

MMC기반의 전압형 HVDC 밸브의 여유율 결정

김찬기[†], 최순호¹, 강지원¹, 윤용범¹

The Valve Redundancy Determination for HVDC Converter based on Modular Multilevel Converter

Chan-Ki Kim[†], Soon-Ho Choi¹, Ji-Won Kang¹, and Yong-Bum Yoon¹

Abstract

This paper examines the reliability of a VSC-HVDC valve based on a modular multilevel converter (MMC) HVDC system. The main objective of this paper is to determine the redundancy of the MMC valve. Several prediction methods are introduced, but the binomial failure method is selected to be used. To determine the availability and reliability prediction of MMC valve, which comprises a DC/DC converter, a gate driver, a capacitor, and an IGBT, the failure data of the MMC module are used as the tracking data according to the experimental result. This method uses a simplified equation to find the valve redundancy by transforming the binomial function to De Moivre's formula. This method is the first to be used to find the valve margin.

Key words: Reliability, HVDC Valve module redundancy, MMC(Modular Multilevel Converter)

1. 서 론

전력전자 시스템은 초창기 사이리스터 컨버터에서 시작하여 현재는 고성능 SMPS(Switching Mode Power Supply)와 고성능 전동기 구동시스템까지 발전하였다. 또한 전력전자분야의 시장은 초창기 수kV급 저압에서 시작하여 수백 kV급까지 확장되었기에, 세계적으로 년 수십조 단위의 평균 증가율을 보이고 있다.

전력전자설비는 기존의 변압기나 발전기와 다르게 제어와 반도체 소자 그리고 커패시터와 같은 수백 개의 소자로 구성되었기에 시스템의 성능은 신뢰도에 영향을 미치고 신뢰도는 시스템의 가격에 중요한 영향을 미친다. 전력전자시스템에서 신뢰도는 수명(Life Cycle)과 시스템의 예비율 혹은 시스템 마진의 형태로 반영되고 있으며, 대용량 시스템의 경우는 계약 단계에서 중요한 협상의 요소가 되고 있다. 대부분의 전력전자 시스템은 예비율이라는 개념이 존재하지만, 용량이 작은 경우에는 소자단위의 예비율이 중요한 요소를 차지하고, 용량이

큰 경우에는 설비단위의 예비율을 가지고 (N-1)개념의 설비운영을 도입하고 있다. 이러한 신뢰도와 수명 그리고 마진은 시스템의 가격과 품질 그리고 성능에 많은 영향을 미친다.

본 논문은 MMC기반의 전압형 HVDC시스템의 밸브의 마진 개수를 결정하는 방법을 시스템의 신뢰도에 바탕을 둔 방법을 이용하였다. 본 논문에서 제시하는 방법은 고장데이터를 이용해서 시스템의 신뢰도를 구하고, 신뢰도에 바탕을 둔 이항분포함수를 이용하여 MMC기반의 전압형 HVDC시스템의 밸브 마진을 구하였다. 본 논문의 구성은 1장 서론, 2장은 신뢰도에 대한 용어정리, 3장은 전력전자시스템의 신뢰도 그리고 4장은 실제 적용 및 결론으로 구성하였다.

2. 신뢰도에 관계된 용어 설명^{[1],[2]}

시스템의 성능과 신뢰성을 평가하고 개선하는데 있어서 첫 번째 단계는 시스템을 평가하는 각각의 기준이 타당성을 가지고 있는가 혹은 현실성을 가지고 있는가이다. 이러한 질문에서 시작하여 신뢰도가 하나의 학문 영역으로 발전하였으며, 시스템의 평가의 기준이 되는 것이 “신뢰도”이며 신뢰도에 관계된 용어로는 신뢰도(Reliability), 고장률(Failure Rate), 평균 고장시간(Mean Time To Failure), 평균 수리시간 (Mean Time To Repair), 이용율(Availavility)이다.

