

PSA와 FTA를 이용한 MVDC 서브 모듈 및 밸브 시험평가 시스템의 신뢰성 분석

조재성¹, 강필순¹, 김종수², 김태진³
 경상국립대학교¹, 대전대학교², 한국전기연구원³

Reliability analysis of MVDC sub-module and valve test evaluation system using PSA and FTA

Jae-seong Jo¹, Feel-soon Kang¹, Jong-soo Kim², Tae-Jin Kim³
 Gyeongsang National University¹, Daejin University², Korea Electrotechnology Research Institute³

ABSTRACT

MVDC 시스템의 수명예측을 위해서는 서브 모듈 및 밸브에 대해 가혹 환경 조건에서 고장 분석이 필요하다. 본 논문은 MVDC 서브 모듈과 밸브의 열악한 운전조건을 만들기 위한 시험평가 테스트 회로를 구성하고 이에 대한 신뢰성을 분석한다. 테스트 회로는 단상 밸브 스테이션을 Back-to-Back 방식으로 연결하며, 과전류 생성을 위한 보조 회로부를 가진다. 시스템의 동작 환경과 위험도를 고려한 고장률 분석을 수행하기 위해 PSA(Part Stress Analysis) 기법과 FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 적용한다. 두 분석 기법의 차로부터 동작 위험도에 따른 고장률을 도출한다.

1. 서론

현재 MMC(Modular Multi-level Converter)를 이용하여 MVDC(Medium-Voltage Direct Current)에 대한 연구가 진행되고 있다. MVDC 시스템의 신뢰성과 수명예측을 위해 서브 모듈 및 밸브 단위의 정상동작 테스트가 필요하다. 열악한 운전 조건에서 밸브의 스위칭 기능을 검증하기 위해 시험평가 테스트 회로를 구성하고 이에 대한 신뢰성을 분석한다. 부품 종류, 부품 개수만을 고려해서는 정확한 고장분석을 할 수 없다. 본 논문에서는 시스템의 동작 환경과 위험도를 고려하기 위해 PSA(Part Stress Analysis) 기법과 FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 적용한다. FIDES 2009의 고장라이브리리를 이용하여 부품의 품질, 부품의 사용 환경에 대한 스트레스 인자를 고려하여 가혹한 환경 조건에서의 부품 고장률을 산출하고 시스템의 MTBF(Mean Time Between Failures)를 예측한다.

2. MVDC 밸브 시험평가 시스템 신뢰성 분석

2.1 시험평가 테스트 회로 구조

그림 1은 MVDC 밸브를 시험평가하기 위한 테스트 회로이다. 한 밸브 당 21개의 하프 브리지 서브모듈과 시험 전류를 생성하기 위한 인덕터와 저항이 포함된다. 시험전류는 밸브 A1, A2와 밸브 B1, B2가 서로 상보 동작을 하면서, LC공진으로 인해 형성된다. BTB(Back-to-Back)으로 연결된 레그 A와 레그 B의 위상변경을 통해 시험전류의 크기를 조절할 수 있다. BTB의 입력단은 DC 40kV, 커패시터의 정격 전압은 4kV, 출

력전압은 $V_{rms}=14kV$ 이며, 스위칭 주파수는 1kHz, 전력용량은 100MW급이다.

