

고장 라이브러리 기반의 2kV급 MVDC 서브모듈 시험평가시스템에 대한 신뢰성 분석

차재훈¹, 강필순¹, 김종수², 김태진³
 경상국립대학교¹, 대진대학교², 한국전기연구원³

Reliability Analysis of 2kV MVDC Submodule Test Evaluation System Using Fault Libraries

Jae-Hun Cha¹, Feel-soon Kang¹, Jong-Soo Kim², Tae-Jin Kim³
 Gyeongsang National University¹, Daejin University², Korea Electrotechnology Research Institute³

ABSTRACT

본 논문은 2kV급 MVDC(Medium Voltage Direct Current) 서브모듈 시험평가시스템의 신뢰성을 MIL-HDBK-217F와 FIDES 2009 고장 라이브러리를 이용하여 분석한다. 시험평가시스템은 하프-브릿지 서브모듈 구조를 시험평가 대상으로 하며, 단락 전류 발생 시 IGBT를 보호하기 위한 보조 회로를 포함한다. 단락전류 발생 조건에서의 부품 스트레스를 반영하기 위해 PSA(Part Stress Analysis) 기법과 동작 위험성을 고려한 FTA(Fault Tree Analysis)를 이용하여 신뢰성을 분석한다. FTA와 PSA 고장률의 차이로부터 시험평가 시스템의 동작 특성에 따른 고장률을 도출하고, 두 가지의 고장 라이브러리 적용에 따른 신뢰성 차이를 정량적으로 제시한다.

1. 서론

MVDC에 사용되는 MMC(Modular Multilevel Converter)의 구성 요소 중 서브모듈은 MVDC의 전력변환 및 송전에 있어서 중요한 역할을 담당한다. 따라서 서브모듈 시험평가시스템에 대한 신뢰성 분석은 MVDC의 안전한 운영을 위해 필수적이다.

본 논문의 분석대상인 서브모듈 시험평가시스템은 2kV급 직류 전원을 바탕으로 단락 사고 발생 시 사고 전류로부터 서브모듈 스위치인 IGBT를 보호하는데 주목적을 두고 있다. 이를 위해 시험평가시스템은 동작 제어 장치 및 보조회로가 포함된다. 본 논문은 서브모듈 시험평가시스템을 대상으로 MIL-HDBK-217F와 FIDES 2009 고장 라이브러리를 이용하여 PSA, FTA 고장률 분석기법을 적용한다. 이를 통해 두 가지 고장 라이브러리와 분석기법을 통해 고장률 차이를 정량적으로 제시하고, 신뢰성을 분석한다.

1.1 서브모듈 시험평가시스템 구성

그림 1은 서브모듈에 단락전류가 발생하였을 때 서브모듈을 보호하기 위한 보조회로가 포함된 시험평가시스템 회로이다. 2kV의 V_{dc}를 기준으로 시험회로에서 단락전류는 최대 6500A 까지 증가하며, IGBT보호 전류 기준은 1500A이다. 따라서 1500A이상의 전류가 IGBT를 통해 흐르게 되면 사이리스터(Thy)로 구성된 보조회로가 동작하여 전류를 전원단 커패시터 C 와 인덕터 L₁, L₂로 우회시킨다.

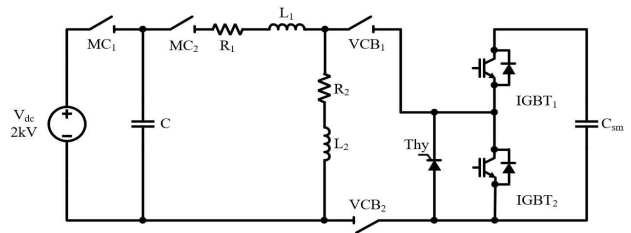


그림 1 서브모듈 단락전류 시험평가시스템 회로
 Fig. 1 Circuit diagram of submodule short circuit current test and evaluation system

