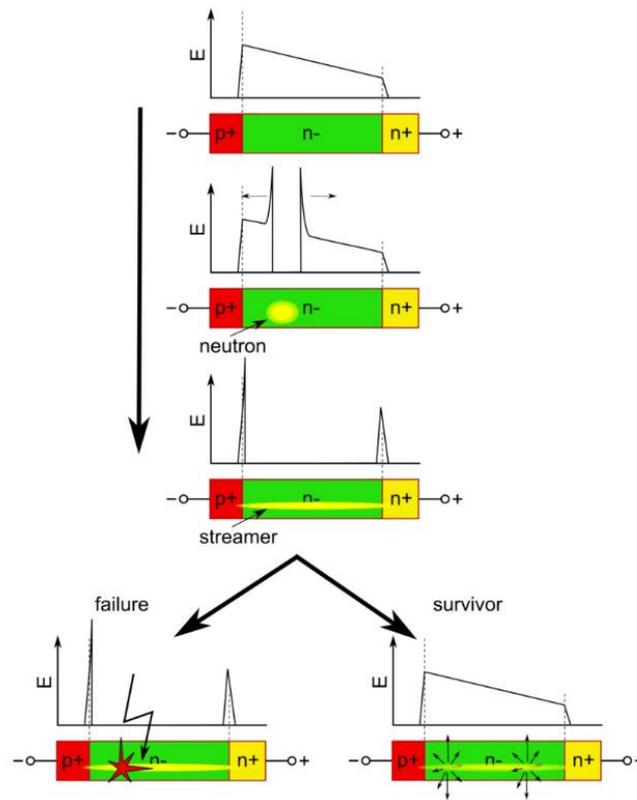
1.2 우주선과 전력 전자장치

2 차 우주 입자가 지구 표면에 도달하면 지상에서 밀집된 물질과 상호 작용합니다. 전력 전자 장치의 경우, 그림 2 에 표시된 바와 같이 차단 영역에서 이러한 입자에 맞을 확률이 있습니다. 그렇게 되면 장치에서 전자의 쌍(즉, 전하 캐리어)을 생성하여 수십 메가전자볼트에서 수백 메가전자볼트(100 메가전자볼트 \approx 16pJ)의 에너지를 장치에 축적합니다. 수 마이크로미터의 거리를 두고 있습니다.

이차 우주 방사선의 스펙트럼과 구성에 대한 심층 분석은 중성자가 훨씬 더 유해한 우주 방사선의 구성 요소임을 보여줍니다. 중성자는 충분한 수로 존재하는 유일한 입자이며 동시에 단일 지점에 모든 에너지를 축적할 수 있습니다 [6]. 장치가 전도 상태인 경우 일부 추가 전하 캐리어는 아무런 해를 끼치지 않습니다. 그러나 차단 상태에서는 전계 영역의 전하 캐리어 플라즈마가 내부를 전계로부터 보호합니다. 대신 전압 강하는 플라즈마의 가장자리에 있는 두드러진 전계 스파이크에서 발생합니다. 이러한 전계 스파이크는 반도체의 임계 전계 강도를 초과하여 충격 이온화로 더 많은 전하 캐리어를 생성하여 플라즈마를 확장할 수 있습니다. 이 자생 과정에서 소위 스트리머가 발생하여 장치를 국부적으로 단락시킵니다. 이 모든 일은 1 나노초 미만 내에 발생합니다. 그 후, 전하 캐리어는 방사형으로 충분히 빠르게 확산되어 단락된 영역이 차단 상태로 돌아갈 수 있습니다. 그러나 확산 과정이 너무 느리면 장치에 충분한 에너지가 축적되어 장치가 국부적으로 녹아 장치가 영구적으로 차단 기능을 상실합니다. 애플리케이션에서 이것은 영구적으로 손상된 칩으로 이어지고, 충분히 빠른 단락 회로 보호가 없는 경우 폭발로 이어집니다. 우주선 고장률 측정에서는 장치가 일반적으로 퓨즈로 보호되고 사후 부검 분석에서 반도체 재료의 용융 통로가 발견됩니다.

이 설명에서, 치명적인 타격이 발생하는 속도는 특정 전계가 확장되는 영역 (더 정확하게는 부피, 이는 수직 장치에서는 다시 영역과 비례 함)에 직접적으로 비례 함을 알 수 있습니다. 두 배의 영역은 두 배의 고장률을 갖습니다. 또한, 우주선 고장은 전기장이 강한 칩의 영역에서만 발생한다는 것을 이해할 수 있습니다. 이것은 활성 영역뿐만 아니라 에지 종단 [7]도 될 수 있습니다. 따라서 단순함을 위해 고장률은 일반적으로 총 칩 영역당 지정됩니다. 이것은 일반적으로 허용되는 오차를 도입할 것입니다. 왜냐하면 에지 종단과 활성 영역의 고장률은 일반적으로 다르기 때문입니다. 우리는 SEMİKRON CAL 다이오드의 에지 종단 고장을 우리 실험에서 관찰한 적이 없습니다. 그러나 우리는 총 칩 영역당 고장률을 지정하는 관례를 준수합니다.

