

온도스트레스 영향을 고려한 전동차 보조전원장치의 신뢰성분석

박남철^{*}, 송중호²

¹서울과학기술대학교 철도안전학과, ²서울과학기술대학교 전기정보공학과

Reliability Analysis of EMU Static Inverters considering Influence of Temperature Stress Factor

Nam-Chul Park^{*}, Joong-Ho Song²

¹Department of Railway Safety, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 본 논문은 서울도시철도공사 유피스 내 전동차관리 고장데이터(BOM)을 통해 지속적으로 관리된 데이터를 활용하여 노후 철도차량부품의 신뢰성분석을 하고 개선방안을 제시하고자 하였다. 분석대상인 서울도시철도공사 7호선 2차분 보조전원장치(Static Inverter)는 객실 내 각종 서비스장치에 전원을 공급하여 직접적으로 승객 만족도에 영향을 주는 핵심적인 장치이다. 경영정보시스템의 장기간에 걸친 필드데이터를 바탕으로 고장의 패턴을 분석하기 위해 운용환경 스트레스 인자를 고려한 통계·신뢰성분석을 하였다. 보조전원장치(Static Inverter)의 하절기 집중고장현상과 관련하여 고장과 온도 스트레스인자와의 상관성에 대해 통계적 분석을 하였고 IGBT 인버터의 수명분석을 통하여 수리 전·후의 온도 스트레스 인자의 영향을 분석해 보았다. 그리고 전동차 부하량과 외기온도의 두 변수를 고려한 최적운행조건을 분석하여 고장다수 발생조건과의 냉각용량차이가 발생함을 확인할 수 있었고, 이러한 분석을 바탕으로 최적의 운행을 위한 냉각용량차이를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다.

Abstract Based on the data accumulated through EMU fault management, this paper examines the reliability of old railway car parts and proposes measurements to improve safety. Subway Line 7 of the Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, auxiliary power unit (Static Inverter) of the EMU second version is a core equipment to supply power to various room-service units in cars and make an effect directly on passenger satisfaction. To analyze the pattern of failure throughout the field data over a long period of time, this analysis of statistics and reliability considers the operating environment and stress factors. This statistical analysis presents the correlation between failure and the temperature stress factors related to frequent failure occurring intensively in summer. In addition, throughout the analysis of the life of the IGBT inverter, the effect of the temperature stress factor was observed before and after the repair. As a result of an analysis of the optimal operating conditions considering two variations of EMU, such as variable load and outside temperature, a difference in the cooling capacity between the optimal operating conditions and frequent failure conditions was observed. Based on this analysis, this paper suggests a way to minimize cooling capacity difference for the optimal operational conditions.

Keywords : analysis of optimal operating condition, analysis of statistics and reliability, cooling capacity difference, correlation, stress factors

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Nam-Chul Park(Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-10-5359-1702 email: pnc93@hanmail.net

Received November 7, 2016

Revised January 16, 2017

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

1. 서론

최근 들어 철도차량의 내구연한 규제가 없어지고 기 대수명제에 대한 규제완화가 이루어지고 있는 현실에서 노후화되는 철도차량의 유지보수의 중요성이 더욱더 커 지고 있다. 장기간의 사용으로 철도차량의 신뢰성은 운 용환경이라는 스트레스 인자에 지속적으로 영향을 받아 부품별로 그 특성을 나타내게 된다. 환경인자들과 고장 과의 상관성분석을 통해 주요 스트레스 인자를 밝히는 것이 중요하다.

신영주는 계전기의 수명특성을 가속수명시험에 의해 산출하고, 계전기의 수명특성에 맞는 수명분포 및 가속 모델을 도출해 내기 위한 가속수명시험을 실시하였 다.[1] 김세겸은 전동차에 사용되는 계전기의 환경조건 분석을 통하여 사용 환경을 고려한 환경등급 분류에 따 라 수명가중치를 부여하여 고장발생이력에 따른 수명 예 측 값에 계전기 환경이 고려된 새로운 수명 예측 값을 산출하였다.[2] 김일운은 부하변동에 따른 철도차량용 보 조전원장치 역률향상에 관한 연구를 하였다.[3] 신동준 은 도시철도 전동차의 인버터 냉각을 위한 밀폐식 히트 펌프 냉각시스템 성능평가에 관한 연구를 하였다.[4]

본 논문은 서울도시철도공사 유피스 내 전동차관리 고장데이터(BOM)을 통해 지속적으로 축적된 필드데이 타를 활용하였다. 신뢰성에 영향을 주는 운용환경인자와 상관관계 및 다구찌기법을 이용한 최적 운용조건을 분석 하였다. 또한 SIV 인버터의 MTTF와 MTBF를 산출하고 Surival Function 비교를 통한 신뢰도를 분석하였다. 이 러한 분석을 바탕으로 철도차량 노후화 구성품의 최적의

운영조건을 위한 개선방안을 연구하고자 한다.

