

# 고장나무를 이용한 양방향 컨버터의 신뢰성 분석

## Fault-tree based reliability analysis for bidirectional converter

허 대 호\*, 강 필 순\*

Dae-ho Heo\*, Feel-soon Kang\*

### Abstract

The failure rate of bidirectional dc-to-dc converter is predicted through the failure mode and effect analysis (FMEA) and the fault-tree analysis (FTA) considering the operational risk. In order to increase the driving voltage of the electric vehicle efficiently, the bidirectional converter is attached to the front of the inverter. It has a boost mode for discharging battery power to the dc-link capacitor and a buck mode for charging the regenerative power to the battery. Based on the results of the FMEA considering the operating characteristics of the bidirectional converter, the fault-tree is designed considering the risk of the converter. After setting the design parameters for the MCU for the electric vehicle, we analyze the failure rate of the capacitor due to the output voltage ripple and the inductor component failure rate due to the inductor current ripple. In addition, we obtain the failure rate of major parts according to operating temperature using MIL-HDBK-217F. Finally, the failure rate and the mean time between failures (MTBF) of the converter are predicted by reflecting the part failure rate to the basic event of the fault-tree.

### 요 약

본 논문에서는 양방향 dc-to-dc 컨버터의 고장원인, 고장영향, 고장 결과를 파악하기 위한 failure mode and effect analysis(FMEA)와 양방향 컨버터의 위험도를 고려한 fault-tree analysis(FTA)를 통해 고장률을 예측한다. 전기차의 구동 전압을 효율적으로 상승시키기 위해 인버터 앞단에 부착되는 양방향 컨버터는 배터리 전력을 dc-link 커패시터로 방전시키는 승압모드와 회생전력을 배터리로 충전시키는 강압모드를 가진다. 양방향 컨버터의 동작 특성을 고려한 FMEA 결과를 바탕으로 컨버터의 위험도를 고려한 고장나무를 설계한다. 전기차 MCU용에 맞는 설계 파라메타를 설정하고 출력전압 리플과 인덕터 전류 리플에 따른 커패시터와 인덕터의 부품 고장률을 분석한다. 또한 동작 온도에 따른 주요부품의 고장률을 MIL-HDBK-217F를 이용하여 구한다. 마지막으로 부품 고장률을 고장나무의 기본 사상의 고장률로 반영하여 컨버터 고장률과 평균고장시간을 예측한다.

*Key words* : Bidirectional dc-to-dc Converter, EV (Electric Vehicle), FMEA (Failure Modes and Effect Analysis), FTA (Fault-tree analysis), MCU (Motor Control Unit), MTBF (Mean Time Between Failures)

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

★ Corresponding author  
E-mail : feelsoon@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1172

※ Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (NRF-2017R1A2B4012154)

Manuscript received Mar. 4, 2019; revised Mar. 25, 2019; accepted Mar. 27, 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.

## 1. 서론

최근 전기차 추진용 모터는 경량화와 효율 개선을 위해 고전압으로 설계되고 있어 motor control unit(MCU)의 입력전압을 상승시킬 필요가 있다. 배터리 직렬결합으로 MCU 입력전압을 상승시킬 수 있지만 과도한 수의 배터리 직렬결합은 구조적 안정성과 전기적 안전성을 저하시키는 문제를 가진다. 이를 해결하기 위해 MCU의 앞단에 양방향 dc-to-dc 컨버터를 채용하는 방법이 소개되었다 [1]-[3]. 추진용 배터리에서 MCU의 dc-link 단으로 전력을 공급하는 구간에는 승압모드로 동작하고