그림 2: 우주선 장애 메커니즘



2. 단일 장치 우주선 고장률 측정

2.1 일반적인 방사 조건에서 우주선 고장률 측정

특정 장치 기술의 우주선 고장률은 이 기술의 장치를 역 바이어스하고 고장이 발생하기를 기다리면서 측정할 수 있습니다. 장치의 상태는 데이터 로거로 모니터링할 수 있습니다. 예를 들어 역전류를 측정할 수 있습니다. 역전압 및 온도와 같은 매개변수의 변형은 각 매개변수 조합에 대해 하나씩 별도의 실행이 필요합니다. 이 접근 방식은 일반적으로 아바란쉬 브레이크다운 전압 VBR 근처에서만 얻을 수 있는 충분히 높은 고장률에 대해 실행 가능합니다. 그러나 장치의 VBR 근처에서의 측정만으로 응용 프로그램 관련 전압 수준에서 장치 고장률을 결정하기 위해 "전압 가속 계수"를 정의할 수 없습니다. 대신, 고장률도 더 낮은 수준에서 측정해야 합니다. 여기서 가속화된 테스트는 과도하게 많은 수의 장치에서 수년간의 측정 시간을 피하기 위한 필요성이 됩니다. 예를 들어, 가속 없이 $10\text{FIT}/\text{cm}^2$ 의 고장률을 측정하려면 1cm^2 면적의 칩 100,000 개를 1년 동안 측정해야 특정 통계적 신뢰도를 얻을 수 있습니다(~8-9 개 고장).

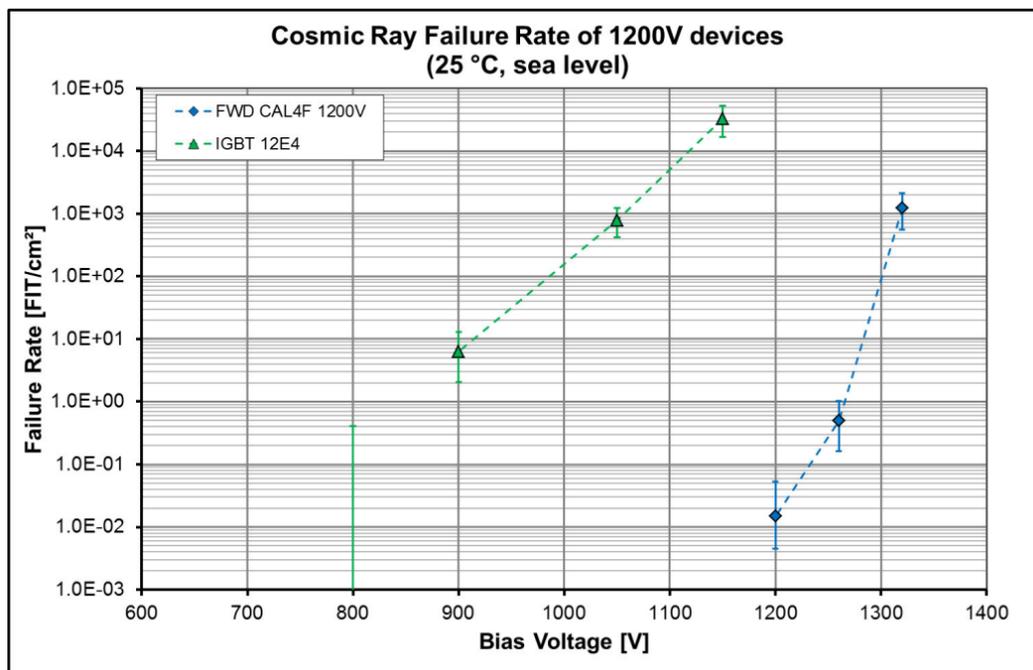
2.2 우주선 고장률의 측정 가속화

높은 고도에서는 우주 방사선의 플럭스가 증가합니다. 따라서 고고도 시험은 해수면(에 근접한) 시험에 비해 가속이 가능합니다. 이 접근법의 장점은 우주 중성자의 실질적으로 스펙트럼이 항상 존재한다는 점이며, 몇몇 제조사는 독일의 추크슈피체(Zugspitze) 산(해발 2,962m)이나 스위스의 융프라우(Jungfrau) 산(해발 3,466m)에서 실험을 통해 이 접근법을 이용합니다. 그러나 단점은 접근이 번거롭고 가속 계수가 10을 약간 넘는다는 것입니다(그림 5 참조).

따라서 고에너지 양성자 또는 중성자 빔에 대한 검사가 확립되었습니다. 가용 플럭스는 최대 10^{10} 의 가속 계수를 제공합니다. 이를 통해 실험자는 30분 안에 단일 작동을 실시할 수 있고 1회 측정으로 바이어스 전압과 정선 온도의 특정 매개변수 범위를 커버할 수 있습니다. IGBT 12E4 및 CAL4F 프리휠링 다이오드(FWD)에 대한 결과는 아래 그림 3과 같습니다. 이러한 칩 기술은 일반적으로 최신 SEMİKRON 전력 모듈 세대에 모두 구현되어 있습니다.

참고로, FWD는 오류 확보를 위해 명시된 차단 전압 이상에서 측정되었습니다. 이와는 달리 1200V에 가까운 IGBT의 고장률은 그 규모가 6-7배 더 크므로 이 칩 세트를 사용하는 모듈의 고장률을 결정합니다. 하지만 이것이 모든 IGBT 및 FWD의 조합에 적용되지는 않습니다. 따라서 IGBT와 FWD 모두에 대해 고장률을 확인하여 모듈의 고장률을 결정해야 합니다.