2. SIV 인버터의 신뢰성분석

2.1 보조전원장치(SIV)의 고장

2.1.1 SIV 인버터 고장현황

본 논문의 신뢰성분석의 대상은 7호선 2차분 SIV(보 조전원장치)이고 분석기간은 2001년 1월 1일부터 2015 년 12월31일까지 15년간이다. Table. 1은 IGBT소손으 로 인한 SIV 인버터고장의 집계를 보이고 있다. 특징적 인 현상은 SIV 인버터고장건수가 계절별 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 5월에서 9월까지의 고장건수가 전체 고장건수의 71%를 차지하고 있다.

2.1.2 SIV인버터고장과 외기온도와의 상관관계

이번 장에서는 주위온도와의 상관성을 통계적분석으 로 알아본다. 고장발생과 주위온도의 상관분석을 위해 전동차 고장데이터 외에 기상청 외기온도 데이터를 추가 로 이용하였다. Fig. 1는 외기온도에 따른 고장발생빈도 를 히스토그램으로 보이고 있다. 분석을 위해 통계·신뢰성분석 프로그램인 미니탭을 사용하였다. 외기온도의 범위는 -5℃ ~ 35℃이고 Fig. 2에서 그 고장분포를 보면 15℃ ~ 35℃에서 전체고장의 80%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. SIV inverter failure aggregate due to the IGBT breakdown

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2015						1	2	2	1			
2014	1		1	1			3	2	2			
2013		1			2		3	3	1			
2012	1		1	1	4	1	3	3	1		1	1
2011					1	2		3	4	1		1
2010	1				2	1	3	1	1			
2009	1		1	1	3	1	1	1	1			1
2008	1	2	1		1	3	3		1	1		2
2007	1			1	1	2	1	6		4		
2006	1						1	2	2		2	1
2005		2			1			1	2			
2004					1		1	1	1			2
2003								1				1
2002								1				
2001	1					3	2	1				

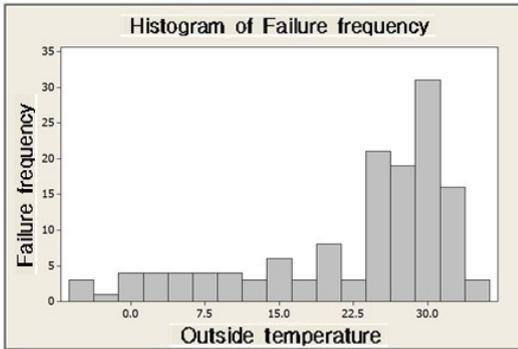


Fig. 1. Failure frequency histograms

상관분석을 위해 Table. 2에서 변수는 인버터 고장빈도와 외기온도를 두개의 변수로 하였다. 외기온도는 4°C 주위온도 냉각용량 단위로 온도구간을 정하여 해당 온도구간의 고장빈도를 집계하여 상관계수를 구하고 그 상관계수에 대한 가설검정을 하여 상관관계의 유무에 대해 검정하였다.

Fig. 3의 산점도에서 외기온도와 고장빈도에 대한 표본상관계수는 0.811으로 비교적 강한 양의 상관을 보이고 있다.

Table 2. Outside temperature interval and frequency failure.