모터의 회생전력이 발생하는 구간에는 추진용 배터리를 충전시키는 강압모드로 동작한다. 기존 양방향 컨버터의 출력단 회로 구조를 변경하여 출력 커패시터의 동작전압(Working voltage)을 저감시키는 변형된 양방향 컨버터가 소개되었다[3]. 이와 같이 양방향 컨버터를 MCU에 추가함으로써 효율적인 고전압 공급이 가능하지만 부품이 증가하면 고장의 발생 가능성이 증가하므로 전기차와 같이 인간의 생명과 안전을 최우선으로 고려해야 하는 시스템에서는 추가되는 부품이나 회로 등에 의한 고장율의 변화를 미리 분석하여 설계에 반영해야 할 필요가 있다. 신뢰성은 시스템 또는 부품이 요구되는 기능을 규정된 조건 하에서 명세된 시간동안 제공하는 확률이며 고장률과 수명이 신뢰성의 척도로 사용될 수 있다. 고장률은 부품, 장치, 시스템에서 단위 시간 당 발생하는 고장 횟수이며, 수명은 고장이 발생할 때까지의 시간으로 정의된다 [4]-[6].

본 논문에서는 양방향 컨버터의 위험도를 고려한 고장률 분석을 통해 신뢰성 평가의 척도로 활용하고자 한다. 이를 위해 FMEA에 기반한 양방향 컨버터의 고장을 정의하고 고장의 영향과 고장의 결과를 분석한다. FMEA 결과를 바탕으로 양방향 컨버터의 위험도를 고려한 고장나무를 설계한다. 전기차 MCU용으로 적합한 설계 파라메타를 결정하고 MIL-HDBK-217F[8]를 이용하여 개별 부품의 고장률을 계산한다. dc-link 커패시턴스와 고장률과의 관계, 그리고 컨버터 고장률에 가장 큰 영향을 미치는 온도 변화에 따른 고장률 변화를 비교·분석한다.

## II. 양방향 컨버터 고장률 분석

### 2.1 양방향 컨버터의 설계 파라메타 결정

그림 1은 양방향 dc-to-dc 컨버터의 회로 구조를 보여준다. 승압모드에서는 스위치  $Q_1$ 의 on-off 동작에 의해 부스트 컨버터로 동작하여 출력전압이 승압되며, 강압모드에서는  $Q_2$ 의 스위칭 동작에 의해 벡-컨버터로 동작하여 배터리 충전이 이루어진다. 본 논문에서는 표 1에 주어진 설계사양과 같이 승압모드에서 30 kW 용량을 기준으로 추진용 배터리 240 V, dc-link 680 V로 설계된다. 회생전력은 보통 구동전력의 20% 정도로 강압모드에서 양

방향 컨버터가 담당하는 전력은 6 kW 정도이다. 승압모드의 파라메타 값이 강압모드보다 크기 때문에 승압모드 동작을 기준으로 스위칭 소자의 전압정격과 전류정격을 결정한다. 또한 설계 목표의 인덕터 전류리플과 커패시터 전압리플에 따라 인덕턴스와 커패시턴스 값을 결정한다.

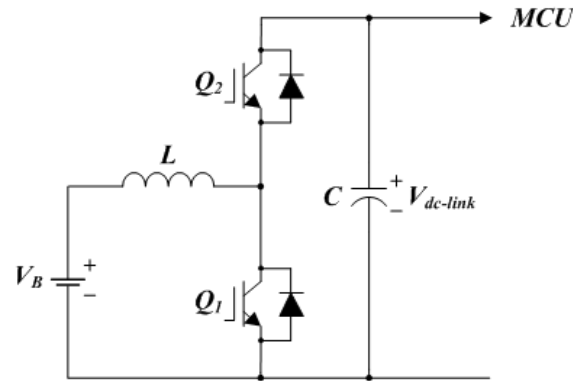


Fig. 1. Circuit configuration of bidirectional converter.

그림 1. 양방향 컨버터 회로 구조

Table 1. Specification of bidirectional converter.

