

HVDC 풀-브리지 서브모듈의 동작 조건과 여유율을 고려한 수명예측

Life-cycle estimation of HVDC full-bridge sub-module considering operational condition and redundancy

강 필 순^{*★}, 송 성 근^{**}

Feel-soon Kang^{*★}, Sung-Geun Song^{**}

Abstract

The life-cycle prediction of the sub-module which is the unit system of MMC is very important from the viewpoint of maintenance and economic feasibility of HVDC system. However, the life-cycle prediction that considers only the type, number and combination of parts is a generalized result that does not take into account the operating condition of the sub-module, and may significantly differ from the life-cycle of the actual one. Therefore, we design a fault tree for the purpose of reflecting the operation characteristics of the full-bridge sub-module and apply the MIL-HDBK-217F to the failure rate of the basic event to predict the life-cycle of the full-bridge sub-module. It compares the life-cycle expectancy of the conventional failure rate analysis with the proposed fault-tree analysis and compares the lifetime according to whether the redundancy of the full-bridge sub-module is considered.

요 약

풀-브리지 서브모듈은 MMC의 단위 시스템으로서 서브모듈에 대한 수명예측은 HVDC 시스템의 유지 보수와 경제성 확보 관점에서 매우 중요하다. 그러나 일반적으로 부품의 종류, 개수, 결합 상태만을 고려하는 수명 예측은 대상 시스템의 구동 상태를 고려하지 않는 일반화 된 결과로 실제 시스템의 수명과 크게 차이가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성을 반영하기 위한 목적으로 고장나무를 설계하고 기본 사상의 고장률에 MIL-HDBK-217F를 적용하여 풀-브리지 서브모듈의 수명을 예측한다. 기존의 부품고장률 분석과 제안된 고장나무 분석에 의한 기대 수명을 비교하고, 풀-브리지 서브모듈의 여유율 적용 여부에 따른 수명을 비교한다.

Key words : Failure-rate, Fault-tree analysis (FTA), Full-bridge, High voltage direct current (HVDC), Meantime between failure (MTBF), Modular multilevel converter (MMC), sub-module

1. 서론

* Dept. of Electronics and Control Engineering, Hanbat National University

** Energy conversion research center, Korea Electronics Technology Institute

★ Corresponding author

E-mail : feelsoon@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1172
Manuscript received Nov. 29, 2019; revised Dec. 21, 2019;
Accepted Dec. 26, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

MMC(Modular multilevel converter)를 구성하는 서브모듈에 의한 전력변환과 전력공급은 HVDC(High voltage direct current) 시스템의 기본 역할로서 고신뢰성의 회로 토폴로지의 선정이 중요하다. 따라서 반도체 스위칭 소자와 커패시터의 동작 환경에 따른 위험도 분석은 서브모듈의 신뢰성 개선을 위해 매우 중요하다[1]-[3].

전력변환시스템의 신뢰성 예측의 방법으로 Part count 모델, 결합모델, Markov 모델, 이항분포

(Binominal distribution) 모델을 적용할 수 있다 [4]~[7]. Part-count 모델은 부품레벨에서 개별 부품의 고장률이 사용 기간 동안 일정하고 모든 소자와 서브시스템이 직렬구조를 가진다는 가정을 기반으로 예측한다. Part-count 모델을 확장하여 이중화 시스템의 신뢰성 예측을 가능하게 하는 결합 모델이 소개되었지만 이는 서브시스템의 고장률, 소자의 고장순서, 구조변경 등의 세부사항의 반영이 어려운 문제를 가진다. Markov 모델은 고장이 빈번한 시스템의 고장률 정량화에 유용하지만 소자들의 시간 가변성 고장률이 있을 때 시스템의 신뢰성을 평가하지 못하며 상태공간이 부품 수에 따라 기하급수적으로 증가하는 문제를 가진다. 이항분포 모델은 확률분포에 기반을 둔 신뢰성 분석 방법으로 시스템의 고장을 확률적으로 분석하여 신뢰성을 평가하는 방법으로 드무아브르 방정식을 이용하여 계산한다. 상기 언급된 신뢰성 모델은 전력변환시스템 자체의 신뢰성 해석은 가능하지만 전력변환시스템의 동작 특성을 고려한 신뢰성 분석에는 부족하다. 서브모듈의 회로 토폴로지 구조 및 동작 상태를 상세하게 반영하여 보다 정확하고 현실적인 수명 예측 및 위험도를 분석 기법이 필요하다.

본 논문에서는 서브모듈 특성에 따른 신뢰성 분석과 동작 조건에 따른 위험도를 보다 정확하게 분석하고, 이들 분석된 결과를 바탕으로 풀-브리지 서브모듈의 수명을 예측한다. 첫째, 풀-브리지 서브모듈의 동작 모드를 분석하여 고장과 고장모드, 고장의 영향을 분석한다. 둘째, 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성을 고려한 고장나무(Fault-tree)를 설계하고 구동온도 조건을 고려한 고장률을 계산한다. 셋째, MIL-STD-217F를 기반으로 단순 부품 고장률과 서브모듈 동작 특성을 고려한 고장나무 분석(Fault-tree analysis, FTA)을 통한 고장률을 비교, 분석하고 서브모듈 구동 조건과 여유율(Redundancy) 적용여부에 따른 고장평균시간을 제시한다.