Paper number: TKPE-2016-21-4-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: chankikim@kepco.co.kr, KEPRI

Tel: +82-42-865-5873 Fax: +82-42-865-5879

¹ KEPRI

Manuscript received Feb. 16, 2016; revised Mar. 22, 2016; accepted May 26, 2016

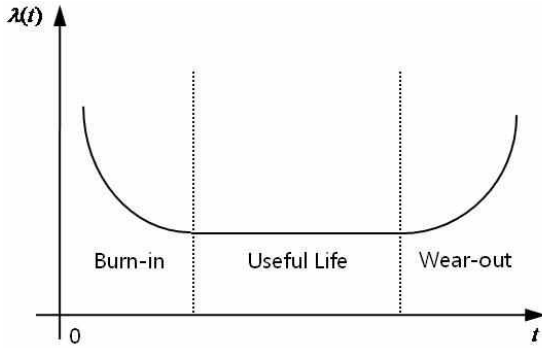


Fig. 1. Failure curve according to time function.

A. 신뢰도(Reliability)

신뢰도는 시스템의 구성요소가 정해진 기간 동안 주어진 운전환경에서 처음 설계된 기능을 안정적으로 수행하는 확률로 정의된다. “신뢰도 함수 $R(t)$ 는 시스템이 간격시간 $[0, t]$ 동안 고장없이 작동할 확률”이다. 신뢰도는 일반적으로 시간이 경과함에 따라 감소한다.

B. 고장률(Failure Rate)

시스템 구성요소의 고장률은 “시간이 경과된 이후 고장율”을 말하는 것으로 그림 1은 시간의 함수에 대한 일반적인 고장률에 대한 곡선을 보여준다. 시스템의 사용주기는 크게 3가지 영역으로 나뉠 수 있는데, 번-인 기간(Burn in Period), 유효수명기간(Useful Life Period), 웨어-아웃 기간(Wear Out Period)으로 구성된다. 시스템이 소자들이 다양한 시험을 통과하였고, 사용 전에 충분히 테스트를 통과하였음에도 불구하고 설계나 생산 과정에서 발견하지 못한 시스템 결함은 번-인 기간에서 높은 고장률로 나타나고 있으며, 시스템이 안정화(유효수명기간)가 되면 고장율은 급격히 감소하게 된다. 웨어-아웃 기간은 시스템의 수명연한을 보여주는 것으로 이 기간에는 시스템의 고장율이 높아지는 경향이 있다. 유효수명기간이 실질적인 시스템의 신뢰도를 분석을 하는 기간이며 우리가 관심을 갖는 기간이 되겠다.

고장률 $\lambda(t)$ 는 다음과 같이 신뢰도 함수 $R(t)$ 로 표현될 수 있다.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \tag{1}$$

식 (1)에서 $\Delta(t)$ 는 $\Delta(t) > 0$ 의 시간구간이며, 신뢰도 모델은 식 (2)와 같이 Exponential 함수로 표현된다. 식 (2)에서 시스템은 초기상태에서 완벽하게 작동한다는 것을 의미하는 경우에는 $R(0) = 1$ 로 표현할 수 있다.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \tag{2}$$

식 (2)에서 보여주는 신뢰도 모델은 시간에 독립적이란 가정하면, 즉, $\lambda(t) = \lambda$ 라고 가정하면, 식 (2)는 다음과 같이 단순화 된다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{3}$$

또한, 고장률(Failure Rate)는 단위시간 당 평균 고장 횟수로도 표현되는데, 시간에 대한 고장, 즉 FIT(Failure In Time)으로 표현된다.

$$1[FIT] = 10^{-9} [failure/hour] \tag{4}$$

C. 평균 고장시간(Mean Time To Failure)

평균 고장시간은 시스템의 소자가 고장 없이 동작하는 평균시간을 나타낸다. 평균 고장시간은 여러 가지 시스템을 비교하는데 성능 지표로 사용되는데 지표보다 더 오래 사용하는 경우에는 시스템을 신뢰할 수 없다는 것을 의미한다.

평균 고장시간과 신뢰도 함수 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$MTTF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \tag{5}$$

여기에서 $R(t)$ 는 신뢰도 함수이다. 고장률 $\lambda(t)$ 가 상수일 때, 평균고장시간의 표현은 다음과 같이 단순화 된다.

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \tag{6}$$

D. 평균 수리시간(Mean Time To Repair)

평균 수리시간(MTTR)은 고장을 제거하고, 시스템을 원래상태로 복구하는데 소요되는 평균 수리시간이다. 수리시간은 고장 진단과 분석 그리고 부품을 교체하는 시간을 포함한다.