표 1. 양방향 컨버터 설계사양

Parameters	Values
Power Capacity	30kW @ step-up 6kW @ step-down
Battery voltage	$V_B = 240V$
dc-link voltage	$V_{dc-link} = 680V$
Switching frequency	$f_s = 20kHz$

인덕턴스는 전류연속모드(continuous current conduction mode, CCM)와 전류불연속모드(discontinuous current conduction mode, DCM)의 경계치 조건에서 식(1)로 구한다.

$$L = \frac{V_B D}{2f_s I_{pp\%}} \tag{1}$$

여기서  $V_B$ 는 추진용 배터리 전압,  $D$ 는 스위치  $Q_1$ 의 도통비,  $f_s$ 는 스위칭 주파수,  $I_{pp\%}$ 는 인덕터 전류리플이다. 출력단의 dc-link 커패시턴스는 식(2)를 이용하여 충분히 큰 값으로 설정한다.

$$C = \frac{I_o D}{f_s V_{pp\%}} \tag{2}$$

여기서  $I_o$ 는 출력평균전류,  $D$ 는 스위치  $Q_1$ 의 도통비,  $f_s$ 는 스위칭 주파수,  $V_{pp\%}$ 는 dc-link 커패시터 전압리플이다.

그림 2(a)는 식(1)을 이용하여 계산된 인덕터 리플율에 따른 인덕턴스 값의 변화를 보여준다. 약 5% 이하의 인덕터 전류 리플을 만족시키기 위해서는 인덕턴스 값이 급격히 상승함을 알 수 있다. 그림 2(b)는 식(2)로부터 구해진 출력전압 리플율에 따른 커패시턴스의 변화를 보여준다. 약 3% 이하의 리플율을 만족시키기 위한 커패시턴스의 크기가 급증함을 보여준다. 따라서 본 논문에서는 인덕터 전류리플은 10%, 커패시터 전압리플은 5%를 기준으로 설계한다. 따라서 인덕턴스는 311  $\mu$ H, 커패시턴스는 42  $\mu$ F를 선택하여 양방향 컨버터의 고장률을 분석한다.

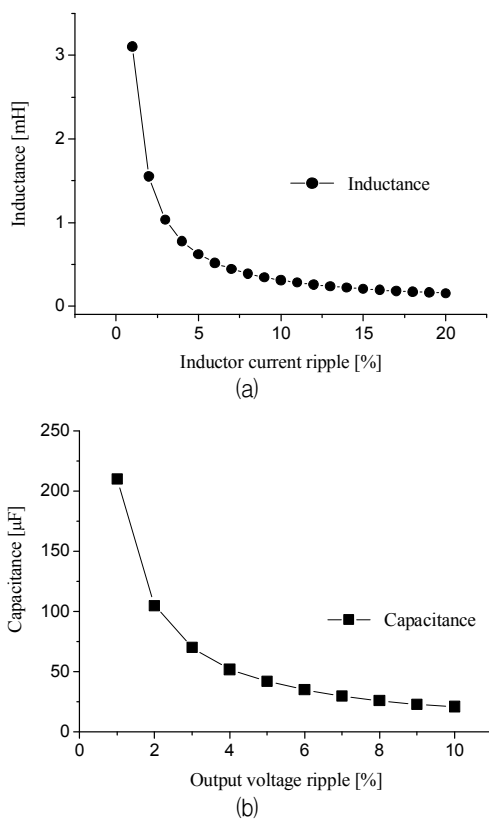


Fig. 2. Inductance and capacitance according to ripple rate. 그림 2. 리플율에 따른 인덕턴스와 커패시턴스

2.2 양방향 컨버터의 FMEA

FMEA는 양방향 컨버터의 잠재적 고장모드와 고장의 원인 및 결과의 영향을 분석하여 잠재적 고장 발생 기회를 제거하거나 저감시키는 조치를 취하고 이를 문서화시키는 체계적인 활동이다[7]. 표 2는 양방향 컨버터의 FMEA를 나타낸다. 먼저 양방향

컨버터의 기능을 정의하고 잠재적 고장 모드를 출력 없음과 출력이상으로 구분한다. 승압모드는 dc-link에 출력이 없는 경우와 출력이상 발생하는 경우로 구분하며, 강압모드에서는 배터리로 회생이 없는 경우와 회생에 문제가 발생하는 경우로 나누어 고장의 원인과 이로 인한 결과를 보여준다.

2.3 양방향 컨버터의 고장나무 설계

양방향 컨버터의 고장을 고장나무의 최상위 사상으로 하며 고장을 유발할 수 있는 잠재적인 원인이 하단 가지로 표현되는 하향식 접근법으로 AND, OR 게이트 등을 사용하여 기본 사상과 최상위 사상 간의 논리적 상호 관계를 표현한다.