II. 풀-브리지 서브모듈 구조 및 동작특성

풀-브리지 서브모듈을 적용한 3상 MMC 방식에서 각 상(phase)에 연결되는 서브모듈의 개수는 MMC의 출력전압 크기와 여유율(Redundancy) 조

건에 의해 결정된다. 풀-브리지 서브모듈에 사용되는 IGBT는 4.5[kV], 1200[A] (1000[A] 사용 조건으로 설계 마친 결정), IGBT junction 온도는 125[°C] 기준으로 방열판을 설계한다. IGBT의 내부 바디다이오드 대신 성능이 우수한 다이오드를 사용하며 전압과 전류 정격은 IGBT와 동일하다. 커패시터는 고전압, 대전력용의 Metalized 필름 커패시터를 적용하며 동작온도는 -40~85[°C], 연속 동작전압은 2160~2640[V], 정격전압은 2750[V]이다. 또한 컨버터 룸에는 공조 설비로 주변온도를 20~30[°C]로 제어하는 환경에서 수명 예측을 진행한다.

그림 1은 풀-브리지 서브모듈의 회로 구조를 나타낸다. 4개의 IGBT 소자와 4개의 다이오드, 1개의 커패시터로 구성된다.

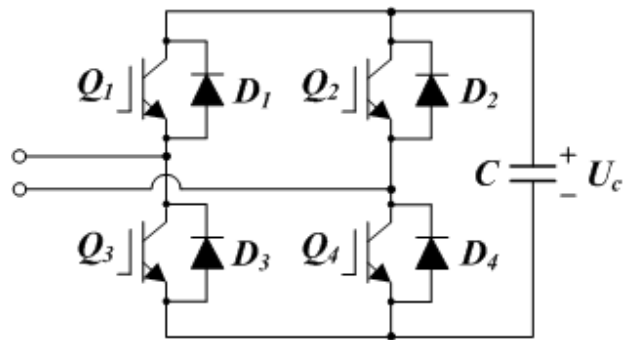
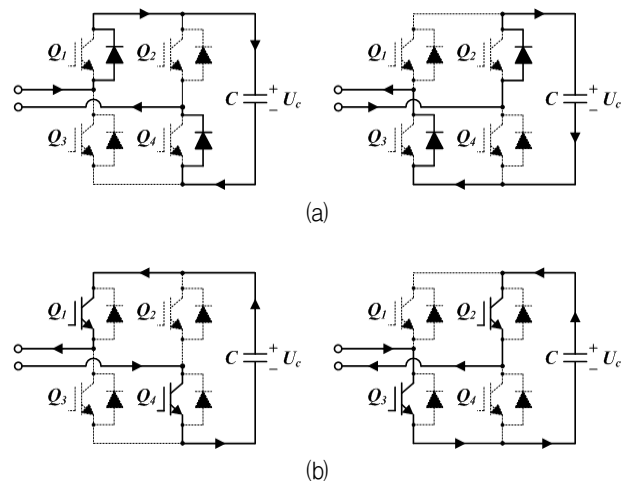


Fig. 1. Circuit configuration of full-bridge sub-module. 그림 1. 풀-브리지 서브모듈의 회로 구조

풀-브리지 구조의 서브모듈 구동 상태에 따른 고장 조건을 고장나무 설계에 반영하기 위해서 그림 2에서와 같이 풀-브리지 구조의 서브모듈 동작 상태를 분석한다.



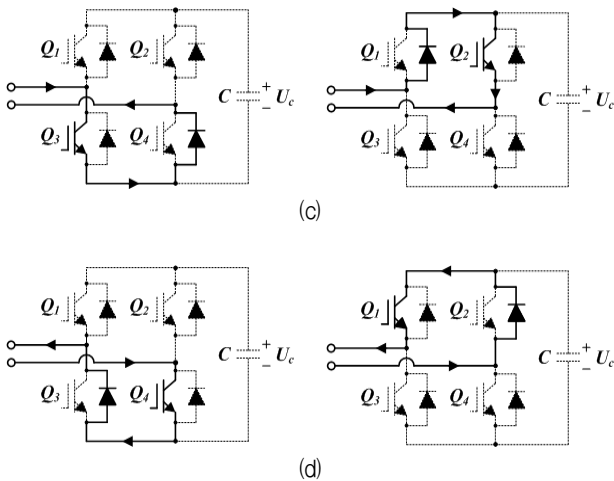


Fig. 2. Operational mode, (a) charging capacitor, (b) discharging capacitor, (c) capacitor disconnecting when current flowing into capacitor, (d) capacitor disconnecting when current flowing from capacitor.

그림 2. 동작모드, (a) 커패시터 충전, (b) 커패시터 방전, (c) 커패시터로 충전전류가 흐를 때 커패시터 분리, (d) 커패시터로부터 방전전류가 흐를 때 커패시터 분리

풀-브리지 서브모듈의 커패시터와 컨버터가 결합되는 상태에서 전류 방향에 따라 커패시터의 충전과 방전이 결정된다.

그림 2(a)는 다이오드 D1, D4 (또는 D2, D3)를 통해 서브모듈의 커패시터를 충전하는 상태로 IGBT와 역방향으로 결합된 다이오드가 쌍을 이루어 동작한다. 서브모듈의 커패시터가 충전되는 조건에서 보면 둘 중 하나의 다이오드 쌍이 고장 나더라도 커패시터의 충전은 가능하므로 두 쌍 모두 고장이 발생했을 때 상위 단계로 고장이 전파되어 100[%]의 여유율 조건이 성립된다. 그림 2(b)는 IGBT를 통해 서브모듈의 커패시터가 방전하는 상태로 서브모듈의 커패시터와 컨버터가 결합되는 조건이다. IGBT Q1, Q4 (또는 IGBT Q2, Q3)가 쌍을 이루어 동작하므로 서브모듈의 커패시터가 방전되는 조건에서 보면 둘 중 하나의 IGBT 쌍이 고장 나더라도 커패시터의 방전은 가능하므로 두 쌍 모두 고장이 발생했을 때 상위 단계로 고장이 전파되는 100[%]의 여유율 조건이 성립된다. 그림 2(c)는 서브모듈 방향으로 커패시터 충전전류가 흐를 때 서브모듈과 컨버터와의 결합을 끊기 위해 IGBT Q2 (또는 IGBT Q3)를 도통시킨 상태이다. IGBT Q3이 도통하는 조건에서는 다이오드 D4와 같이 동작하게 된다. 또한 IGBT Q2가 도통하는 조건에서는 다이오