E. 이용률(Availability)

이용률은 시스템이 주어진 시간에서 정상적으로 작동할 확률이다. 평균 이용률은 정해진 시간마다, 시스템을 수리하여, 시스템의 이용률을 높이는 개념으로, 평균 이용률은 다음과 같이 표현된다.

$$A_{avg} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{7}$$

식 (7)에서 이용율을 높이는 방법은 평균 고장시간(MTTF)을 줄이고 평균 수리시간을 줄이며 달성될 수 있다.

3. 전력전자 시스템의 신뢰도 모델^{[2][5]}

전력전자 시스템의 신뢰도 모델은 다음과 같이 4개의 모델이 문헌에서 보고되고 있다.

A. Part-count 모델 : part-count 모델은 다음과 같은 가정하에서 개발되었다.

○ 각각의 소자나 서브시스템에서 발생하는 고장이 전체 시스템의 고장으로 파악된다.

○ 소자레벨에서, 각각의 소자의 고장률은 useful life 기간 동안 일정하다고 가정한다.

○ 시스템은 모든 소자나 서브시스템이 직렬구조로 되어 있다.

Part-count 모델의 주요 장점은 단순함에 있다. 즉, part-count 모델은 작은 시스템에 대하여 적절한 신뢰도 평가를 할 수 있으며 이것은 설계 단계에서 상이한 전력전자 시스템 사이의 신뢰도 비교에 효과적인 방법이다.

B. 결합모델 : 결합모델은 Part-count 모델의 연장이며, 간단한 이중화 시스템의 신뢰도 분석을 위하여 사용할 수 있으나 결합모델의 단점은 서브시스템의 고장률, 소자의 고장 순서와 구조변경과 같은 세부사항을 반영하지 못하는 것이다.

C. Markov 모델 : Markov 모델은 시스템 구성에 대응하는 시스템 상태를 그림으로 표현한 것으로, 구성요소의 고장과 이러한 상태들 사이의 관계를 시퀀스로 이루어진다. 이 방법은 고장이 자주 나는 시스템의 신뢰도를 정량화하는데 아주 효과적인 접근방법이나, 소자들의 시간 가변성 고장률이 있을 때, 시스템 신뢰도를 평가하는데 사용될 수 없으며 상태공간이 부품들의 수에 따라 기하급수적으로 커진다는 것이다.

D. 이항분포(Binomial distribution) 모델 :

이항분포모델은 확률분포에 기반한 신뢰도 모델로써 시스템의 소자고장을 확률적으로 분석하여 신뢰도를 평가한 방식이다. 이 방식은 대규모의 소자가 직렬로 연결되어 있는 경우에 각각의 소자의 고장을 “1”과 “0”, 즉, “정상”과 “고장”으로 구분하여 시스템이 정상으로 동작하는 확률분포를 구하는 방식으로 수학적으로는 식 (8)과 같다.

$$p(x: True) = \frac{n!}{x!(n-x)!} \cdot \sum_{x=1}^n p^x (1-p)^{(n-x)} \quad (8)$$

여기서, p는 “정상”, n은 고장, x는 정상을 표현한다.

식 (8)은 간단한 경우의 수에서는 계산이 편리하나, 수 백개에 이르는 소자가 존재하는 경우에는 계산이

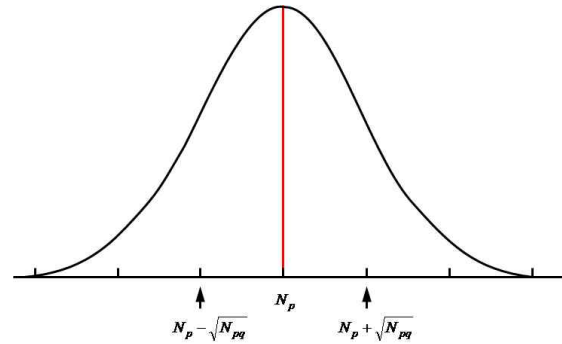


Fig. 2. Gaussian probability distribution.

복잡해지기 때문에 식 (9)와 같이 이항분포를 확률분포식으로 변환한 드르아브르의 방정식을 통하여 계산한다.

$${}_n C_k p^k q^{N-k} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi Npq}} e^{-\frac{(k-Np)^2}{2Npq}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

$$m = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + x_3 f_3 + \dots + x_n f_n}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - m)^2 f_1 + (x_2 - m)^2 f_2 \dots (x_n - m)^2 f_n}{N} \quad (9)$$

여기서, p는 “정상”, n은 고장, x는 정상을 표현하고, m은 평균, σ 는 표준편차 그리고 σ^2 는 분산을 말한다.