그림 3과 같이 양방향 컨버터의 고장은 승압모드의 고장과 강압모드의 고장으로 구분되며 하위 고장의 원인으로서는 배터리 전원공급 실패, 인덕터의 에너지 전달 실패, 스위칭 실패, 커패시터의 전압 유지 기능의 실패로 구분된다. 이들 각각의 고장들은 하위 단계의 부품의 기본 고장으로 연결된다.

Table 2. FMEA of bidirectional converter.

표 2. 양방향 컨버터의 FMEA

Function of bidirectional dc-to-dc converter: to convert dc power from the propulsion battery to the desired dc-link voltage and to recover the regenerated power from the dc-link capacitor to the propulsion battery		
Potential functional failure mode	Potential functional failure cause	Potential functional failure effect
No output to dc-link	<ul style="list-style-type: none"> <li>low SOC of battery</li> <li>switching failure</li> <li>inductor saturation</li> <li>wire disconnection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>dc-link voltage decreased</li> <li>failure to voltage step-up operation</li> <li>failure to supply power to MCU</li> </ul>
Faulty output to dc-link	<ul style="list-style-type: none"> <li>switching failure due to the improper control signal</li> <li>voltage ripple increased</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>failure to supply reliable power to MCU</li> <li>failure to voltage step-up operation</li> <li>dc-link voltage ripple decreased</li> </ul>
No regeneration to battery	<ul style="list-style-type: none"> <li>high SOC of battery</li> <li>switching failure</li> <li>inductor saturation</li> <li>wire disconnection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>efficiency decreased</li> <li>dc-link voltage increased</li> <li>failure to voltage step-down operation</li> <li>failure to recovery energy from the propulsion motor</li> </ul>
Faulty regeneration to battery	<ul style="list-style-type: none"> <li>switching failure due to the improper control signal</li> <li>voltage ripple increased</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>failure to recovery energy from MCU</li> <li>failure to voltage step-down operation</li> <li>voltage stress in battery increased</li> </ul>