드 D1과 같이 동작하게 된다. 만약 동일 암(arm)의 상단, 하단의 IGBT가 동작하거나 Short, Open 상태로 인해 서브모듈 고장을 발생시킬 수 있다. 그림 2(d)는 서브모듈에서 컨버터 방향으로 커패시터 방전전류가 흐를 때 서브모듈과 컨버터와의 결합을 끊기 위해 IGBT Q4 (또는 IGBT Q1)를 도통시킨 상태이다. IGBT Q4가 도통하는 조건에서는 다이오드 D3와 같이 동작하게 된다. 또한 IGBT Q1이 도통하는 조건에서는 다이오드 D2와 같이 동작하게 된다. 동일 암(arm)의 상단, 하단의 IGBT가 동작하거나 Short, Open 상태라면 서브모듈 고장이 발생한다.

III. 풀-브리지 서브모듈의 고장나무분석

그림 3은 풀-브리지 서브모듈의 구동 특성을 고려한 고장나무를 나타낸다. 그림 3(a)는 [Capacitor connecting fault] 사상을 중심으로 그림 3(b)는 [Capacitor disconnecting fault] 사상을 기준으로 나타낸다.

그림 3(a)의 [Capacitor connecting failure]은 커패시터 충전[Capacitor charging fault] 상태의 고장과 방전[Capacitor discharging fault] 상태에서의 고장으로 구분하여 설계한다. [Capacitor charging failure]의 고장은 다시 [Capacitor charging function failure]과 [IGBT reverse current flowing failure]로 구분된다. [Capacitor charging function failure]은 커패시터 자체고장인 [Capacitor failure], 커패시터스 변화에 의한 [Drift], 외함파괴인 [Seal failure]로 고장의 원인을 구분한다. [Diode current flowing failure]는 다이오드 D1/D4와 D2/D3가 쌍으로 동작하는 이중 구조로 여유율 100[%] 조건을 만족한다. 따라서 하위 고장인 [Diode D1/D4 current flowing failure]와 [Diode D2/D3 current flowing failure]는 AND Gate로 결합된다. [Diode Dx/Dx current flowing failure] 사상과 같이 다이오드를 통해 커패시터를 충전하는 구간의 고장은 전류 패스에 위치하는 다이오드 자체의 고장에 의해 발생되거나 다이오드와 동일 암(arm)에 연결되는 IGBT의 자체고장[IGBT Qx failure], 제어신호 오류[Control Signal Failure], IGBT collector-source 간 단락[collector-source shorted]에 의해 고장이 발생할 수 있다. [Capacitor discharging fault]의 고장은