그림 3: 1200V IGBT 및 FWD의 우주선 고장률



3. 모듈 및 애플리케이션 고장률 계산

3.1 모듈 고장률

칩 기술의 고장률은 보통 특정 차단 전압과 온도에 대해 cm^2 칩 면적으로 명시됩니다. 10cm^2 IGBT 면적 및 6cm^2 FWD 면적을 포함하는 하프 브리지 구성의 가상 1200V/300A 전력 모듈을 가정해 보겠습니다. 그림 3에 표시된 특정 고장률을 적용한다고 가정하면, IGBT ($6\text{FIT}/\text{cm}^2$) 및 FWD ($<0.02\text{FIT}/\text{cm}^2$)의 개별 고장률을 단순히 면적과 특정 고장률로 곱하여 900V DC 링크 전압에서 모듈 고장률을 계산할 수 있습니다($10 \times 6 + 4 \times 0.02$)FIT = 60FIT. 여기서 FWD의 기여는 무시됩니다. IGBT 고장률의 나머지 오류가 FWD의 총 기여보다 훨씬 크기 때문입니다. 그러나 이 접근 방식은 오해의 소지가 있습니다. 하프 브리지 작동 시 각 스위치는 전체 시간의 절반 동안 900V를 차단하고 나머지 하프 브리지는 전도 상태가 됩니다. 각 시점에서 단 하나의 스위치(전체 영역의 절반을 차지)만 차단 모드에 있기 때문에 총 고장률은 절반 즉, 30FIT 밖에 되지 않습니다. 두 스위치가 모두 꺼진 OFF 상태에서는 전체 영역이 차단 모드가 되지만 전압

강하가 이 두 스위치 사이에서 균등하게(대략) 나누어져 모든 스위치가 450V 만 차단합니다. 이러한 전압 수준에서는 고장률은 보통 무시됩니다.

앞에서 설명한 하프 브리지 구성과 더불어 다중 레벨 인버터용 모듈, 부스트 작동 등의 다른 모듈 토폴로지 역시 일반적이기 때문에 SEMİKRON 은 모듈 수준에서 고장률을 지정하지 않기로 했습니다. 대신, SEMİKRON 은 요청 시 그림 4 와 같은 제품 정보 시트를 제공할 수 있습니다. 이 정보 시트에는 모듈 내 각 논리 전기 장치(통상 IGBT 및 역병렬 FWD 로 구성된 스위치)에 대한 고장률이 명시되어 있습니다.

그림 4: SEMiX603GB12E4p 의 우주선 고장률에 대한 제품 정보 시트

SEMiX603GB12E4p

Cosmic ray failure rates of the module
Date: 2016-04-20

Conditions	
Elevation above sea level	0 m
Junction Temperature	25 °C
Duty Cycle	50 %

1200V Switch				
Voltage	800 V	900 V	1000 V	1100 V
Failure rate / switch	0.91 FIT	7.3 FIT	640 FIT	14000 FIT

Failure rates are given per switch. Failure rates need to be corrected for actual duty cycle and DC link voltage.

Data interpolation

There is no general physical model to interpolate between the measured failure rates λ_1 and λ_2 at voltages V_1 and V_2 , respectively. Based on experience, we use and recommend the following interpolation: $\lambda(V) = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{\frac{V-V_1}{V_2-V_1}}$ for $V_1 \leq V \leq V_2$. Extrapolation is deprecated.

Elevation dependence

The failure rate at a certain elevation h (in meters) can be estimated by the following formula introduced by ABB:

$$\lambda(h) = \lambda_0 \cdot \exp(7 - 7 \cdot (1 - h/44300)^{5.26})$$

with λ_0 the failure rate at sea level. This formula applies to ground-based installations only and must not be applied for avionic or space applications.

Liability

1. This report was prepared and compiled by qualified staff. SEMİKRON shall accept no liability for the relevance, accuracy or completeness of the information contained therein.
2. SEMİKRON accepts no liability nor provides any guarantee as to the usability of the information conveyed or contained in this report. Prior to using this report, the customer is responsible for ascertaining that the information contained therein is suitable or fit for the designated purpose.
3. The information and values given by that report have no common validation and represents only the characteristics of the measured/analysed products/items.

Author: Uwe Schilling
document version 1.2 (2016-02-29)

3.2 애플리케이션의우주선 고장률

우주선 고장률은 주로 세 가지 매개변수 즉, 전압, 온도 및 고도에 따라 달라집니다.

3.2.1 전압

일반적으로 고장률은 특정 전압에 대해 지정됩니다. 고장률 λ_1 과 λ_2 가 각각 전압 V_1 과 V_2 에 대해 지정된 경우, 로그 스케일 플롯의 직선에 해당하는 보간법을 권장합니다.

$$\lambda(V) = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\frac{V-V_1}{V_2-V_1}}$$

for $V_1 < V < V_2$. 고장률 플롯의 곡률이 어떻게 변하는지 기본적으로 알려져 있지 않고 고장률의 준기하급수적 전압 종속성으로 인해 오류가 빠르게 3 배 이상으로 치솟을 수 있어 외삽법은 더이상 사용되지 않습니다.