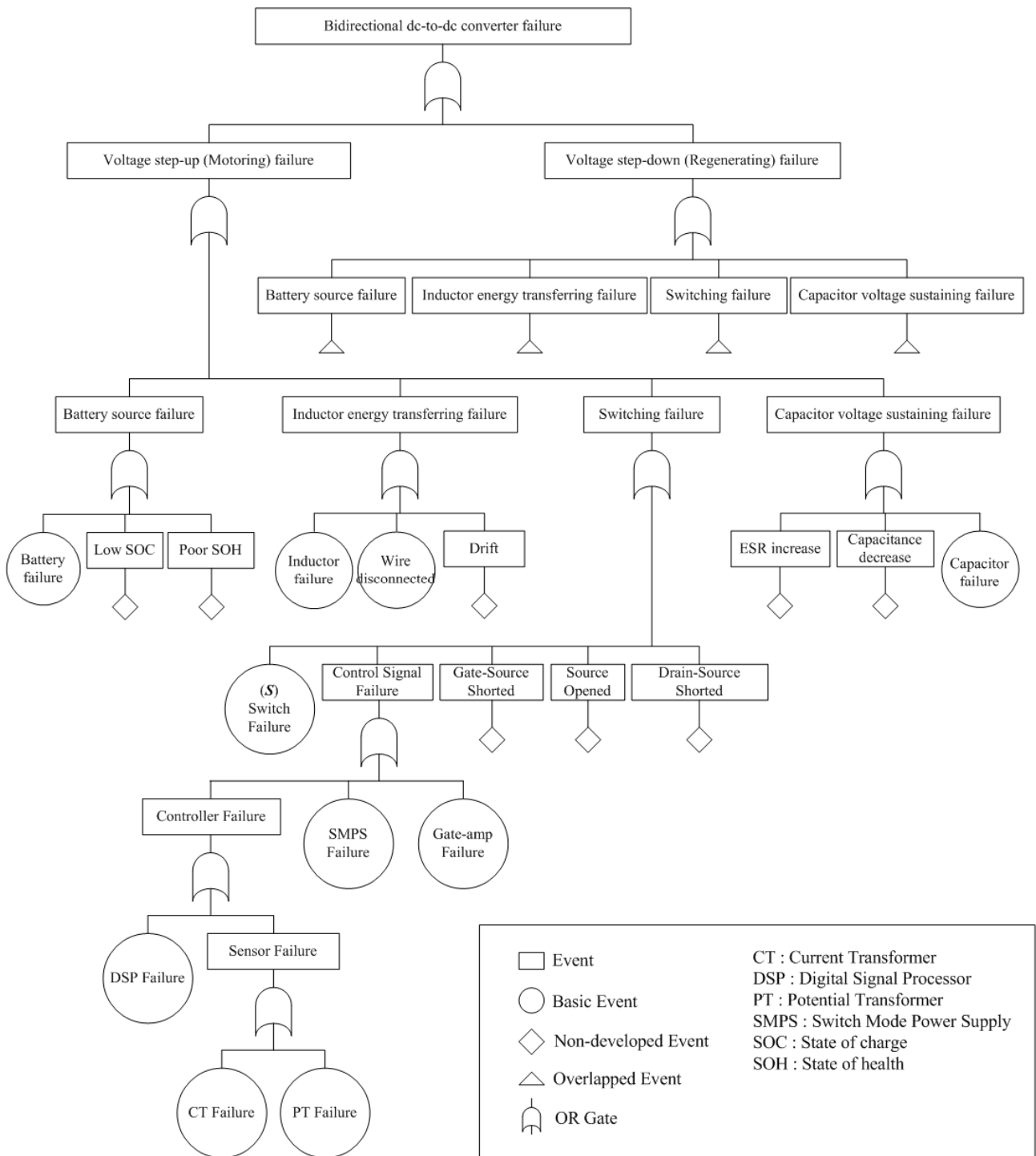


Fig. 3. Fault-tree of bidirectional converter.  
그림 3. 양방향 컨버터의 고장나무

2.4 주요 부품의 고장률

컨버터의 주요 부품인 Power MOSFET, Fast Recovery 다이오드, 전해커패시터, 인덕터에 대한 부품 고장률을 MIL-HDBK-217F를 이용하여 구한다. 공통적으로 품질인자  $\pi_Q$ (Quality factor)는 상용부품의 기준인 [Lower]를 적용하고, 환경인자  $\pi_E$

(Environment factor)는 제어된 환경에서 이용된다. 는 가정 하에 [Ground fixed,  $Q_F$ ] 기준을 적용한다 [8]. Power MOSFET 고장률  $\lambda_{p,sw}$ 은 식(3)으로 구할 수 있다.

$$\lambda_{p,sw} = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6\text{h} \quad (3)$$

여기서  $\lambda_b$ 는 MOSFET의 기본 고장률로 0.012,  $\pi_A$ 는 응용인자로 Power MOSFETs는 10,  $\pi_T$ 는 온도인자로 동작 온도에 따라 고장률은 변하게 된다. Fast recovery 다이오드의 고장률  $\lambda_{p,D}$ 은 식(4)로 구할 수 있다.

$$\lambda_{p,D} = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6\text{h} \quad (4)$$

여기서 기본 고장률  $\lambda_b$ 는 FR 다이오드의 경우 0.025,  $\pi_S$ 는 전기적 스트레스 인자,  $\pi_C$ 는 contact construction 인자,  $\pi_T$ 는 온도인자로 동작 온도에 따라 고장률은 변하게 된다.