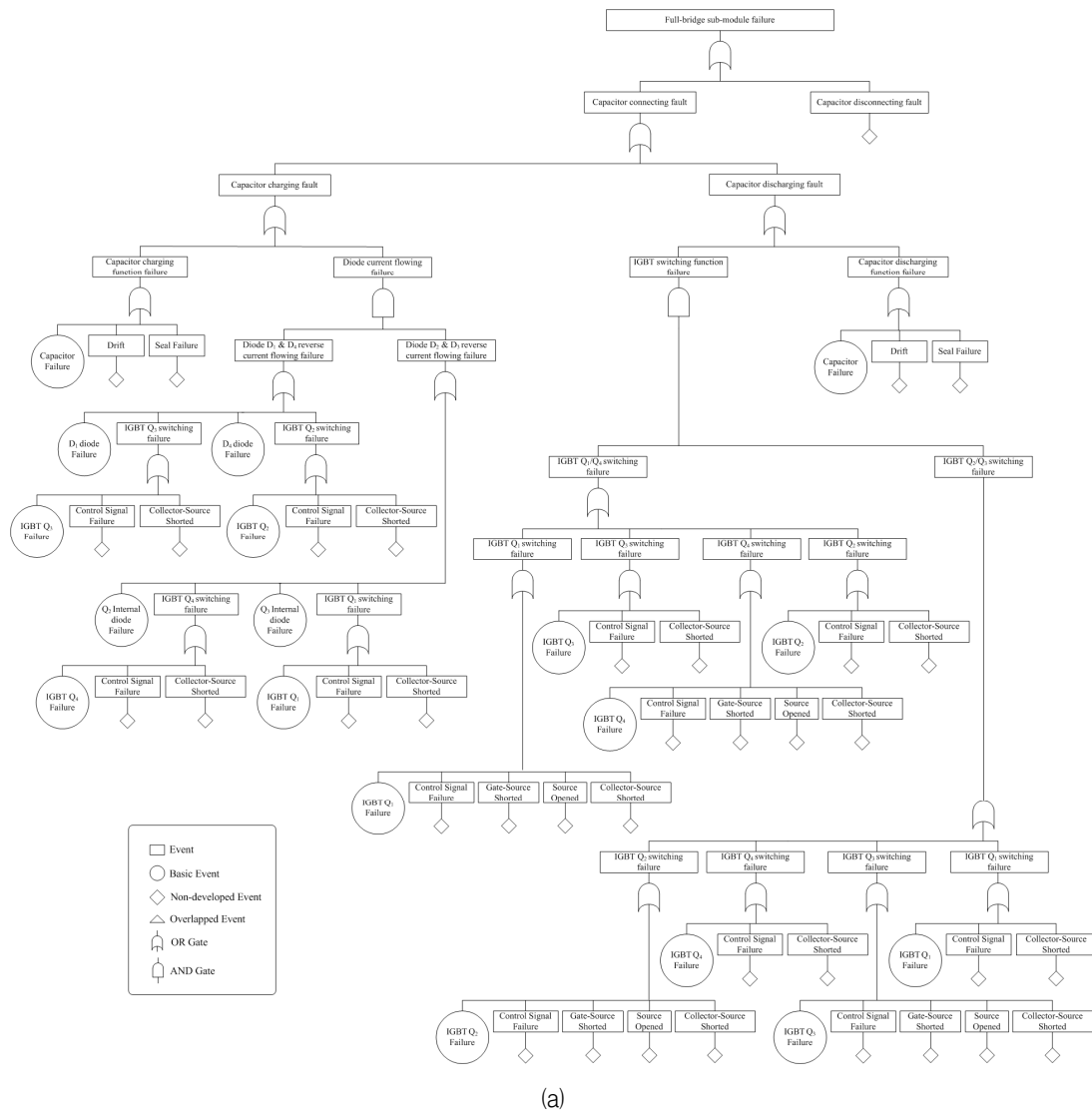


Fig. 3. Fault-tree of full-bridge sub-module, (a) [Capacitor disconnecting fault], (b) [Capacitor connecting fault].
 그림 3. 풀-브리지 서브모듈의 고장나무, (a) [Capacitor disconnecting fault], (b) [Capacitor connecting fault]

[Capacitor discharging function failure]과 [IGBT switching function failure]로 구분된다. [Capacitor discharging function failure]은 커패시터 자체고장인 [Capacitor failure], 커패시턴스 변화에 의한 [Drift], 외함파괴 [Seal failure]로 고장의 원인을 구분한다. [IGBT switching function failure]는 IGBT Q1/Q4 과 IGBT Q2/Q3가 쌍으로 동작하는 이중 구조로 여유율 100[%] 조건을 만족한다. 따라서 하위 고장인 [IGBT Q1/Q4 switching failure]와 [IGBT Q2/Q3 switching failure]은 AND gate에 의해 상위 고장으로 연결된다. [IGBT Qx/Qx switching failure] 고장은 쌍으로 동작하는 IGBT Qx의 스위칭 실패 [IGBT Qx switching failure]에 의해 발생되거나 동일 암(arm)에 연결되는 IGBT Qx의 고장

[IGBT Qx switching failure]에 의해 발생한다. 스위치 ON 상태를 유지해야 하는 IGBT에 의한 고장 [IGBT Qx switching failure]은 IGBT Qx의 자체 고장[IGBT Qx failure], 제어신호 오류[Control Signal Failure], IGBT gate-source 간 단락인 [gate-source shorted], IGBT source 측 개방상태인 [Source opened], IGBT collector-source 간 단락[collector-source shorted]에 의해 고장이 발생한다. 동일 암 (arm)에서 스위치 OFF 상태를 유지해야 하는 IGBT에 의한 고장 [IGBT Qx switching failure]은 IGBT Qx의 자체고장[IGBT Qx failure], 제어신호 오류[Control Signal Failure], IGBT collector-source 간 단락[collector-source shorted]에 의해 발생한다. 그림 3(b)의 [Capacitor disconnecting fault]은 컨

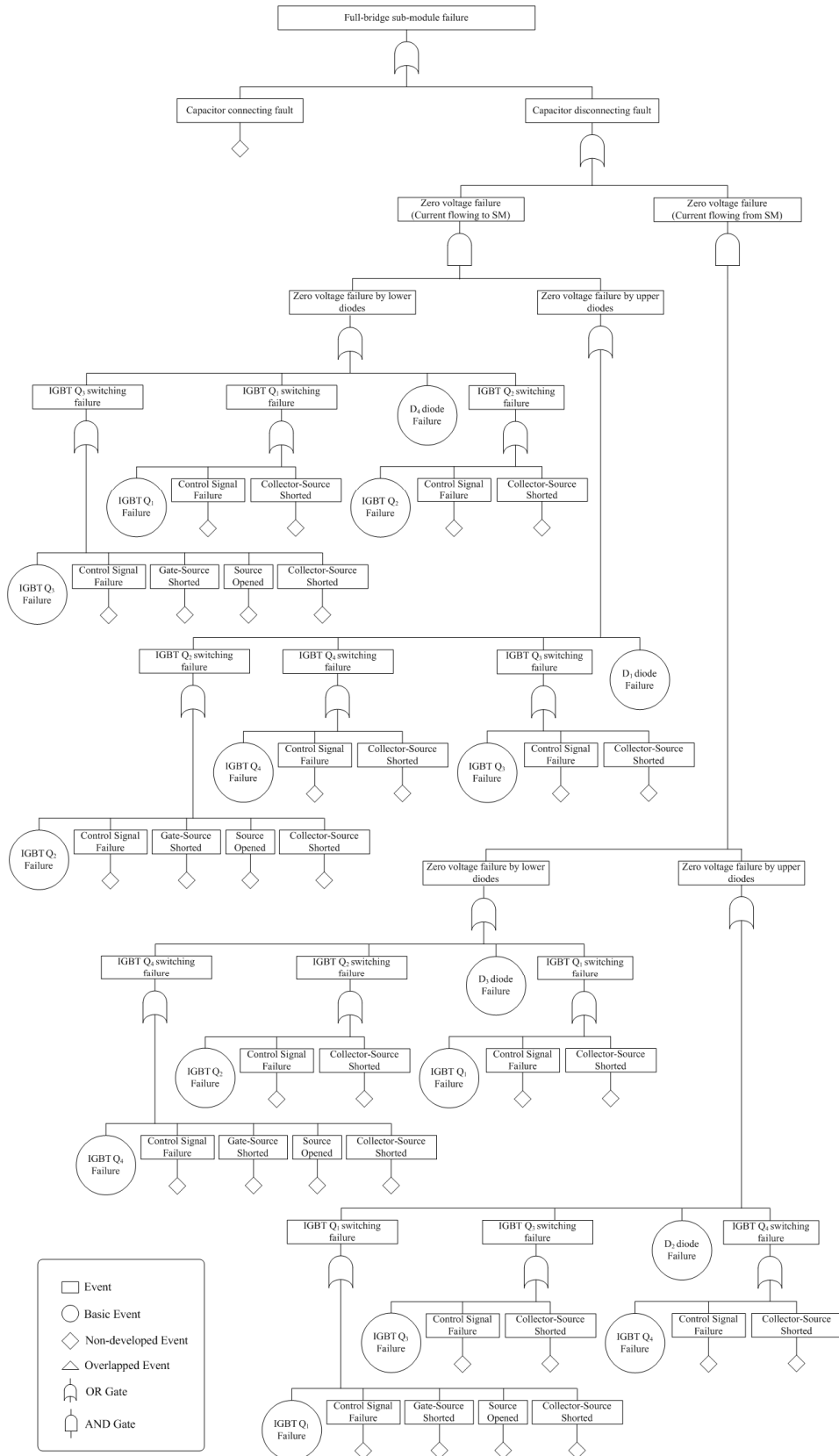
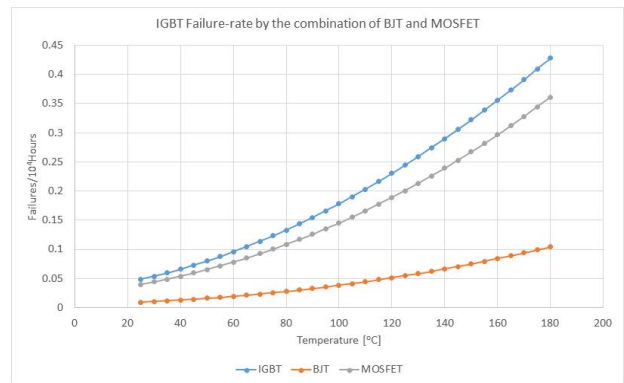