스위칭 과전압

실제 인버터 작동 중에는 DC 링크 연결의 유도 인덕턴스 때문에 각 차단 이벤트 중 실리콘 다이에 DC 전압보다 높은 전압 과도 현상이 발생합니다. 그러나 차단 중의 국부 전계 강도 (우주선 고장률에 대한 관련 매개변수)는 동일한 전압이 정적으로 적용되는 경우의 국부 전계 강도와 다릅니다. 첫 번째 근사치로, 전압이 정적 전압처럼 작용한다고 가정하고 스위칭 이벤트의 시간 동안 고장률을 통합하여 장치의 차단 중 우주선 고장률을 추정할 수 있습니다. 6.5kV 장치의 경우 이 추정치가 너무 낮을 수 있음이 밝혀졌습니다. 이는 장치 내부의 전계가 차단 중 동적으로 증가하기 때문입니다[9]. 그러나 이 효과는 고전압 장치에서 가장 두드러지지만, 그조차도 기여도가 지배적이지 않았습니다. 따라서 우리는 1700V 정격 차단 전압까지의 장치에 대해 위의 근사치를 사용하는 것을 권장합니다

3.2.2 온도

온도가 상승하면 실리콘의 절연 강도가 증가합니다. 첫 번째 섹션의 우주선 고장 메커니즘 설명에 따르면 따라서 고온에서 더 낮은 고장률을 예상할 수 있습니다. 왜냐하면 스트리머를 생성하는 눈사태 메커니즘이 더 높은 전계로 이동하기 때문입니다. 그러나 다른 효과가 이 증가하는 전압 안정성을 역전시킬 수 있습니다. 예를 들어, 민감도는 일반적으로 고온에서 더 높기 때문에 저온에서는 파괴적이지 않은 스트리머가 고온에서는 파괴적일 수 있습니다. 전용 측정은 보편적인 동작을 보여주지 않으며, 오히려 각 장치 기술마다 온도 의존성이 다르게 나타나는 것 같습니다. 불행히도 실제 온도 의존성에 대한 데이터는 여전히 부족합니다. 따라서 우리는 ABB 의 "온도 계수"([8]) 사용을 권장합니다.

$$F(T) = e^{-\frac{T_J - 25\%}{47.6^\circ\text{C}}}$$

제한적 정확성을 감안한 상태에서 실온에서의 고장률에 $F(T)$ 을 곱하여 각 장치의 온도 종속적 고장률을 추정합니다.

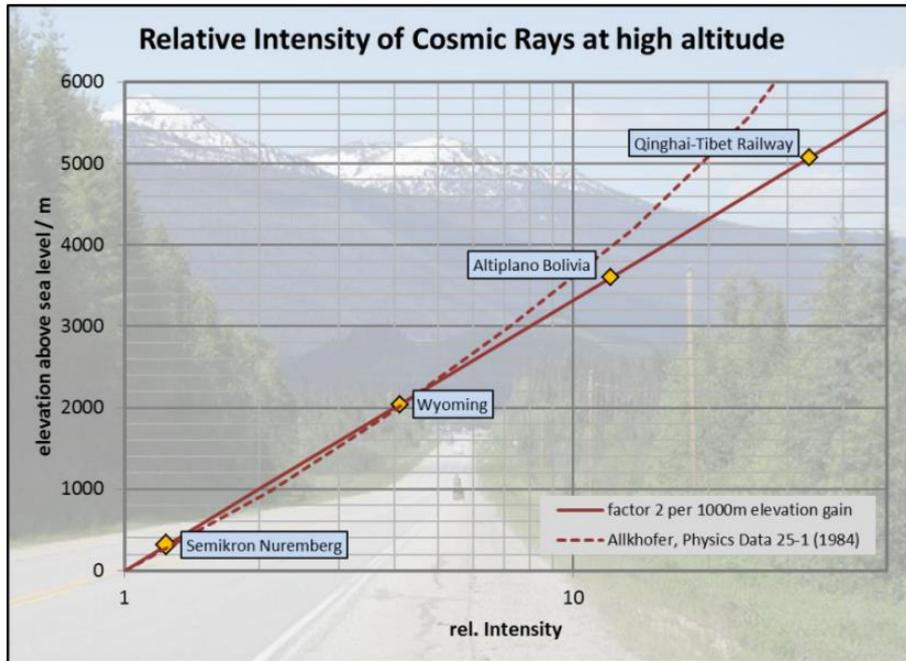
3.2.3 고도

첫 번째 섹션에서 이미 언급했듯이, 우주선의 강도는 고도가 증가함에 따라 증가합니다. 이는 방사선을 차단할 대기층이 더 적기 때문입니다. 더 높은 고도에서는 눈사태가 아직 완전히 성장하지 않았기 때문에 강도가 다시 감소합니다. 비행공기 애플리케이션의 경우 방사선을 차단하는 대기층이 적다는 첫 번째 효과만 관련이 있으며, 고도가 1,000 미터 증가하면 강도가 약간 증가합니다. 따라서 해수면에서 주어진 고장률은 단순히 다음 계수로 재조정하여 해수면 (a.s.l.) 위의 특정 고도에서의 고장률 A 를 얻을 수 있습니다.

$$A = 2^{h/1000m}$$

측정 데이터 [10]와 비교할 때, 이러한 근사치는 해발 3,000m 까지 10% 미만의 오류를 유도하며, 해발 5,000m 에서 고장률을 2 배 과대 추정합니다(즉, 보수적으로 추정합니다)(그림 5).