Outside temperature(°C)	Failure frequency
31 ~ 35	26
27 ~ 31	39
23 ~ 27	25
19 ~ 23	11
15 ~ 19	5
11 ~ 15	7
7 ~ 11	7
3 ~ 7	7
-1 ~ 3	6
-5 ~ -1	4

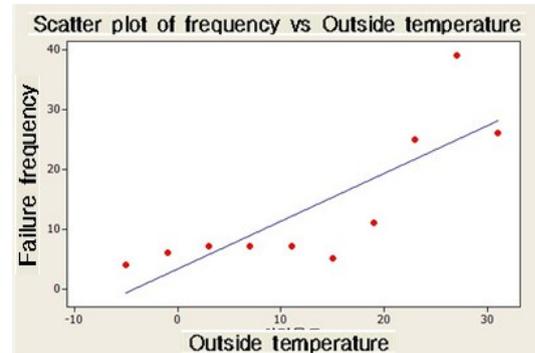


Fig. 3. A scatter plot of failure frequency

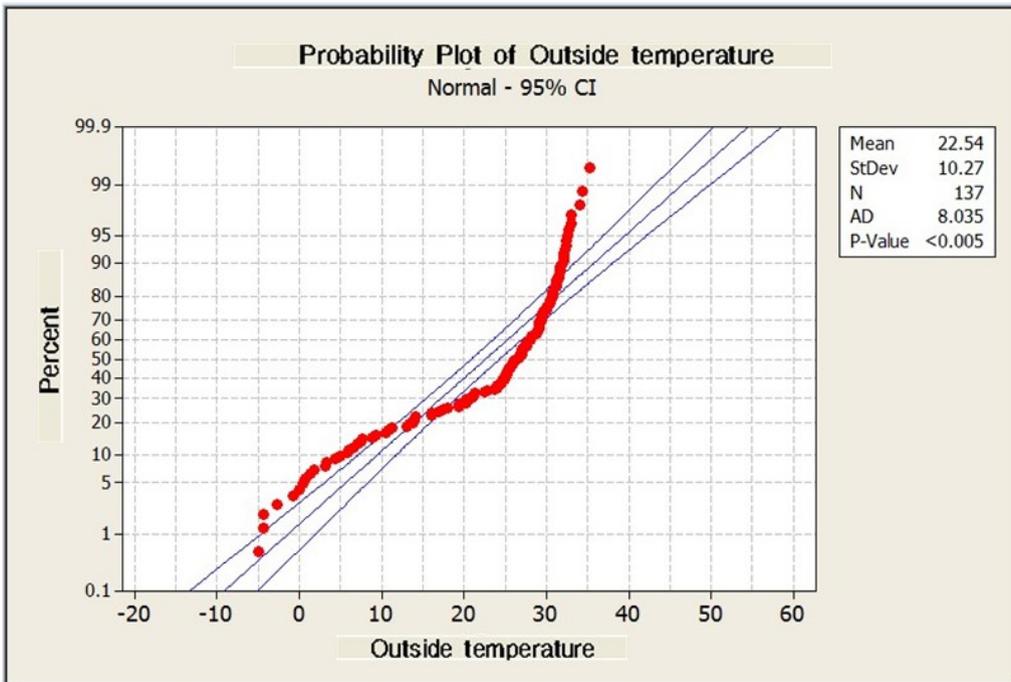


Fig. 2. Failure distribution

두 변수 사이의 상관관계의 유무에 대해 유의수준 5%에서 미니탭을 이용하여 가설검정해보면 다음과 같다.

귀무가설 $H_0: \rho = 0$ (두 변수 간에는 상관관계가 존재하지 않는다.)
 대립가설 $H_1: \rho \neq 0$ (두 변수 간에는 상관관계가 존재한다.)

이때 검정통계량은 $T_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$ 이고, 자유도가 $n-2$ 인 t-분포를 따를 때 미니탭의 검정결과를 보면 P-value (유의확률)가 0.004로 유의수준 0.05보다 작으므로 귀무가설 H_0 를 기각한다. 즉 두 변수 간에는 유의수준 0.05 기준으로 상관계수가 0.811인 양의 상관관계가 존재한다고 볼 수 있다.[6]

2.2 스트레스인자 분석

앞 장에서는 SIV 인버터고장에 대해 외기온도만을 분석하였으나 이번 장에서는 부하량과 외기온도 두 변수를 동시에 고려하여 가장 안정적인 운행조건을 찾아보고 이를 바탕으로 두 변수의 상대적 변화가 고장에 미치는 영향을 분석해 본다.