Fig. 3. Continued.
 그림 3. 계속

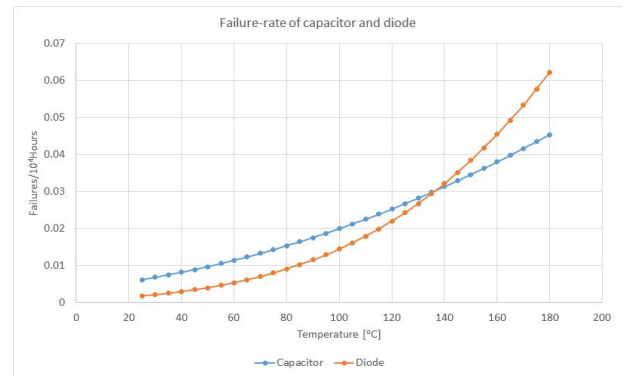
버터에서 서브모듈로 전류가 흐르는 상태에서 영전압을 생성하는 기능의 실패인 [Zero voltage failure (current flowing to SM)]와 서브모듈에서 컨버터로 전류가 흐르는 상태에서 영전압을 생성하는 기능 실패[Zero voltage failure (current flowing from SM)]로 구분된다. [Zero voltage failure (current flowing to SM)] 고장은 다시 [Zero voltage failure by lower diodes]와 [Zero voltage failure by upper diodes]로 구분되며 두 사상은 100[%] 여유율 조건인 AND Gate 구조로 두 사상 모두가 고장이 발생할 경우 상위 고장이 발생된다. [Zero voltage failure by lower diodes]는 각 암(arm)의 하단에 위치하는 다이오드에 의한 영전압 생성에 실패하는 고장으로 해당 IGBT의 턴-온 스위칭에 실패하는 [IGBT Qx switching failure], 동일 암(arm)의 상단 IGBT Qx의 이상 동작으로 인한 고장인 [IGBT Qx switching failure], 해당 다이오드 자체의 고장 [Dx diode failure], OFF 상태를 유지해야하는 IGBT Qx의 턴-온 동작에 의해 발생하는 고장인 [IGBT Qx switching failure]의 하위 사상을 가진다. [Zero voltage failure by upper diodes]는 각 암(arm)의 상단에 위치하는 다이오드에 의한 영전압 생성에 실패하는 고장으로 [Zero voltage failure by lower diodes]와 쌍대적이다. 서브모듈에서 컨버터로 전류가 흐르는 상태에서 영전압을 생성하는 기능에 실패하는 [Zero voltage failure (current flowing from SM)] 고장도 상·하단 IGBT의 동작을 기준으로 [Zero voltage failure by lower IGBTs]와 [Zero voltage failure by upper IGBTs] 사상으로 구분하며 두 사상은 100[%] 여유율 조건인 AND Gate 구조로 두 사상 모두가 고장이 발생할 경우 상위 고장이 발생된다.

3.1 MIL-HDBK-217F를 이용한 부품 고장률

풀-브리지 서브모듈의 설계 변수를 이용하여 MIL-HDBK-217F에 의해 온도 변화에 따른 부품 고장률을 분석하면 그림 4와 같다. IGBT는 MIL-HDBK-217F에 고장률이 주어지지 않으므로 BJT와 MOSFET의 직렬구성으로 고장률을 분석한다 [8],[9]. IGBT의 고장률이 가장 크며, 커패시터의 고장률은 온도 변화에 거의 선형적임을 알 수 있고, 다이오드는 가장 낮은 고장률을 보이지만 140 [°C] 이상에서는 고장률이 크게 증가함을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 4. Part failure-rate obtained by MIL-HDBK-217F, (a) IGBT, (b) diode, capacitor.

그림 4. MIL-HDBK-217F를 이용한 부품 고장률, (a) IGBT, (b) 다이오드, 커패시터

3.2 고장나무분석-여유율 적용

MIL-HDBK-217F에 의해 획득된 부품 고장률을 그림 3의 고장나무에 반영하여 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성을 고려한 고장률을 계산한다.