4. 전압형 HVDC 밸브 여유율 결정

2장과 3장에서 논한 내용을 기반으로 하여 전력전자 시스템의 수명을 평가하고, 보수유지시간이 결정되면, 수명에 따른 부품의 마진을 구할 수 있다.

본 논문에서는 이상에서 논한 내용을 기반으로 하여 전압형 HVDC 시스템의 밸브 마진과 전류형 HVDC 시스템의 밸브의 고장율을 분석하여 대책과 유지보수시간을 결정하였다.

그림 3은 MMC(Modular Multilevel Converter)기반의 전압형 HVDC 시스템을 보여주고 있으며, 그림 3 b)는 전압형 HVDC 밸브를 구성하는 서브모듈을 보여주고 있다. 현재 MMC기반의 전압형 HVDC는 서브모듈의 개수를 증가시킴으로써 용량을 증가시킬 수 있기 때문에 전압형 HVDC 시스템의 기본 Topology로 자리잡고 있다. 이때, 서브모듈의 개수를 결정할 때 단순히 정격전압과 서브모듈의 정격전압을 가지고 계산하는 것이 아니라 고장율과 유지보수율을 고려하여 밸브의 추가적인 마진을 계산하는 것이 본 논문의 주제이다.

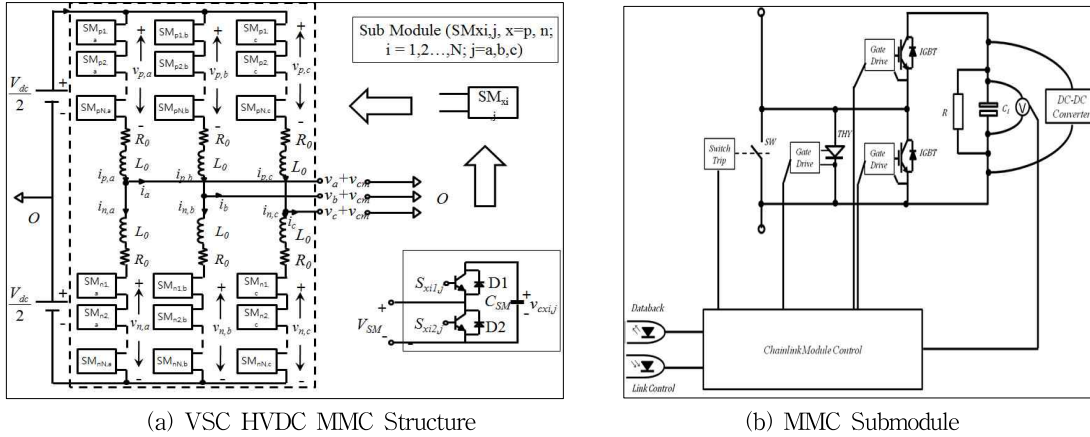


Fig. 3. Voltage source type HVDC structure.

TABLE I
COMPONENT'S FAILURE RATE OF MMC VALVE^{[11],[12]}

Component	No.	Failure Rate (FIT)	Total Failure Rate	Comments
Power circuit				
▶ IGBT and gate drive	2	40	80	Traction data
▶ Thyristor and gate drive	1	47	47	Traction data
▶ Switch and actuator	1	1000	1000	Traction data
▶ Film Capacitor	1	10	10	Traction data
▶ Power Resistor	1	265	265	Traction data
Control Panel				
▶ EPLD	1	150	150	Traction data
▶ Optical Comms	2	100	200	Traction data
▶ Crystal oscillator	1	13	13	Traction data
Power supply				
▶ Transformer	2	22	44	Traction data
▶ DC-DC converter	1	1000	1000	Traction data

그림 3에서 보여주는 MMC기반의 전압형 HVDC 시스템은 정격용량이 600[MW]이며, Monopole로써 정격전압이 600[kV]이며, 서브모듈을 구성하는 반도체 소자는 IGBT소자로써 1[kA]의 정격전류를 가진다. 이때, 서브모듈을 구성하는 IGBT소자의 전압을 1.6[kV], 1.8[kV] and 2[kV]를 구성하는 경우에는 각각의 경우에 대하여 다음과 같은 밸브의 수가 계산되어 진다.