부하량과 외기온도 두 변수를 동시에 고려한 최적의 운행조건을 분석하기 위해 다구찌 기법을 이용한다. SIV

인버터고장과 온도 스트레스 인자간의 관계는 계량 정특성 망소문제로 고장에 영향을 주는 인자를 식(1)의 인버터냉각용량 설계식을 이용해 구분하면 Table. 3과 같고 이에 따른 실험배치는 Table. 4와 같다.[5]

$$\begin{aligned} \text{IGBT - Junction 온도(정격운전시 설계치)} \\ = 40(\text{℃}) + 0.107(\text{℃/W}) \times 495(\text{W}) + \Delta T_{F(J-F)} \quad (1) \\ = 40 + 0.107 \times 495(\text{W}) + 17.8 \\ = 110.8(\text{℃}) < 125(\text{℃}) \end{aligned}$$

여기서

0.107(℃/W): 냉각 Fin의 열 저항 값 (℃/W) (설계치)

495(W): IGBT turn on 및 switching 손실 (정격 운전시)

40(℃): 주위 온도(℃)

$\Delta T_{F(J-F)}$: 냉각 Fin과 IGBT-Junction간의 온도상승

1) 제어인자

① 부하량(1/2 냉방, FULL 냉방, 1/3 난방, 3/3 난방, 냉난방OFF)

② $\Delta T_{F(J-F)}$: 냉각 Fin과 IGBT-Junction간의 온도상승 (단, 여기서는 조건변화없음)

Table 3. Factors classification

Factors classification	symbol	Affecting factor	range	level 1	level 2	level 3	level 4	level 5		
Control factor	A	Load	Full Heating, 1/3 Heating, Full Cooling, 1/2 Cooling, Heating & Cooling OFF	Full Heating	1/3 Heating	Heating & Cooling OFF	1/2 Cooling	Full Cooling		
	B	$\Delta T_{F(J-F)}$	*	*	*	*	*	*		
Noise factor		Outside temperature	-5℃~35℃	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7

Table 4. Experimental arrangement

Experiment No.	Inside array		Outside array						
	A	B	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7
1	1	1	6	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	10	0	0	0	0	0
3	2	1	0	0	5	0	0	0	0
4	3	1	0	0	0	10	0	0	0
5	3	1	0	0	0	0	11	0	0
6	4	1	0	0	0	0	0	35	0
7	5	1	0	0	0	0	0	0	49

2) 잡음인자: 외기온도(주위온도)

현재 서울도시철도공사 전동차 자동온도 조절장치 온도 셋팅치는 다음과 같다.

객실난방온도 셋트치: 18℃이상 난방OFF

객실냉방온도 셋트치: 23℃이하 냉방OFF

외기온도에 따른 부하량 변화를 세분화해보면

N_1, N_2 구간은 3/3 난방

N_3 구간은 1/3 난방

N_4, N_5 구간은 냉난방OFF

N_6 구간은 1/2 냉방

N_7 구간은 FULL 냉방

외기온도(변화량 5℃단위)

$N_1 = -2℃ \sim 3℃, N_2 = 3℃ \sim 8℃,$

$N_3 = 8℃ \sim 13℃, N_4 = 13℃ \sim 18℃,$

$N_5 = 18℃ \sim 23℃, N_6 = 23℃ \sim 28℃,$

$N_7 = 28℃ \sim 33℃$

미니탭을 이용한 분석결과 Fig. 4에서 최적수준은 SN 비가 -13.98로 가장 큰 A2를 보이고 있다. 즉, 1/3 난방 부하에 외기온도 8℃ ~ 13℃ 구간에서 최적의 운행조건을 보이고 있다. 이는 고장다수 발생구간인 FULL 냉방 부하에 외기온도 28℃ ~ 33℃ 구간과 비교하면 FULL 냉방과 1/3 난방의 부하량의 차이와 20℃ 외기온도 차만큼의 냉각용량차이가 고장발생 빈도차이를 발생시킨다고 생각해 볼 수 있다.

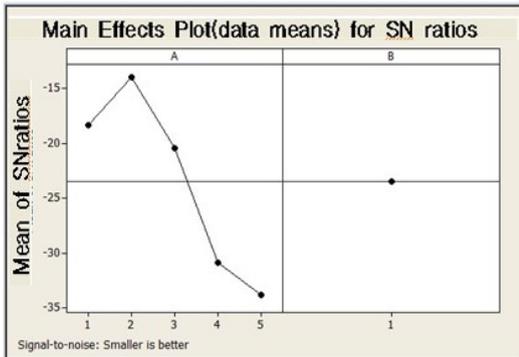


Fig. 4. Main effect plot for SN ratios

위 분석결과를 바탕으로 외기온도 13℃ 이상 구간과 이하 구간을 나누어 고장발생 빈도를 비교해 보면 전체 고장의 81%가 13℃ 이상 구간에서 발생하고 있는데 고

장이 13℃ 이하 구간의 4.48배가 발생하고 있다. 이는 하절기에는 냉방 부하량과 외기온도가 동반상승하여 냉각용량마진이 줄어든 반면, 동절기에는 난방 부하량이 증가함에도 불구하고 외기온도의 하락으로 전체 냉각용량마진이 안정된 상태로 유지된 결과로 볼 수 있다.