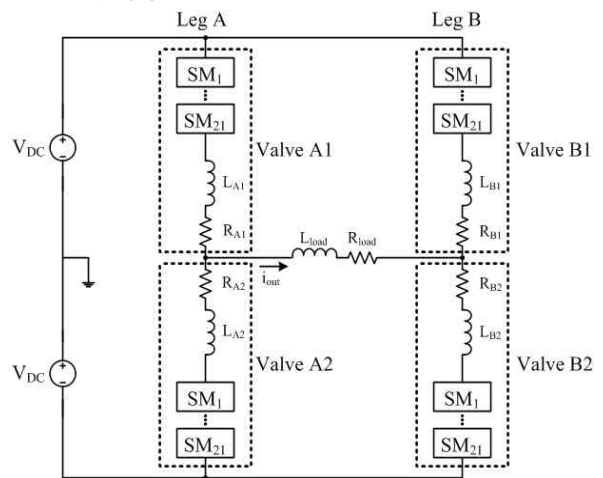


그림 1 MVDC 밸브 시험평가 시스템
 Fig. 1 MVDC valve test evaluation system

2.2 시험평가 테스트 회로에 대한 FTA

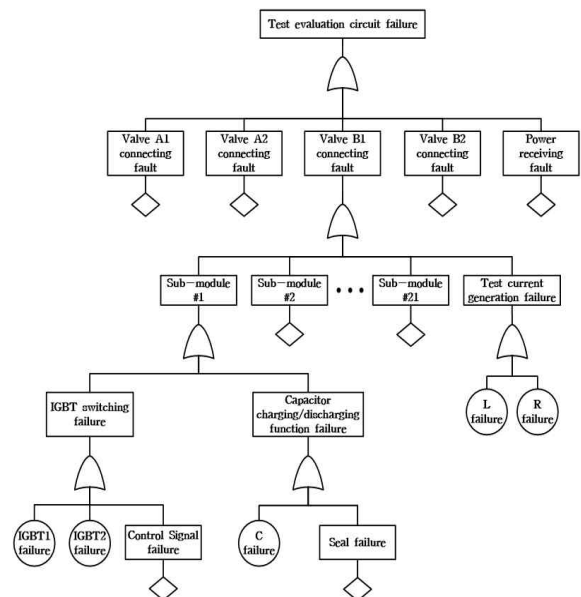


그림 2 시험평가 테스트 회로의 고장나무
 Fig. 2 Fault tree of test evaluation circuit

그림 2는 시험평가 테스트 회로의 고장나무를 나타낸다. 최상위 고장을 정상출력 범위 이탈로 정의하고 하위고장을 [밸브 연결고장]과 [출력단 기능 고장]으로 구분하여 설계한다. 밸브 연결 고장은 [서브모듈 고장]과 [시험 전류 발생 기능 고장]으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 서브모듈의 여유율을 고려하지 않기 때문에 21개의 서브모듈 중 하나라도 고장이 일어나면 밸브 고장으로 이어진다. 서브 모듈 고장은 [IGBT 스위칭 고장]과 [커패시터의 충/방전 기능 고장]으로 나눌 수 있다. 최하위 고장은 모듈을 구성하는 부품 고장물로 선정한다.

2.3 시험평가 테스트 회로에 대한 PSA

PSA는 부품의 기본 고장률, 부품 수, 부품의 품질 등을 고려한 고장률 분석 기법이다. 부품의 작동 환경에 따라 스트레스 인자를 고려할 수 있지만 시스템의 동작특성을 반영할 수 없다.

FTA와 PSA를 시험평가 테스트 회로에 적용하기 위해서는 시스템의 주요 부품에 대한 고장률을 계산해야한다. 본 논문에서는 FIDES 2009의 고장 라이브러리를 사용한다. 각 부품의 고장률은 식 (1)과 같이 물리적 스트레스를 나타내는 $\lambda_{Physical}$, 부품 품질을 나타내는 Π_{PM} 과 부품 사용 환경 대한 $\Pi_{Process}$ 의 인자들로 산출한다. 표 1에서 IGBT, 커패시터(전해), 인덕터, 저항의 물리적 스트레스 인자의 정의식 보여준다. $\Pi_{induced}$ 는 과응력의 기여를 나타내는 스트레스 인자이다. 계산한 고장률을 기반으로 PSA와 FTA의 고장률 및 MTBF를 표 2에 정리하였다.

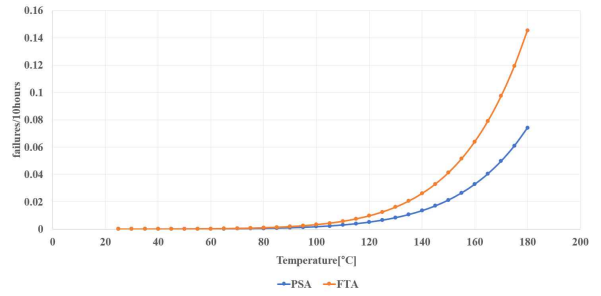
$$\lambda = \lambda_{physical} \times \Pi_{PM} \times \Pi_{Process} \quad (1)$$