표 1은 그림 3 b)의 서브모듈을 구성하는 소자들의 고장율을 보여주는 것으로 b점점 요소(평소에는 동작하지 않지만 고장이나 특수한 경우에만 동작하는 요소)를 제외한 나머지 요소들의 종합 신뢰도를 분석하면 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\lambda_M = \lambda_0 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}$$

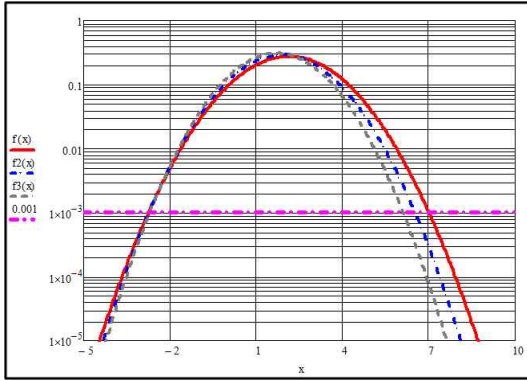
$$= 1.752 \times 10^3 (FIT)$$

$$\frac{1}{\lambda_M} = 64.744 (Year) \quad (10)$$

TABLE II
THE NUMBER OF REQUIRED VALVE

Rating	600[MW]/600[kV]	Module No.
Case 1	600[kV]/1.6[kV]	375
Case 2	600[kV]/1.8[kV]	334
Case 3	600[kV]/2.0[kV]	300

식 (10)은 밸브가 완전히 고장이 발생하는 시점이 64.744[년]이 경과된 시점이라는 것을 보여주며, 비가동율(Unavailability) $Q(t) = 1 - e^{-\lambda_M \cdot t}$ 를 이용하여 계산하면, 식 10에서 보여주는 시스템은 30년이 경과되면 37[%]의 밸브가 소손되고, 3년이 경과하는 경우에는 4.5[%]의 밸브가 소손된다는 점을 보여주고 있다. 여기에서 수리기간(μ)를 도입하여 평균 비가동율(Mean Unavailability) $Q_M(t) = \frac{\lambda_M}{\lambda_M + \mu} (1 - e^{-(\lambda_M + \mu)t})$ 를 도입하면, 수리기간(μ)에 따라 평균 비가동율이 포화된다는 점을 들 수 있다.



$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) = 0.00568$$

▶ 1 year maintenance

Module Voltage	Module No.	600[MW]/600[kV]
1.6[kV]	375	600[kV]/1.6[kV] 375
1.8[kV]	334	600[kV]/1.8[kV] 334
2.0[kV]	300	600[kV]/2.0[kV] 300

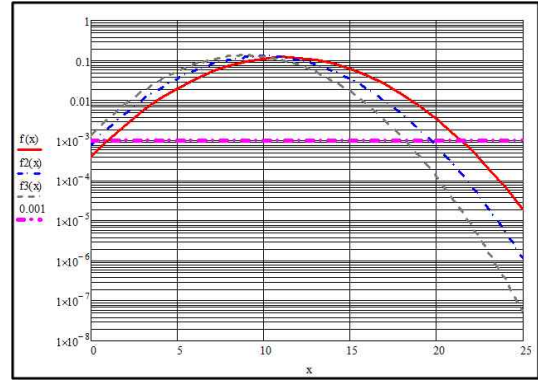
99.9[%] Reliability	
1.6[kV]	7
1.8[kV]	6
2.0[kV]	5

Fig. 4. Valve redundancy(maintenance per 1 year).

그림 4는 그림 3와 표 1에서 보여주는 시스템을 1년에 한번 유지보수를 하는 경우에 신뢰도를 보여주는 것으로 0.568[%]의 고장율을 보여주고 있다. 이 경우에 99.9[%]의 신뢰도를 얻기 위해서 필요로 하는 밸브의 추가적인 마진은 IGBT소자가 1.6[kV]인 경우에는 7개, 1.8[kV]인 경우에는 6개 그리고 2[kV]인 경우에는 5이다.

그림 5는 그림 3와 표 1에서 보여주는 시스템을 2년에 한번 유지보수를 하는 경우에 신뢰도를 보여주는 것으로 이 경우에는 2.9[%]의 고장율을 보이고 있으며, 99.9[%]의 신뢰도를 얻기 위해서는 IGBT소자에 다른 밸브의 추가적인 마진은 IGBT소자가 1.6[kV]인 경우에는 22개, 1.8[kV]인 경우에는 20개 그리고 2[kV]인 경우에는 17이다.