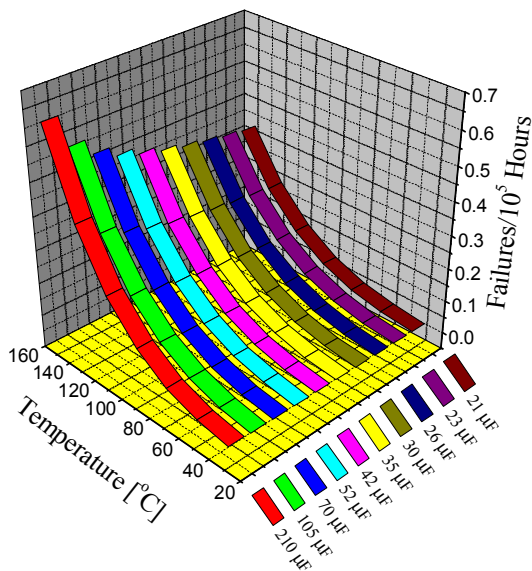


Fig. 4. Variation of capacitor failure rate according to temperature and capacitance.

그림 4. 커패시턴스와 온도에 따른 커패시터 고장률의 변화

전해커패시터의 고장률은  $\lambda_{p,C}$ 은 식(5)로 구할 수 있다.

$$\lambda_{p,C} = \lambda_b \pi_T \pi_C \pi_V \pi_{SR} \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6\text{h} \quad (5)$$

여기서 기본 고장률  $\lambda_b$ 는 전해커패시터의 경우 0.00012,  $\pi_V$ 는 전압 스트레스 인자,  $\pi_{SR}$ 은 직렬저항 인자이다. 커패시턴스 인자인  $\pi_C$ 와 온도인자인  $\pi_T$ 에 의해 고장률이 변하게 된다. 그림 4는 양방향 컨버터의 출력전압 리플이 1%부터 10%가 되는 조건의 커패시턴스 값에서 온도에 따른 커패시터 부품의 고장률 변화를 보여준다. 온도와 커패시턴스 값이 증가할수록 고장률이 상승함을 알 수 있다.

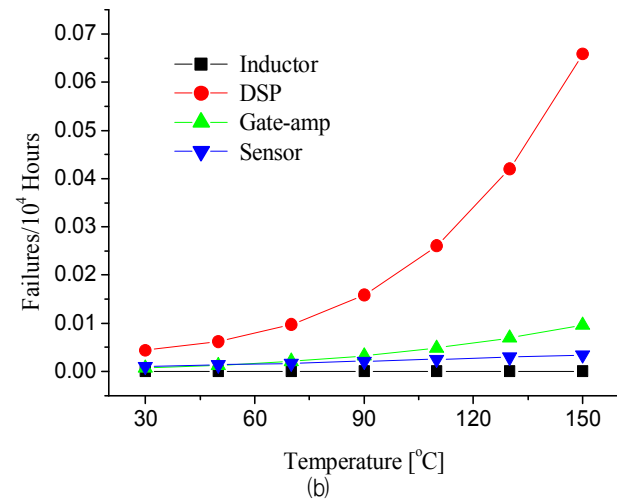
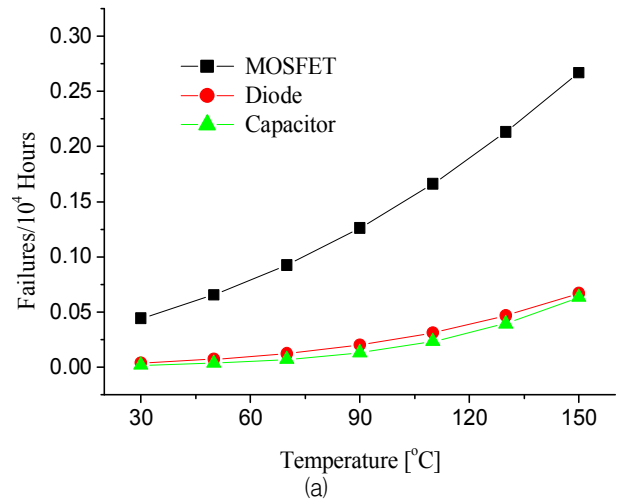


Fig. 5. Part failure rate according to temperature, (a) MOSFET, diode, capacitor, inductor, (b) DSP, gate-amp, sensor.