그림 5: 우주선 강도의 고도 종속성



3.2.4 기타 종속성

위에서 설명한 요소들 외에도, 우주선 고장률은 다소 의존이 적은 몇 가지 다른 매개변수가 있습니다. 하나는 11년 태양 사이클입니다. 태양 자체는 유해한 우주선의 근원은 아니지만, 태양풍은 이 주기 내에서 변화합니다. 이것은 지구의 자기장에 영향을 미치며, 이는 차례로 전하를 띤 1차 우주선이 얼마나 잘 빛나가는지를 결정합니다. 강도는 태양 주기 내에서 최소에서 최대까지 약 20% 역주기적으로 변하며, 즉 최대 태양 활동은 우주선 플럭스의 최소값에 해당합니다. 유사한 이유로, 강도는 또한 지구의 자오선과 위도에 따라 달라집니다. 예를 들어, 도쿄 (25°N 지자기 위도)의 중성자 플럭스는 뉴욕 (52°N 지자기 위도)의 중성자 플럭스보다 약 40% 낮습니다. 이는 이미 약 50%의 최대 차이에 가깝습니다. 마지막으로, 차폐도 중요한 역할을 할 수 있습니다. 특히 설치가 일반적으로 고층 건물의 지하실, 광산 등에서 발견되는 경우입니다. 자세한 내용은 [4]를 참조하십시오. 마지막으로, 흔히 우주선 강도와 그에 따른 고장률에 일주기 주기가 있는지 묻는 질문이 있습니다. 위에서 언급했듯이 태양은 고에너지 중성자를 생성하는 1차 우주선의 근원이 아니므로 그러한 주기는 존재하지 않습니다.

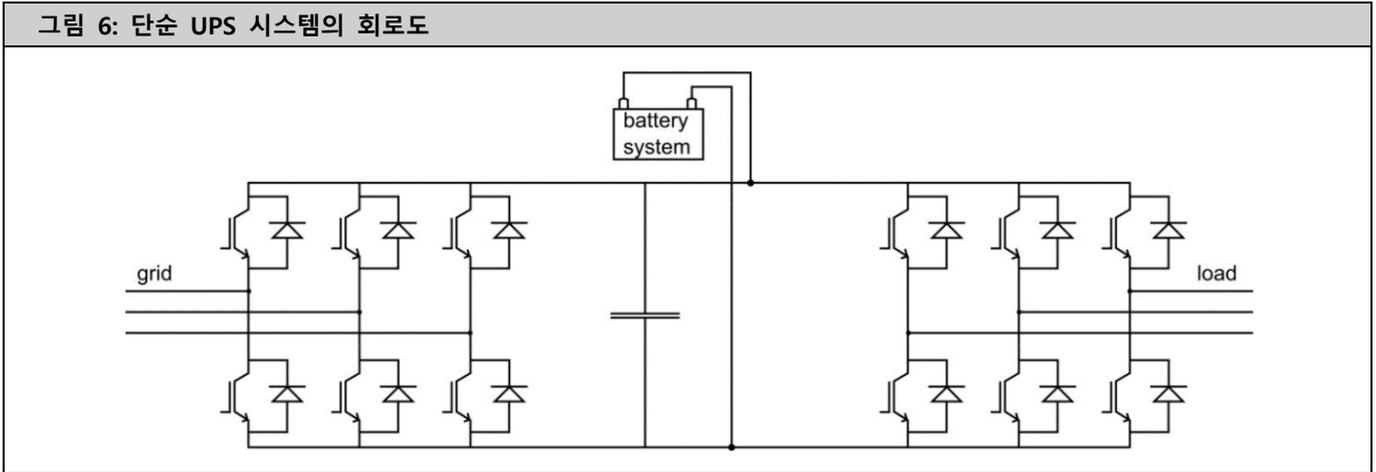
이 단락에서 논의된 종속성은 종종 무시됩니다. 왜냐하면 우주선 고장률의 계산은 일반적으로 수십만 단위의 추정치이기 때문입니다.

3.3 예시

3.3.1 무정전 전력 공급(UPS)

900V의 배터리 전압을 가진 3상 온라인 UPS의 간단한 경우를 가정해 보겠습니다. 또한 인버터와 컨버터가 모두 각각 3개의 하프 브리지 모듈 SEMiX603GB12E4p로 구성되어 있다고 가정합니다. 이 모듈의 스위치에 대한 우주선 고장률은 900V 및 실온에서 그림 4에서 찾을 수 있습니다: 7.3FIT. 이 고장률은 정상적인 반 브리지 작동에 해당하는 50%의 듀티 사이클로 이미 제공됩니다. 따라서 이 인버터의 우주선으로 인한 총 고장률은 6개 모듈 * 2개 스위치/모듈 * 7.3FIT/스위치 = 87.6FIT로 예상됩니다.