그림 6은 그림 3와 표 1에서 보여주는 시스템을 3년에 한번 유지보수를 하는 경우에 신뢰도를 보여주는 것으로 4.4[%]의 고장율을 보여주고 있다. 이 경우에 99.9[%]의 신뢰도를 얻기 위해서 필요로 하는 밸브의 추가적인 마진은 IGBT소자가 1.6[kV]인 경우에는 28개, 1.8[kV]인 경우에는 25개 그리고 2[kV]인 경우에는 20이다.



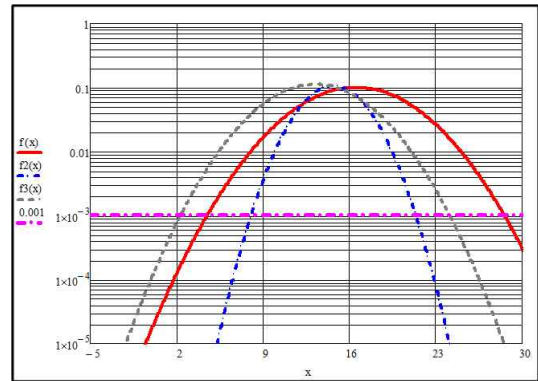
$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) = 0.0299$$

▶ 2 year maintenance

Module Voltage	Module No.	600[MW]/600[kV]
1.6[kV]	375	600[kV]/1.6[kV] 375
1.8[kV]	334	600[kV]/1.8[kV] 334
2.0[kV]	300	600[kV]/2.0[kV] 300

99.9[%] Reliability	
1.6[kV]	22
1.8[kV]	20
2.0[kV]	17

Fig. 5. Valve redundancy(maintenance per 2 year).



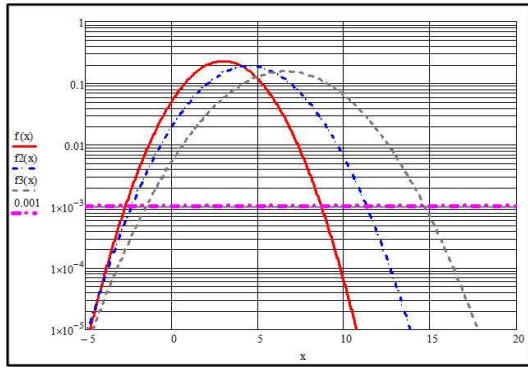
$$Q(t) = \frac{\lambda_M}{\lambda_M + \mu} (1 - e^{-(\lambda_M + \mu)t}) = 0.044$$

▶ 3 year maintenance

Module Voltage	Module No.	600[MW]/600[kV]
1.6[kV]	375	600[kV]/1.6[kV] 375
1.8[kV]	334	600[kV]/1.8[kV] 334
2.0[kV]	300	600[kV]/2.0[kV] 300

99.9[%] Reliability	
1.6[kV]	28
1.8[kV]	25
2.0[kV]	20

Fig. 6. Valve redundancy(maintenance per 3 year).



$$Q(t) = \frac{\lambda_M}{\lambda_M + \mu} (1 - e^{-(\lambda_M + \mu)t}) = 0.011 : \mathbf{1 \text{ year maintenance}}$$

$$Q(t) = \frac{\lambda_M}{\lambda_M + \mu} (1 - e^{-(\lambda_M + \mu)t}) = 0.015 : \mathbf{2 \text{ year maintenance}}$$

$$Q(t) = \frac{\lambda_M}{\lambda_M + \mu} (1 - e^{-(\lambda_M + \mu)t}) = 0.022 : \mathbf{3 \text{ year maintenance}}$$

1 year	7
2 year	12
3 year	15

Fig. 7. Valve redundancy.
(FIT Chngement of DC/DC converter)