2.3 MTTF와 MTBF의 분포관계

IGBT 인버터의 수명분포는 서울도시철도공사 2000년 1월부터 2015년 12월까지의 필드데이터(관측 정시중단 데이터)를 미니탭을 이용하여 분석하였다.

초기고장과 반복된 고장의 평균수명 비교분석을 한다. 과연 고장수리 후 평균수명의 차이가 있는지 알아보기 위해서 MTTF(Mean time to failure)와 MTBF(Mean time between failures)를 비교한다.

최적의 수명분포는 Anderson-Darling값이 MTTF는 230.290, MTBF는 192.911로 모두 와이블 분포를 따르고 있음을 알 수 있다. 선정된 와이블 분포를 통해 PDF(Probability Density Function), Survival Function, Hazard Function을 분석해 보면 Fig. 5와 같다.

MTTF와 MTBF를 비교해보면 다음과 같다.

Table 5. Comparison of MTTF, MTBF

	MTTF	MTBF
Shape parameter	1.80191	1.26261
Scale parameter	1439990	1203426
Mean time	1280498	1118328

MTTF에 비해 MTBF가 Scale parameter와 평균수명이 줄었음을 알 수 있다. 즉 초기고장까지의 수명에 비해 고장수리 후 사용수명이 작다는 의미는 반복고장이 일어난다고 볼 수 있다.

(여기서 Shape parameter는 β 로, 와이블 분포함수는

$\beta < 1$ 감마분포

$\beta = 1$ 지수분포

$\beta = 2$ 로그정규분포

$\beta = 3.5$ (거의 근사적으로) 정규분포를 따른다. Scale parameter는 η 로 특성수명을 나타낸다. Location parameter는 최소수명으로 본 논문에서는 영업시작 기준으로 $\gamma=0$ 으로 한다. $d(km)$ 는 수명거리를 나타내는 변수이다.)

다시 정리하면

$$= 1.0491795^{-6} \left(\frac{d}{1203426} \right)^{0.26261} \quad (5)$$

PDF(Probability Density Function)는

$$f(d)_{MTTF} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{d-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{d-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

$$= 1.25133507^{-6} \left(\frac{d}{1439990} \right)^{0.80191} e^{-\left(\frac{d}{1439990} \right)^{1.80191}} \quad (2)$$

$$f(d)_{MTBF} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{d-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{d-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

$$= 1.0491795^{-6} \left(\frac{d}{1203426} \right)^{0.26261} e^{-\left(\frac{d}{1203426} \right)^{1.26261}} \quad (3)$$

고장률 함수는

$$\lambda(d)_{MTTF} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

$$= 1.25133507^{-6} \left(\frac{t}{1439990} \right)^{0.80191} \quad (4)$$

$$\lambda(d)_{MTBF} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Fig. 6은 Survival Function을 비교하여 초기고장과 반복고장의 신뢰도 차이를 보여주고 있다.

Survival function은

$$R(d)_{MTTF} = e^{-\left(\frac{d-\gamma}{\eta} \right)^\beta} = e^{-\left(\frac{d}{1439990} \right)^{1.80191}} \quad (6)$$

$$R(d)_{MTBF} = e^{-\left(\frac{d-\gamma}{\eta} \right)^\beta} = e^{-\left(\frac{d}{1203426} \right)^{1.26261}} \quad (7)$$

수리 후 평균수명이 짧아졌다는 의미는 수명을 단축시키는 스트레스인자의 영향이 이전보다는 커지고, 지속적으로 스트레스 상태에 있다는 것으로 생각해 볼 수 있다.