IGBT, 다이오드, 커패시터의 기본 고장률을 제외한 나머지 사상에 대한 고장률은 부품 고장률 중 가장 작은 값의 1[%]를 반영하여 전체 고장률에 대한 영향을 최소화 시킨다. 이는 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성을 고려할 때 대부분의 고장은 IGBT, 다이오드, 커패시터 자체의 고장으로부터 발생되며 기타 부수적인 고장의 원인에 의한 영향은 매우 작기 때문이다.

표 1은 여유율 100[%] 조건이 고려된 풀-브리지 서브모듈을 고장나무를 기반으로 분석한 고장률이다. 25[°C]에서 0.094[Failures/10⁴h]를 나타내어 평균고장시간은 106234시간으로 12.13년의 수명이 예상되며 180[°C]에서는 0.99[Failures/10⁴h]의 고장률을 나타내어 평균고장시간으로 보면 10093시간으로 1.15년의 기대 수명을 예상한다.

Table 1. Failure rate of full-bridge sub-module using fault-tree considering redundancy.

표 1. 여유율을 고려한 풀-브리지 서브모듈의 고장나무 기반 고장률

| Temperature [°C] | Failures /104Hours | MTBF (Hours) | MTBF (Year) |
|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| 25 | 0.094131891 | 106233.9227 | 12.12716013 |
| 85 | 0.490407004 | 20391.22589 | 2.327765512 |
| 125 | 0.821593507 | 12171.46912 | 1.389437114 |
| 180 | 0.990776859 | 10093.08999 | 1.152179223 |

3.3 고장나무분석-여유율 미적용

본 장에서는 그림 3의 풀-브리지 서브모듈의 고장나무에서 여유율(Redundancy)을 고려하지 않고 분석하기 위해 AND Gate로 결합되는 부분을 OR Gate로 변경하여 서브모듈 고장률을 계산하여 여유율(Redundancy) 효과를 확인한다.

Table 2. Failure-rate of full-bridge sub-module using fault-tree (No consideration for redundancy).

표 2. 여유율을 고려하지 않은 풀-브리지 서브모듈의 고장나무 기반 고장률

| Temperature [°C] | Failures /104Hours | MTBF (Hours) | MTBF (Year) |
|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| 25 | 0.713498946 | 14015.43765 | 1.599935805 |
| 85 | 0.979103584 | 10213.42395 | 1.165915976 |
| 125 | 0.999098639 | 10009.02174 | 1.14258239 |
| 180 | 0.99999200 | 10000.00800 | 1.141553425 |

25[°C]에서 0.713[Failures/10⁴h]를 나타내어 평균 고장시간은 1.6년의 매우 낮은 수명이 예상되며 60[°C] 이상에서는 0.9[Failures/10⁴h] 이상의 높은 고장률을 나타낸다. 이는 풀-브리지 서브모듈은 여유율 100[%] 조건을 고려하지 않으면 기본 부품 수 증가에 비례하여 전체 고장률이 상승함을 보여주는 결과이다.

3.4 부품고장률 분석-여유율 미적용

본 장에서는 풀-브리지 서브모듈의 부품 종류와 개수, 그리고 결합 상태만을 고려한 단순 고장률을 계산한다. 단순 고장률 계산에 있어 풀-브리지 서브모듈이 4개의 IGBT, 4개의 다이오드, 1개의 커패시터로 구성되고 이 들 중 하나의 부품이라도 고장이 발생하면 서브모듈의 고장으로 볼 수 있으므로

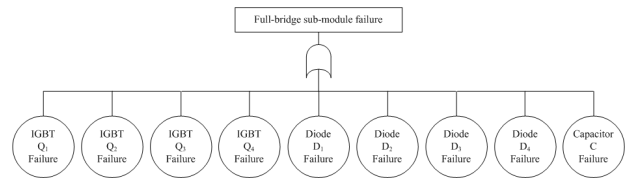


Fig. 5. Failure dependency between parts in full-bridge sub-module.

그림 5. 풀-브리지 서브모듈의 부품 간 고장 관계

각 부품은 그림 5와 같이 병렬관계의 고장 특성을 가진다. 따라서 각 부품의 고장률을 OR 연산을 통해 계산하면 서브모듈의 고장률과 평균고장시간은 표 3과 같다.

25[°C]에서 0.19 [Failures/10⁴h]를 나타내어 평균 고장시간은 52341시간으로 5.98년의 수명이 예상되어 FTA 분석 결과와 비교하여 시스템 수명이 증가함을 알 수 있다. 풀-브리지 서브모듈의 수명이 FTA 결과와 비교하여 상대적으로 증가하는 이유는 서브모듈의 구동에 따른 위험성을 반영하지 않아 발생하는 결과로 볼 수 있다.

Table 3. Failure-rate of full-bridge sub-module considering the kind of parts, the number of parts, and configurations.

표 3. 풀-브리지 서브모듈의 부품 종류, 개수, 결합을 고려한 부품고장률

| Temperature [°C] | Failures /104Hours | MTBF (Hours) | MTBF (Year) |
|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| 25 | 0.191053118 | 52341.46445 | 5.97505302 |
| 85 | 0.492270519 | 20314.03387 | 2.318953638 |
| 125 | 0.712616017 | 14032.80275 | 1.601918122 |
| 180 | 0.920894916 | 10859.00229 | 1.239612134 |

3.5 부품고장률 분석-여유율 적용

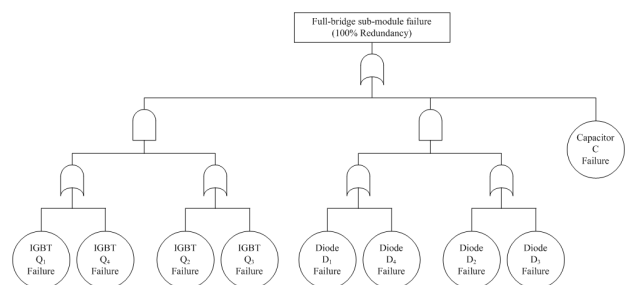


Fig. 6. Failure dependency between parts in full-bridge sub-module when considering redundancy.