2. 서브모듈 시험평가시스템 신뢰성 분석

2.1 MVDC 서브모듈 시험평가 신뢰성 분석 기준

본 논문에서 시스템이 동작하는 주변 온도는 40°C, 사이리스터 및 IGBT의 동작온도는 60°C를 기준으로 분석한다. 품질 등급과 환경 등급은 각각 'lower', 'G_F' 로 선정한다. 이는 제조사를 명확히 알 수 없고, 통풍이 가능한 실내 환경을 뜻한다. 또한 FIDES 2009 고장 라이브러리는 MIL-HDBK-217F에서 고려하지 않는 사용자의 숙련도와 환경, 기계 등에 의한 우발적 고장에 대한 인자가 존재한다. 본 논문은 이러한 우발적 고장과 사용자에 대한 고장을 최소화 하여 분석을 진행한다.

2.2 PSA 분석을 통한 시험평가 시스템 신뢰성 평가

표 1 PSA를 이용한 서브모듈 시험평가시스템 고장률 분석
 Table 1 Analysis of failure rate of submodule test evaluation system using PSA

부품명	수량	MIL-HDBK-217F	FIDES 2009
		PSA failure/10 ⁶ [hours]	PSA failure/10 ⁶ [hours]
메인차단기	2	14.28	0.1915/0.21
회로차단기	2	14.28	0.21/0.1389
저항	2	4.294617458	0.624712142
인덕터	2	0.000813291	0.629360668
커패시터	1	0.732288858	0.35372588
서브모듈 커패시터	1	0.197905904	0.35372588
사이리스터	1	2.768350093	1.750249834
IGBT	2	9.475797909	1.809340829
총 고장률		88.35700217	9.335093
MTTF (Years)		1.291977414	12.22861

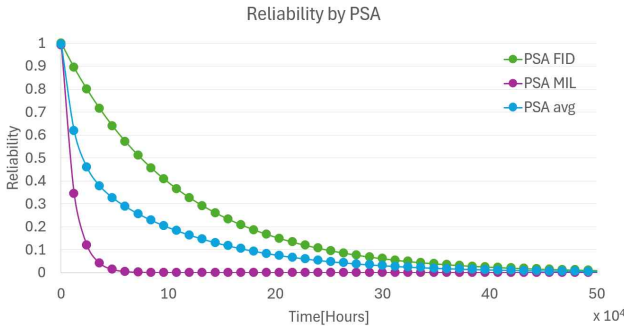


그림 2 PSA를 이용한 서브모듈 시험평가시스템 신뢰성 그래프
Fig. 2 Reliability graph of submodule test evaluation system using PSA

표 1은 MIL-HDBK-217F와 FIDES 2009 고장 라이브러리를 이용하여 각 시험평가 시스템의 고장률을 정량적으로 제시한다. 분석 결과, 대부분의 부품에서 FIDES 2009를 통해 얻은 고장률이 MIL-HDBK-217F에 비해 낮게 분석된다. 이는 시대 발전에 의한 부품 성능 개선과 고장률 평가 환경 차이에 의한 분석결과로 볼 수 있다.

따라서 그림 2에서 PSA를 통해 얻은 신뢰성 그래프는 근대 부품 및 평가 조건에서의 신뢰성과 가혹한 조건이 적용된 신뢰성 추이를 모두 나타낸다. 이를 통해 본 논문은 두 라이브러리를 통해 얻은 서브모듈 시험평가시스템의 평균 신뢰성을 제시함으로써 두 관점을 모두 고려한 신뢰성 추이를 제공한다.