그림 6: 단순 UPS 시스템의 회로도



3.3.2 1000 V 솔라 인버터

태양광 인버터 제조업체는 1200V 정격 반도체 차단 전압을 가진 부품으로 1000V DC 정격 인버터를 구현하고 싶어합니다. 이는 전기적으로 실현 가능한 일입니다. 왜냐하면 가장 높은 DC 전압은 낮은 전류에서만 발생하므로 스위칭 과전압이 낮게 유지됩니다. 전류가 증가하자마자 태양 전지에서 나오는 DC 전압이 떨어지고 정상 작동은 1000V 를 훨씬 밑돌게 됩니다. 우리는 표 1 에 나와 있는 단순화된 전압 프로파일을 가정할 것입니다 (실제 애플리케이션의 프로파일은 [11] 참조).

표 1: 최대 1000V DC 전압을 사용하는 태양광 시스템에서 DC 전압의 가상 분포

전압 [V]	시간[h/y]	시간비율(%)
1000	2	0.023%
950	20	0.228%
900	200	2.283%
850	2000	22.831%
800 이하	2158	24.635%
야간에 턴오프 상태	4380	50.000%

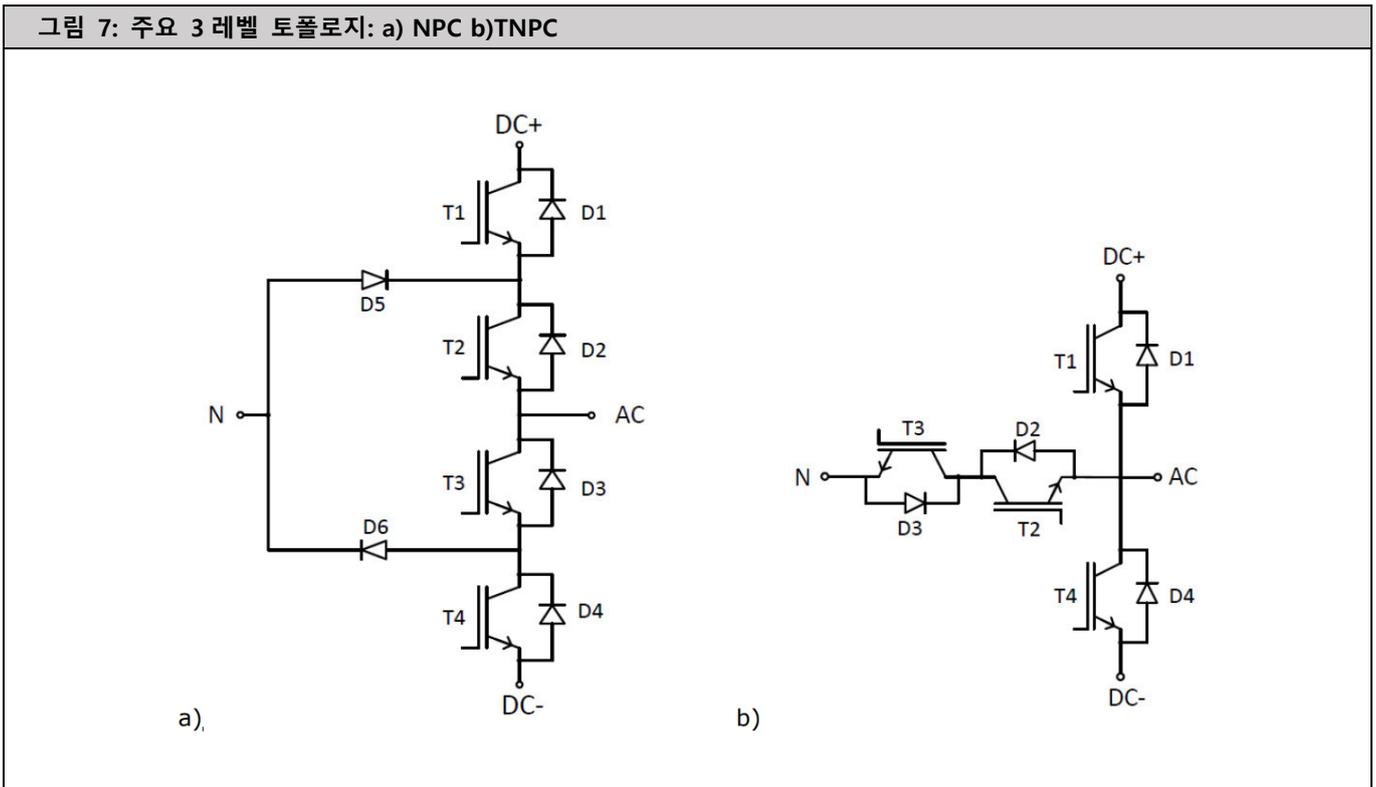
이러한 표를 통해 태양광 인버터의 우주선 고장률을 추정할 수 있습니다. 12 개의 모듈 SEMiX603GB12E4p 로 구성된 인버터를 가정하면, 고장률은 다시 그림 4 에서 찾을 수 있습니다. 고장률을 가중치로 작동 시간의 비율을 합하면 표 2 에 표시된 것처럼 인버터의 총 고장률이 약 30FIT 가 됩니다.