표 1 FIDES 2009에 의한 물리적 스트레스 인자 정의식
Table 1 Definition of physical stress factors by FIDES 2009[1]

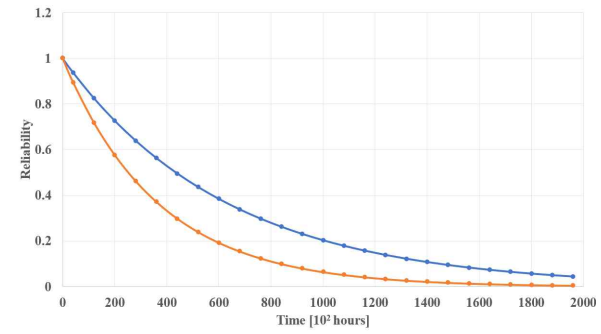
Part	$\lambda_{Physical}$ failure rate definition
IGBT	$\left(\lambda_{0TH} \times \Pi_{Thermal} + \lambda_{0TCyCase} \times \Pi_{TCyCase} \right) \times \left(\Pi_{induced} \right) + \lambda_{0TCySolder\ joints} \times \Pi_{TCySolder\ joints} + \lambda_{0RH} \times \Pi_{RH} + \lambda_{0Mech} \times \Pi_{Mech}$
C	$\lambda_{0Cap} \times \left(\Pi_{Thermo} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mech} \right) \times \left(\Pi_{induced} \right)$
L	$\lambda_{0Magnetic} \times \left(\Pi_{Thermo} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mech} \right) \times \left(\Pi_{induced} \right)$
R	$\lambda_{0Resistance} \times \left(\Pi_{Thermo} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mech} \right) \times \left(\Pi_{induced} \right)$

표 2 PSA와 FTA를 이용한 시험평가 시스템 고장률 및 MTBF 비교
Table 2 Comparison of failure rate and MTBF of test evaluation system using PSA and FTA

Temp. [°C]	PSA		FTA	
	Failures /10h	MTBF (Years)	Failures /10h	MTBF (Years)
25	0.0000159	71.484667	0.0000247	46.109556
60	0.0001594	7.1590284	0.0002748	4.1540914
85	0.0007486	1.5248397	0.0013664	0.8354491
120	0.0051028	0.2237084	0.0097330	0.1173377
180	0.0740913	0.0154073	0.1454339	0.0079006



(a)



(b)

그림 3 PSA와 FTA를 이용한 고장률 및 신뢰도 분석비교, (a) 온도에 따른 고장률, (b) 신뢰도

Fig. 3 Comparison of failure rate and reliability analysis using PSA and FTA, (a) failure rate according to temperature, (b) reliability

그림 3(a)에서 온도에 따른 PSA와 FTA의 고장률을 비교하였다. 약 120°C이상부터 FTA의 고장률이 PSA보다 확연히 높은 고장률을 보인다. 두 분석기법의 고장률 차이는 동작 위험도에 의해 차이 나는 것으로 볼 수 있다. 그림 3(b)는 시스템 동작온도 60°C를 기준으로 PSA와 FTA의 신뢰도를 분석하였다. FTA의 고장률이 더 높기 때문에 PSA보다 낮은 신뢰도를 보인다. PSA의 신뢰도가 0.4로 감소하는데 약 55,000hours 소요되고, FTA의 신뢰도는 약 33,000hours 소요된다.

3. 결론

본 논문에서는 PSA와 FTA를 이용하여 MVDC 밸브 시험평가 시스템을 신뢰성 분석한다. FTA의 고장률은 PSA보다 높은 고장률을 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 고장률의 차이는 더 커지며, 180°C에서 약 2배의 차이를 보인다. 시스템의 동작 위험도 차이에 따른 신뢰도 결과를 도출하였으며, 약 4~7년 사이의 시스템 수명이 예측된다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20225500000120, 특고압 직류배전용 계측진단 및 신뢰성평가 기술개발)

참고 문헌

[1] "FIDES guide 2009", Reliability Methodology for Electronic Systems Edition A, Sept. 2010.