그림 6. 풀-브리지 서브모듈의 여유율을 고려한 부품 신뢰도

본 장에서는 풀-브리지 서브모듈의 부품 개수, 결합 상태, 그리고 100[%] 여유율을 고려한 풀-브리지 서브모듈의 고장률을 계산한다. 풀-브리지 서브모듈에 추가 부품을 사용하지 않고 스위칭 패턴의 변경을 통해 대체 운전이 가능한 상태에서 고장률을 분석한다.

부품 여유율을 고려하게 되면 풀-브리지 서브모듈은 각각 4개의 IGBT와 다이오드 중 쌍을 이루어 동작하는 IGBT Q1/Q4(Diode D1/D4)와 IGBT Q2/Q3(Diode D2/D3) 중 한 쌍이 고장이 발생하더라도 다른 한 쌍으로 기본 동작이 가능하므로 여유율(Redundancy) 100[%]의 조건이 가능하다. 따라서 그림 6과 같이 IGBT와 다이오드는 두 쌍 모두가 고장이 발생해야만 상위 고장으로 전파되는 AND Gate로 결합되는 구조이다. 또한 IGBT, 다이오드 쌍이 모두 고장이 발생하거나 커패시터의 고장이 발생하면 서브모듈의 고장이 되므로 OR Gate 결합 구조를 가진다. IGBT 모듈과 다이오드의 여유율을 고려한 풀-브리지 서브모듈의 고장률을 AND와 OR Gate의 연산을 통해 계산하면 서브모듈의 고장률과 평균고장시간은 표 4와 같다.

Table 4. Failure-rate of full-bridge SM considering the redundancy of IGBT and diode pats.

표 4. 풀-브리지 서브모듈의 IGBT, 다이오드 부품의 여유율을 고려한 부품 고장률

| Temperature [°C] | Failures /104Hours | MTBF (Hours) | MTBF (Year) |
|------------------|--------------------|--------------|-------------|
| 25 | 0.015057020 | 664142.0622 | 75.81530390 |
| 85 | 0.086713378 | 115322.4596 | 13.16466434 |
| 125 | 0.207876532 | 48105.47833 | 5.49149296 |
| 180 | 0.484904248 | 20622.62815 | 2.354181296 |

여유율을 고려한 부품 고장률의 경우 25[°C]에서 0.015[Failures/10⁴h]의 낮은 고장률을 보여 평균고장시간(MTBF)은 664142시간으로 75.82년의 긴 수명이 예상되어 단순 부품 개수를 고려한 고장률 및 FTA 분석 결과와 비교하여 시스템 수명이 가장 높게 분석됨을 알 수 있다. 풀-브리지 서브모듈의 수명이 단순 부품 개수를 고려한 고장률의 결과와 비교하여 상대적으로 크게 증가하는 이유는 IGBT, 다이오드의 여유율을 고려함에 의해 발생하는 결과이다.

3.6 고장률과 평균고장시간 비교

그림 7은 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성과 여유율 반영한 고장나무 분석에 의한 고장률(FTA-Full Failure 100% redundancy®)과 여유율을 반영하지 않은 FTA 고장률(FTA-Full Failure), 단순 부품 개수를 고려한 고장률(Part-Full failure), 부품 고장률에 여유율을 고려한 고장률(Part®Full Failure)과 각각의 평균고장시간(MTBF)을 비교한다.

풀-브리지 서브모듈 중 가장 낮은 고장률을 나타내는 부품 고장률에 여유율을 고려한 고장률(Part®Full Failure)은 25~180[°C] 온도에서 0.015~0.485[Failures/10⁴h]의 낮은 고장률과 작은 고장률 변동 폭을 나타낸다. 이는 IGBT와 다이오드 모듈 쌍의 100[%] 여유율 확보에 따라 IGBT에 의한 고장률이 큰 폭으로 저감되어 전체 풀-브리지 서브모듈의 고장률이 크게 줄어든 결과로 볼 수 있다.

부품 수, 부품 종류, 부품 간 연결 조건만을 고려한 고장률(Part-Full failure)은 25~180[°C] 온도 변화에 따라 0.19~0.92[Failures/10⁴h]의 고장률 변동 폭을 가지며 온도 증가에 대하여 거의 선형적으로 증가한다.

여유율을 고려한 FTA 분석 결과(FTA-Full Failure 100% redundancy®)는 25~180[°C] 온도 변화에 따라 0.094~0.99[Failures/10⁴h]의 고장률 변동으로 분석되어 단순 부품의 개수를 고려하여 산출한 고장률(Part-Full failure) 보다 상대적으로 넓은 폭의 고장률 변동을 확인할 수 있다.

80[°C] 이하에서는 여유율을 고려하지 않은 단순 부품 고장률(Part-Full failure)이 여유율과 서브모듈 동작 특성을 고려한 FTA 고장률(FTA-Full Failure 100% redundancy®)에 비해 높게 나타나지만 90[°C] 이상에서는 서브모듈 동작 특성을 고려한 FTA 고장률이 더 높아진다. 이는 FTA 결과(FTA-Full Failure 100% redundancy®)가 서브모듈 동작 위험성을 충분히 고려하기 때문에 온도 증가에 따라 고장률의 기울기가 가파르게 나타난다고 볼 수 있다.