그림 7은 위에서 분석한 방법과 다르게 표 1에서 보여주는 고장율 중에서 DC/DC 컨버터의 고장율을 1000[FIT]에서 500[FIT]로 줄인 경우, 밸브의 추가적인 마진이 어떻게 바뀌는지는 보여주고 있다. DC/DC 컨버터의 고장율을 줄인 경우에서 1년에 한번 유지보수하는 경우에는 고장율이 1.1[%]이며, 2년에 한번 유지보수하는 경우에는 1.5[%] 그리고 3년에 한번 유지보수하는 경우에는 2.2[%]로 바뀌기 때문에 2[kV]급 IGBT소자를 기반으로 하는 경우에는 밸브의 추가적인 마진이 7개와 12개 그리고 15개가 필요함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 전력전자시스템의 수명(Life Cycle)과 관련된 논문으로써 MMC기반의 전압형 HVDC 밸브의 마진을 결정하는 내용을 담고 있다. 일반적으로 전력전자 시스템의 신뢰도는 이항정리(Binomial Distribution)모델을 사용하나, MMC와 같이 수백 개의 밸브의 경우에는 계산이 어렵기 때문에 본 논문에서는 이항정리를 드르와 브르 함수로 변형하여 신뢰도를 구하였으며, 계산된 신뢰도를 바탕으로 하여 MMC기반의 전압형 HVDC 밸브의 마진을 결정하였다.

본 논문에 자료를 제공하여 준 (GE(구) Alstom)사의 Mike 박사와 Ashiraf 씨에게 감사를 전합니다.

References

- [1] High Voltage Direct Current Handbook, EPRI, 1994
- [2] Y. Zang, X. Wang, B. Xu, and J. Liu, "Control method for cascaded H-bridge multilevel inverter failures," in *Proc. Cong. Int. Control Autom.*, Vol. 2, pp. 8462-8466, 2006.
- [3] J. Jones and J. Hayes, "Estimation of system reliability using a "nonconstant failure rate" model," *IEEE Trans. Rel.*, Vol. 50, No. 3, pp. 286-288, Sep. 2001.
- [4] A. Hoyland and M. Rausand, *System Reliability Theory*. NewYork: Wiley, 1994.
- [5] P. Wikstrom, L. A. Terens, and H. Kobi, "Reliability, availability, and maintainability of high-power variable-speed drive systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 36, No. 1, pp. 231-241, Jan./Feb. 2000.
- [6] E. Strangas, S. Aviyente, J. Neely, and S. Zaidi, "Improving the reliability of electrical drives through failure prognosis," in *Proc. IEEE Int. Symp. Diagn. Electron. Mach., Power Electron. Drives*, pp. 172-178, Sep. 2011.
- [7] "Reliability prediction of electronic equipment," Department of Defense, Washington DC, Tech. Rep. MIL-HDBK-217F, Dec. 1991.
- [8] H. D. Lambilly and H. O. Keser, "Failure analysis of power modules: a look at the packaging and reliability of large IGBTs," *IEEE Trans. Compon., Hybrids Manuf. Technol.*, Vol. 16, No. 4, pp. 412-417, Jun. 1993.
- [9] M. Ciappa, F. Carbognani, and W. Fichtner, "Lifetime prediction and design of reliability tests for high-power devices in automotive applications," *IEEE Trans. Dev. Mater. Rel.*, Vol. 3, No. 4, pp. 191-196, Dec. 2003.
- [10] C. Bailey, T. Tilford, and H. Lu, "Reliability analysis for power electronics modules," in *Proc. 30th Int. Spr. Sem. Electron. Techn.*, pp. 12-17, May 2007.
- [11] C. K. Kim, etc, "Valve redundancy determination of VSC HVDC based on MMC," *Electronics*, 2015.
- [12] Goduk-Dangjin HVDC Design Report, KEPCO, 2016
- [13] M. J. Cushing, D. E. Mortin, T. J. Stadterman, and A. Malhotra, "Comparison of electronics-reliability assessment approaches," *IEEE Trans. Rel.*, Vol. 42, No. 4, pp. 542-546, Dec. 1993.
- [14] S. S. Smater and A. D. Dominguez-Garcia, "A unified framework for reliability assessment of wind energy conversion systems," in *Proc. Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1-4, 2010.



김찬기(金燦起)

1991년 서울과학기술대 전기공학과 졸업.
1996년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 한전 전력연구원 차세대 송변전연구소 고효율송전그룹 책임연구원. HVDC 팀장.



최순호(崔淳浩)

2007년 충남대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소 고효율송전그룹 선임연구원.



강지원(姜地原)

1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~현재 한전 전력연구원 전력연구원 차세대송변전연구소 고효율송전그룹장.



윤용범(尹用範)

1958년 9월 28일생. 1986년 서울대 전기공학과 석사 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 한전 경제경영연구원 팀장. 전력연구원 HVDC PM. 현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소장.