그림 5. 부품 고장률, (a) MOSFET, 다이오드, 커패시터, (b) 인덕터, DSP, 게이트-앰프, 센서

인덕터의 고장률은  $\lambda_{p,L}$ 은 식(6)으로 구할 수 있다. 기본 고장률  $\lambda_b$ 는 0.000030이며 고장률과 인덕턴스 값과는 무관하고 온도인자  $\pi_T$ 에 따라 고장률이 변한다.

$$\lambda_{p,L} = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6\text{h} \quad (6)$$

그림 5(a)는 온도변화에 따른 스위치, 다이오드, 커패시터 부품 고장률을 보여준다. 스위치 고장률이 가장 크며 온도 상승에 가장 크게 영향을 받는다. 그림 5(b)는 고장률이 낮은 인덕터와 제어가 TMS320F28335 DSP를 기준으로 구성될 경우의 고장률, 게이트-앰프는 TLP250 포토커플러를 이용하여 구성할 경우의 고장률, 센서는 PT, CT 센서의 고장률이다.

### 2.5 고장나무 기반 양방향 컨버터의 고장률

본 장에서는 2.4절에서 구한 부품 고장률을 그림 3에 나타난 고장나무의 최하위 사상 고장률로 반영하여 양방향 컨버터의 고장률을 계산한다. 고장나무는 컨버터의 기능을 수행하는 과정에 있어 상호 연관된 고장의 발생 가능성까지 포함하게 되므로 단순한 부품의 고장률에 비해 양방향 컨버터의 동작에 대한 위험도를 포함하게 되어 보다 정확한 고장률 예측이 가능하다. 주요 부품 고장률을 제외한 기타 하위 사상의 고장 발생률은 0.00001 Failures/10<sup>4</sup>h로 가정하여 전체 고장에 미치는 영향을 최소화한다.

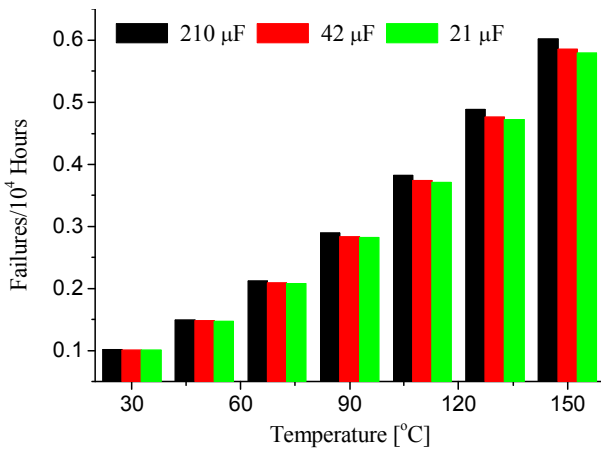


Fig. 6. Bidirectional converter failure rate according to operating temperature and capacitance.

그림 6. 커패시턴스와 동작 온도에 따른 양방향 컨버터 고장률

그림 6은 인덕터 전류리플을 10% 조건의 311 μH로 설계할 경우 커패시턴스와 동작온도에 따른 컨버터의 고장률 변화를 보여준다. 출력전압 리플 5% 조건의 커패시턴스 42 μF의 경우 동작온도가 30 °C에서는 0.1011 Failures/10<sup>4</sup>h이지만 150 °C에서는 0.5834 Failures/10<sup>4</sup>h로 크게 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 고장률의 역수로 정의되는 평균고장시간 (MTBF)의 변화를 보여준다. 그림 7(a)은 컨버터의 동작 온도가 증가할수록 평균고장시간이 단축되어 고장이 빈번하게 발생됨을 보여준다. 그림 7(b)은 동작온도가 증가함에 따라 MTBF의 최댓값 (@21 μF)과 최솟값(@210 μF)의 차이가 감소함을 보여준다. 즉, 컨버터의 고장률은 커패시턴스 값의 크기보다는 동작온도에 더 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