2.3 FTA 분석을 통한 시험평가 시스템 신뢰성 평가

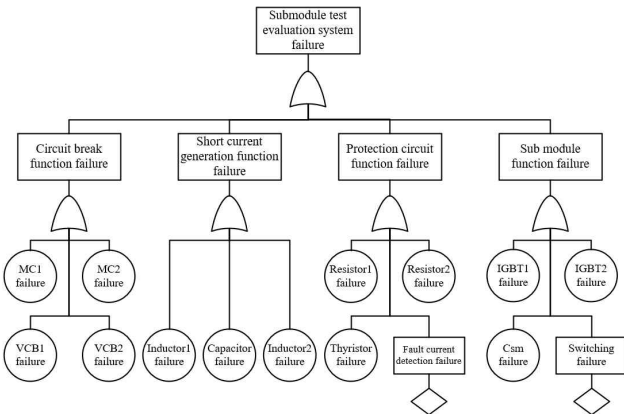


그림 3 서브모듈 시험평가시스템의 고장나무
Fig. 3 Fault tree in submodule test evaluation system

그림 3은 서브모듈 시험평가 시스템을 기능위주로 간소화한 FT(Fault Tree)이다. 이는 시험평가시스템에서 동작할 수 있는 모든 기능을 제시하고, 이를 수행하지 못하는 하부 원인을 부품단위까지 세분화하여 분석한다. 따라서 FTA는 부품 및 스트레스 인자만을 고려하여 분석하는 PSA기법과 다르게 시스템의 동작위험성까지 고려하여 수명을 예측할 수 있다.

표 2와 그림 4는 두 고장라이브러리를 활용하여 FTA로 분석한 시험평가 시스템의 정량적인 고장률과 시간 경과에 따른 신뢰성 그래프를 제시한다. FTA의 경우 시스템의 동작위험성까지 고려하기 때문에 PSA에 비해 약 30% 정도 높은 고장률을 보인다.

표 2 FTA를 이용한 서브모듈 시험평가시스템 고장률 분석
Table 2 Analysis of failure rate of submodule test evaluation system using FTA

기능명	MIL-HDBK-217F	FIDES 2009
	FTA failure/10 ⁶ [hours]	FTA failure/10 ⁶ [hours]
회로 차단 기능	57.1187765	0.750564
고장 전류 생성 기능	0.7339035	1.612446
보호 회로 동작 기능	25.63338069	4.809007
서브모듈 동작 기능	33.42913473	5.781737
총 고장률	116.9108917	12.95370027
MTTF (Years)	0.976429565	8.812559249

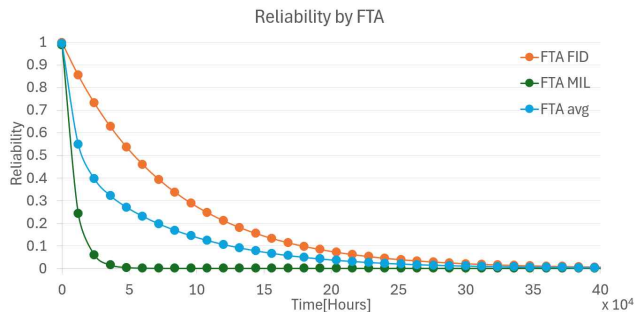


그림 4 FTA를 이용한 서브모듈 시험평가시스템 신뢰성 그래프
Fig. 4 Reliability graph of submodule test evaluation system using FTA

3. 결론

본 논문은 두 가지 고장 라이브러리와 고장률 분석 기법을 이용하여 2kV급 서브모듈 시험평가시스템의 신뢰성을 분석한다. MIL-HDBK-217F의 경우 FIDES 2009와 비교했을 때 PSA, FTA에서 모두 약 10배 높은 고장률을 보인다. 이는 부품의 품질 개선과 고장률 평가조건에 의한 고장률 차이로 분석된다. 또한 본 논문은 종합적인 해석을 위해 평균 신뢰성 추이를 도출하여 시험평가 시스템의 평균 수명이 5.827년임을 제시한다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022550000120, 특고압 직류배전용 계측진단 및 신뢰성평가 기술개발)

참고 문헌

[1] Military Handbook - Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F Notice 2, Feb 1995.
[2] "FIDES guide 2009", Reliability Methodology for Electronic Systems Edition A, Sept. 2010.