표 2: 표 1 에 따른 시스템 고장률

전압 [V]	고장률 [FIT]	시간비율(%)	가중 고장률 [FIT]
1000	15360	0.023%	3.51
950	1640	0.228%	3.74
900	175.2	2.283%	4.00
850	61.8	22.831%	14.11
800 이하	21.8	24.635%	5.37
야간에 턴오프 상태	0	50.000%	0.00
총 고장률:			30.73

4. 우주선 장애의 측면에서 2-Level (2L) vs. 3-Level (3L) 토폴로지

최근 3L 토폴로지는 높은 DC 전압을 사용하는 애플리케이션, 특히 우주선 고장과 관련하여 가장 중요한 애플리케이션에서 점점 더 많은 관심을 받고 있습니다. 그렇다면 3 상 인버터의 우주선 고장률은 2 상 인버터의 우주선 고장률과 어떻게 비교될까요? 3L 인버터의 두 가지 가장 일반적인 토폴로지는 그림 7 에 나와 있습니다. 중성점 클램프(NPC)와 T형 중성점 클램프(TNPC)입니다. (두 토폴로지와 그 각각의 장점에 대한 자세한 설명은 [12]에서 찾을 수 있습니다.) 또한 반도체는 세 가지 주요 전압 등급으로 제공됩니다. 650V, 1200V, 1700V 입니다. 2 상 모듈과 3 상 모듈은 일반적으로 이러한 전압 등급의 스위치를 장착합니다.



4.1 2L vs. 3L NPC

NPC 토폴로지에서 모든 반도체는 차단 전압 정격이 동일하며, 항상 2 개의 반도체가 전체 DC 전압을 차단하므로 모듈은 명목상 사용되는 반도체의 최대 2 배의 차단 전압 정격을 가질 수 있습니다.

일반적인 상한 DC 전압	2L 모듈		3L NPC 모듈	
	전압 등급	예시 모듈	전압 등급	예시 모듈
480V	650V	SKiiP38GB07E3V1	650V(가정)	해당없음
1000V	1200V	SKiiP38GB12E4V1	650V	SKiiP39MLI07E3V1
1500V	1700V	SKiiP38GB17E4V1	1200V	SKiiP39MLI12T4V1

650V 2L 모듈의 교체는 반도체 차단 전압이 조정되지 않을 경우 3L 솔루션의 이점이 대부분 사라지므로 다루지 않습니다. 일반적으로 1200V 모듈과 1700V 모듈에 대해 고려되는 최대 DC 전압은 각각 1000V 와 1500V 입니다. 특히 태양광전지 애플리케이션에서 이러한 전압 수준에 대한 논의가 진행 중입니다. 이는 3L 모듈에서 650V 다이와 1200V 다이가 DC 전압의 절반, 즉 최대 500V 와 750V(스위칭 과전압 미고려)를 차단해야 합니다. 이러한 전압 수준에서는 SEMİKRON 이 사용하는 모든 반도체의 고장률은 일반적으로 무시할 수 있는 수준인 1FIT/cm² 미만입니다. 따라서 3L NPC 모듈은 2L 모듈과는 달리 우주선 장애에 대해 면역성이 있다고 볼 수 있습니다. 예를 들어, 1000V 및 정상

조건(실온, 해발, 50% 듀티 사이클)에서 SKiiP38GB12E4V1 의 고장률은 스위치당 310FIT 이고 SKiiP39MLI07E3V1 의 고장률은 500V 차단 전압에서 스위치당 ~1FIT 의 측정 제한보다 낮습니다.

4.2 2L vs. 3L TNPC

TNPC 토폴로지는 다른 상황을 보입니다. 여기서 수직 레그의 반도체는 전체 DC 전압을 차단해야 합니다. 따라서 이러한 반도체의 차단 전압 등급은 전체 모듈의 차단 전압 등급과 같습니다. 반면 수평 레그의 반도체는 전체 DC 전압의 절반만 견디면 되므로 차단 전압 정격이 더 낮아도 됩니다. 각각 해당되는 등급은 아래와 같습니다.

표 4: 2L 모듈 및 3L TNPC 모듈 반도체의 차단 전압					
일반적인 상한 DC 전압	2L 모듈		3L TNPC 모듈		
	전압 등급	예시 모듈	수직 레그 전압 등급	수평 레그 전압 등급	예시 모듈
480V	650V	SEMiX305GD07E4	650V(가정)	650V(가정)	해당없음
1000V	1200V	SEMiX453GB12E4p	1200V	650V	SEMiX405TMLI 12E4B
1500V	1700V	SEMiX453GB17E4p	1700V	1200V	SEMiX305TMLI 17E4C

예시된 구성에서 수평 레그에 인가된 전압은 NPC 반도체 모듈의 전압에 해당합니다. 앞서 상세히 설명한 대로 일반적인 애플리케이션에 사용되는 모든 전압에 대해 이는 무시가능한 수준입니다. 따라서 3L TNPC 모듈의 우주선 고장률은 오로지 수직 레그 반도체의 고장률에 의해서만 결정됩니다. 차단 전압과 인가된 전압이 2L 모듈과 동일하다고 하더라도, 다음과 같은 두 가지 이유로 고장률에는 차이가 있습니다.