FTA에서 여유율을 고려하지 않으면(FTA-Full Failure) 25~180[°C] 온도 변화에 따라 0.71~0.99 [Failures/10⁴h]의 높은 고장률을 나타낸다. 분석된 고장률 중 가장 큰 값을 나타내는 것은 서브모듈 동작 특성을 고려함과 동시에 여유율까지 적용되지 않아 나타나는 결과이다.

그림 7(b)의 여유율을 고려한 단순 부품고장률

(Part®Full Failure)로 산출한 평균고장시간이 다른 방식의 고장률에 의한 MTBF 보다 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 25[°C] 105년의 수명은 비현실적인 결과이다. 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성 및 위험도를 반영한 고장률(FTA-Full Failure 100% redundancy®)의 경우 25[°C]에서 41.68년의 장수명을 보장하는 것으로 분석된다.

러된 예측 수명이며 만약 여유율 제어가 적용되지 않을 경우에는 동일 온도 조건에서 0.713 [Failures/10⁴h]를 나타내어 평균고장시간은 14015시간으로 1.6년의 매우 낮은 수명이 예상되므로 풀-브리지 서브모듈을 HVDC에 적용할 경우에는 여유율 적용과 낮은 온도 환경이 중요함을 확인할 수 있다.

References

[1] J. Guo, J. Liang, X. Zhang, P. D. Judge, X. Wang, and T. C. Green, "Reliability Analysis of MMCs Considering Submodule Designs with Individual or Series-Operated IGBTs," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.32, no.2, pp.666-677, 2017. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2572061

[2] J. Xu, P. Zhao, and C. Zhao, "Reliability Analysis and Redundancy Configuration of MMC With Hybrid Submodule Topologies," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.31, no.4, pp.2720-2729, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2444877

[3] Y. Dong, H. Yang, W. Li, and X. He, "Neutral-Point-Shift-Based Active Thermal Control for a Modular Multilevel Converter Under a Single-Phase-to-Ground Fault," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol.66, no.3, pp.2474-2484, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2833019

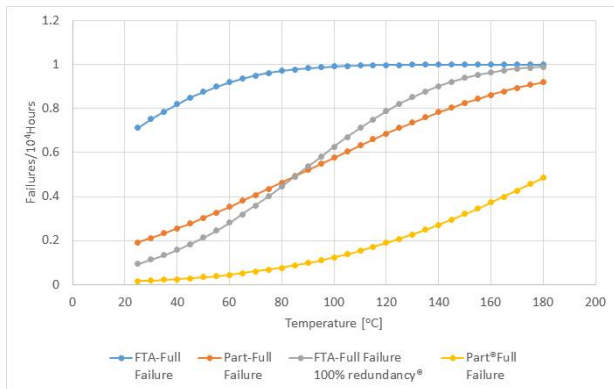
[4] W. Denson, "The history of reliability prediction," *IEEE Trans. reliability*, vol.47, no.3, pp.321-328, 1998. DOI: 10.1109/24.740547

[5] Y. D. Wang and B. F. Song, "Overview of system reliability prediction method," *Aircraft Design*, vol.28, no.1, pp.37-42, 2008.

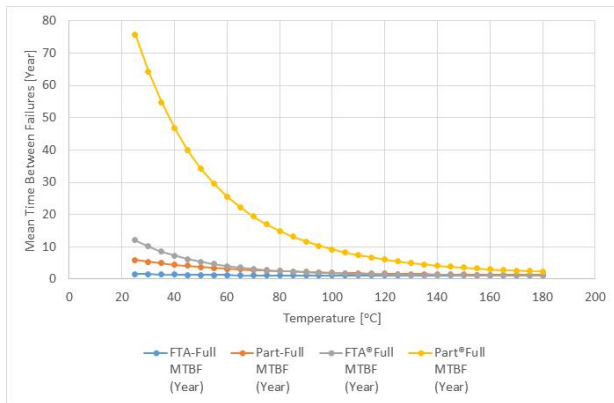
[6] J. Jones and J. Hayes, "A comparison of electronic-reliability prediction models," *IEEE Trans. Reliability*, vol.48, no.2, pp.127-134, 1999. DOI: 10.1109/24.784270

[7] M. J. Cushin, D. E. Mortin, T. J. Stadterman, and A. Malhotra, "Comparison of Electronics-Reliability Assessment Approaches," *IEEE Trans. Reliability*, vol.42, no.4, pp.542-546, 1993. DOI: 10.1109/24.273574

[8] *Reliability prediction of electric equipment*, Department of Defense, Washington DC, Tech.



(a)



(b)

Fig. 7. Comparison of failure-rate and MTBF according to the variation of temperature, (a) failure-rate, (b) mean time between failures.

그림 7. 온도 변화에 따른 고장률과 평균고장시간 비교, (a) 고장률, (b) 평균고장시간

III. 결론

본 논문에서는 풀-브리지 서브모듈의 동작 특성을 분석하고 이를 고장나무에 반영하였으며 MIL-HDBK-217F의 부품 고장률을 고장나무에 반영하여 전체 시스템의 고장률을 분석하였다.

컨버터 룸의 온도가 평균 25[°C]로 유지된다면 0.094[Failures/10⁴h]를 나타내어 12.13년의 수명을 예측할 수 있었다. 이는 여유율 100[%] 조건이 고

Rep. MIL-HDBK-217F, 1991.

[9] H. Lambilly and H. O. Keser, "Failure Analysis of Power Modules: A Look at the Packaging and Reliability of Large IGBT's," *IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Tech.*, vol.16, pp.412-417, 1993.

DOI: 10.1109/IEMT.1992.639922

BIOGRAPHY

Feel-soon Kang (Member)



2000 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
 2003 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
 2004~Present : Professor in Electronics and Control Engineering, Hanbat National University.

Sung-Geun Song (Member)



1998 : BS degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.
 2000 : MS degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.
 2007 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.

2007~Present : Senior Researcher, Energy conversion research center, Korea Electronics Technology Institute.