IGBT 인버터의 온도 스트레스인자에 대한 주요변수는 식(1)의 인버터 냉각성능계산식에서 보듯 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 전동차 부하에 의한 내부손실과 주위 온도가 그것이다. 전동차 부하에 의한 내부손실은 IGBT turn on 및 switching 손실을 말하며 주위온도는 히트싱

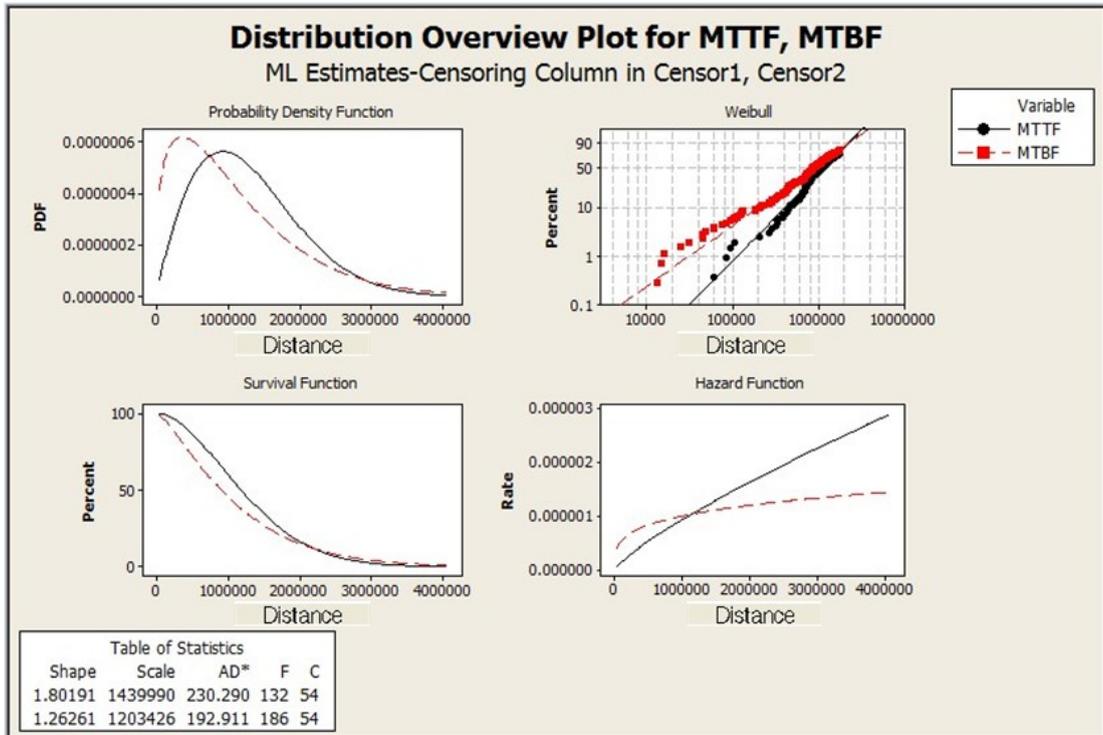


Fig. 5. Distribution overview plot for MTTF, MTBF

크처럼 외부공기와 열교환 부품의 냉각용량을 말한다. 결국 이러한 냉각용량 마진을 최대한 확보하거나 늘리는 것이 핵심사항으로 IGBT 스위칭 주파수 대역을 적정수준으로 내림으로써 IGBT의 스위칭 손실이 줄어들어 히트싱크의 냉각용량 마진을 확보하거나 인버터박스에 추가로 냉각팬 또는 방열판을 설치하여 열교환능력 확대를 통하여 고장발생확률을 낮춤으로써 신뢰성향상을 고려해 볼 수 있다.

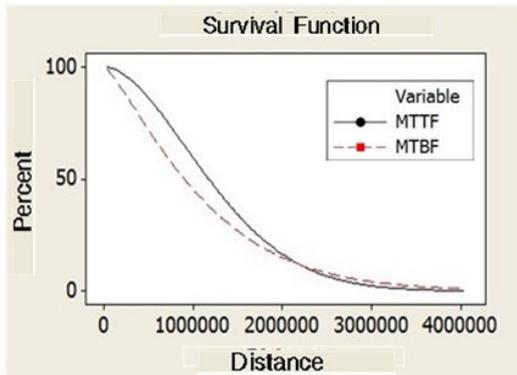


Fig. 6. Survival function comparison for MTTF, MTBF

3. 결론

IGBT손손으로 인한 SIV 인버터고장과 온도 스트레스 인자와의 상관성을 분석을 통하여 외기온도와 SIV 인버터고장빈도의 상관관계가 검정통계량 $T_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$ 이고, 자유도가 n-2인 t-분포를 따를 때 유의수준 0.05에서 P-value(유의확률)가 0.004으로 상관계수가 0.811인 양의 상관관계가 존재함을 알 수 있었다.