- a) 일반적인 스위칭 주파수에서 TNPC 모듈은 보통 공칭 전류의 대략 75%를 RMS 전류로 전달하는 반면, 2L 모듈은 약 50%만 전달합니다. 따라서 2L에 비해서 3L 모듈의 수직 레그에서는 인버터의 동일한 전력 정격에 대해 칩 면적의 65%만 필요합니다. 우주선 고장률이 칩 면적에 선형적으로 종속되므로 3L TNPC 모듈의 고장률 역시 대응하는 2L 모듈의 고장률의 65%에 불과합니다.
- b) 정상적인 하프 브리지 구성에서 각 스위치는 절반의 시간에 전체 DC전압을 차단해야 합니다. 반대로, TNPC 모듈에서는 수직 레그의 각 스위치가 전체 작동 시간의 25%(+/-5%, 변조율에 따라 다름) 내에 전체 DC 전압을 차단해야 합니다. 나머지 50% 시간 동안 수직 레그의 스위치 2개는 차단 모드가 되고 DC 전압 강하를 공유합니다. 이 시간 동안 고장률은 수평 레그보다 훨씬 낮습니다(차단 전압은 같지만 수직 레그의 전압 정격이 더 높음). 따라서 3L TNPC의 해당 차단 시간은 2L 모듈의 약 절반입니다. 결과적으로 이러한 효과로 인해 고장률이 2배 줄어들게 됩니다.

위의 두 가지 효과를 조합하면, 일반적으로 3L TNPC 모듈로 설계한 인버터가 동일한 반도체 기술을 활용하여 2L 모듈로 설계한 동급 전력 정격의 인버터에 비해 우주선 고장률이 약 33% 입니다. 예를 들어, 3.3.2 항에서 언급한 바 있는 솔라 인버터가 동일한 칩 기술을 이용하여 3 레벨 솔루션으로 구현되었다면, 우주선 고장률은 약 19FIT 에서 약 6FIT 로 떨어질 것입니다.

기호 및 용어

문자 기호	용어
FIT	"시간당 고장회수": 1FIT 는 10 ⁹ h 시간 작동 시 1 회 장치 오류에 해당합니다.
스위치	IGBT + 역병렬 FWD
V _{BR}	눈사태 파괴 전압
SEB	단일 이벤트 번아웃

용어 및 기호에 대한 자세한 설명은 "애플리케이션 매뉴얼 전력 반도체"[2] 참고.

참고자료

- [1] www.SEMIKRON.com
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3
- [3] U. Scheuermann and U. Schilling, "Impact of device technology on cosmic ray failures in power modules", IET Power Electron. 9, 2027–2035 (2016)
- [4] J.F. Ziegler, "Terrestrial cosmic rays", IBM Journal of Research and Development 40, 19–39 (1996)
- [5] Alessandra Abe Pacini, "Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface", Rev. Bras. Ensino Fís. vol.39 no.1, <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0168>, (2016) CC-BY
- [6] W. Kaindl, "Modellierung höhenstrahlungsinduzierter Ausfälle in Halbleiterleistungsbaulementen", Dissertation TU München, S. 24ff. (2005)
- [7] G. Soelkner, W. Kaindl, H.-J. Schulze, G. Wachutka, "Reliability of power electronic devices against cosmic radiation-induced failures", Microelectron. Rel. 44, 1399–1406 (2004)
- [8] N. Kaminski and A. Kopta, ABB application note 5SYA 2042-04, Failure rates of HiPak modules due to cosmic rays.
- [9] A. Haertl, G. Soelkner, F. Pfirsch, W. Brekel, T. Duetemeyer, "Influence of dynamic switching on the robustness of power devices against cosmic radiation", ISPSD 2012, 353–356
- [10] O. C. Allkhofer, P. K. F. Grieder, Cosmic rays on earth, Physics data 25-1(1984)
- [11] C. Felgemacher, S.V. Araújo, C. Nöding, P. Zacharias, „Benefits of increased cosmic radiation robustness of SiC semiconductors in large power-converters", PCIM 2016, 573-580
- [12] I. Staudt, SEMIKRON Application note AN-11001 Rev. 05, "3L NPC & TNPC Topology" (2015)

변경 이력

SEMİKRON 은 추가 통지 없이 변경할 수 있는 권리를 가집니다.

면책조항

SEMİKRON 은 추가 통지 없이 신뢰성, 기능 또는 설계를 개선하기 위해 변경할 수 있는 권리를 가집니다. 이 문서에 제공된 정보는 정확하고 신뢰할 수 있는 것으로 간주됩니다. 그러나 이러한 정보의 정확성 또는 사용과 관련하여 어떠한 확약이나 보증도 제공하지 않으며 어떠한 책임도 지지 않습니다. SEMİKRON 은 이 문서에 기술된 제품이나 회로의 응용 또는 사용으로 인해 발생하는 어떠한 책임도 지지 않습니다. 아울러 이 기술 정보는 부품 특성에 대한 보증으로 간주되지 않을 수 있습니다. 배송, 성능 또는 적합성과 관련하여 일체의 명시적 혹은 암묵적 보증이나 보장도 하지 않습니다. 이 문서는 이전에 제공된 모든 정보를 대체 및 대신하며 추가 통지 없이 업데이트로 대체될 수 있습니다.

SEMİKRON 제품은 SEMİKRON 의 명시적인 서면 승인 없이 생명 유지 장치 및 시스템에 사용할 수 없습니다.

SEMİKRON-DANFOSS KOR

경기도 광명시 새빛공원로 67 광명역자이타워 A 동 1207~1212 호

• Tel: +82-2-6370-4799 • Fax: +49 911-65 59-262

sales.skcor@semikron-danfoss.com