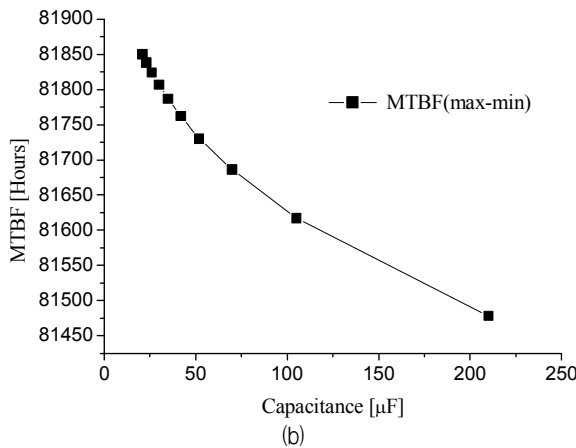
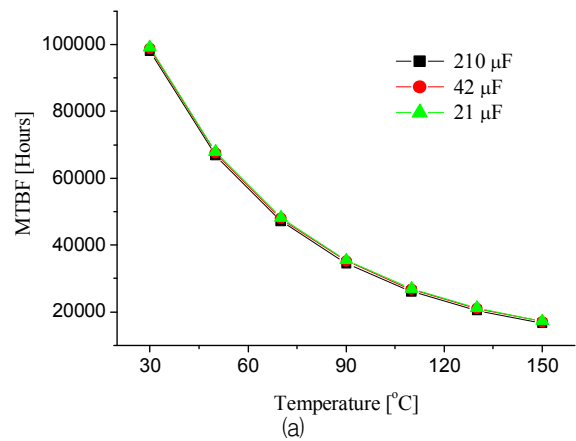


Fig. 7. Variation of MTBF, (a) MTBF according to temperature and capacitance, (b) MTBF difference between maximum and minimum according to capacitance.

그림 7. 평균고장시간 변화, (a) 커패시턴스와 온도에 따른 평균고장시간, (b) 커패시턴스에 따른 MTBF 최댓값과 최솟값 차이

### III. 결론

본 논문에서는 양방향 컨버터에 대한 FMEA를 통해 고장원인, 고장영향, 고장결과를 분석하고 컨버터의 위험도를 고려한 고장나무를 설계하였다. 전기차 MCU용으로 적합한 설계 파라메타를 설정하고 출력전압 리플과 인덕터 전류 리플에 따른 커패시터와 인덕터의 부품 고장률을 분석하였다. 주요 부품의 고장률을 MIL-HDBK-217F를 이용하여 구하고 고장나무의 기본 사상 고장률로 반영하여 컨버터의 고장률과 MTBF를 분석한다.

결과적으로 양방향 컨버터는 dc-link 커패시턴스 값과 동작온도가 증가할수록 고장의 발생 가능성이 증가하고 동작온도에 더 크게 영향을 받음을 확인하였다.

## References

- [1] J. Hsu, C. Ayers, and C. Coomer, "Report on toyota/prius motor design and manufacturing assessment," *report, Oak Ridge National Lab. (ORNL)*, 2004. DOI: 10.2172/885676
- [2] C. Ayers, "Evaluation of 2004 toyota prius hybrid electric drive system interim report," *report, Oak Ridge National Lab. (ORNL)*, 2004. DOI: 10.2172/885776
- [3] S. P. Kim, S. J. Park, F. S. Kang, "Circuit configuration of step-up converter with reduced working voltage of output capacitor," *Journal of inst. Korean. electr. electron. eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 630-637, 2018. DOI: 10.7471/ikeee.2018.22.3.630
- [4] U. M. Choi, "Unreliable components and reliability evaluation method in power electronic system," *Journal of Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 34-40, 2018.
- [5] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronics converters," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1441-1451, 2011. DOI: 10.1109/TIA.2011.2124436
- [6] J. S. Lee, "Life-time evaluation technology of Power conversion system," *Journal of Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 41-47, 2018.
- [7] J. S. Kim, J. S. Choi, J. G. Bin, F. S. Kang, "Fault Tree Analysis and its Application for Designing High Reliability Electrical System in Underwater Vehicle," *Journal of Korean Inst. electr. eng.*, vol. 66, no. 1, pp. 33-39, 2017.
- [8] Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1991.

## BIOGRAPHY

### Dae-ho Heo (Member)



2019 : Senior in Electronics and Control Engineering Hanbat National University.

2016~Present : Undergraduate student in Electronics and Control Engineering, Hanbat National University.

### 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.