SIV 인버터의 최적운행조건을 다구찌 기법을 통하여 SN비가 -13.98로 가장 큰 1/3 난방부하에 외기온도 8℃ ~ 13℃ 구간임을 알 수 있었다. 이는 고장다수 발생구간인 FULL 냉방, 외기온도 28℃ ~ 33℃ 구간과 비교하면 FULL 냉방과 1/3 난방의 부하량의 차이와 20℃ 외기온도 차만큼의 냉각용량차이가 있음을 알 수 있었다.

IGBT 인버터 수명분포의 MTTF 와 MTBF 비교분석을 통해 초기고장과 고장수리 후 수명의 차이가 있는지 산출해 보았는데 MTTF는 1,280,498km이고 MTBF는 1,118,328km으로 MTTF에 비해 MTBF가 Scale parameter와 평균수명이 줄었음을 알 수 있다. 즉 초기

고장까지의 수명에 비해 고장수리 후 사용수명이 작다는 의미는 온도 스트레스인자의 영향이 이전보다는 커지고 지속적으로 스트레스 상태에 있다는 것으로 생각해 볼 수 있다.

IGBT 인버터의 온도 스트레스에 대한 개선안으로 IGBT 스위칭 주파수 조정을 통한 손실감소와 냉각팬 또는 방열판 추가 설치를 제안하였다. 이는 냉각용량설계에서 내부발열과 외부공기와 열교환 문제를 동시에 고려한 제안으로 다구찌 분석에서 알 수 있듯이 최적운행 조건과 고장다수발생조건외의 냉각용량차이를 줄여 추가 마진확보를 통한 고장발생 확률적 감소를 기대한다.

그러나 IGBT 스위칭 주파수 조정은 적정 스위칭주파수 대역을 선정 시 왜율과 소음증가에 대한 고려가 필요하며 이에 대한 연구가 필요하다. 최근 가변 스위칭주파수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 평소 쾌적한 운영환경에서 온도스트레스에 대한 이상 징후가 나타날 때 스위칭주파수를 자동으로 낮춤으로써 자기방호기능을 갖추도록 하는 연구도 노후 철도차량 운영 관리에 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Young-Ju, Shin, "A Study on Accelerated Life Test(ALT) for Relay by Apply to a Complex Stress", Department of Industrial Engineering Graduate School, Cheongju University, 2005.
- [2] Se-Kyum, Kim, "A Study on Effective Maintenance by Considering Environmental Conditions for the Relays of AREX'S EMU", Department of Rolling Stock System Engineering Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, 2014.
- [3] Il-On, Kim, "A Study on The Improvement and Analysis for Power Factor Characteristics of Rolling Stock Auxiliary Power Supply according to the Load Changes", Department of Rolling Stock System Engineering Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, 2015.
- [4] Dong-Jun, Shin, "A Study on Performance Analysis of the Heat-pump System for the Cooling of the Inverter of a Metro EMU", Department of Railway System Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, 2014.
- [5] Rotem Co. Ltd, "Handbook of Inverter design", 1999.
- [6] Hyun-Ju, Park, "Learning to Minitab Basic Statistics", Jireh Tech, 2006.
- [7] Rudolph Frederick Stapelberg, "Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design", Springer, 2009.

- [8] Euy-Hyun Cho, Jeong-Kyu, Hui-Don Seo, "The Accelerated Life Test of 2.5 Inch Hard Disk In The Environment of PC using", Journal of Digital Contents Society, Vol. 15, No. 1, pp. 19-27, Feb. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.9728/dcs.2014.15.1.19>

박 남 철(Nam-Chul Park)

[준회원]



- 2000년 2월 : 명지대학교 전기전자공학부 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도안전학과 석사과정
- 2001년 6월 ~ 현재 : 서울도시철도공사

<관심분야>

철도RAMS 신뢰성이론

송 중 호(Joong-Ho Song)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학석사)
- 1993년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학박사)
- 1985년 3월 ~ 2002년 8월 : 한국과학기술원 책임연구원
- 2002년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수

<관심분야>

전력전자, 전동기제어, 전력품질