

양방향 컨버터의 커패시터 위치에 따른 고장률 분석

Analysis of failure rate according to capacitor position of bidirectional converter

김 예 린*, 강 필 순*

Ye-rin Kim*, Feel-Soon Kang*

Abstract

We analyze the failure rate change of a conventional bidirectional converter and a modified one which moves an output capacitor towards propulsion battery. We analysis of the circuit structural homogeneity and the difference between both converters, and confirm that the capacitor working voltage is reduced by changing the capacitor position. After obtaining the capacitor failure rate according to voltage stress factor and operating temperature, it is applied to the fault-tree of the bidirectional converter to obtain the overall failure rate of the converter. We analyzes the advantages and disadvantages of design changes by comparing and analyzing the failure rate and mean time between failures (MTBF) according to operating temperature and capacitance value.

요 약

기존 양방향 컨버터와 출력 커패시터를 추진용 배터리 쪽으로 이동시킨 양방향 컨버터의 고장률 변화를 분석한다. 두 컨버터의 회로 구조적 동일성과 차이점을 분석하여 커패시터 위치 변경으로 동작전압이 저감됨을 확인한다. 전압스트레스 인자와 동작온도에 따른 커패시터 부품 고장률을 구하고 양방향 컨버터의 고장나무에 적용하여 컨버터 전체 고장률을 구한다. 동작온도와 커패시턴스 값에 따른 고장률과 평균고장시간을 비교·분석하여 설계 변경으로 인한 장·단점을 분석한다.

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)

1. 서론

전기차 motor control unit(MCU) 구동 전압의 상승과 회생전력을 회수하기 위한 목적으로 적용되는 양방향 dc-to-dc 컨버터는 추진용 배터리를 추가적으로 적층하지 않고 MCU 구동전압을 상승시

킬 수 있는 효과적인 방법이다[1]-[3]. 양방향 컨버터의 동작은 승압모드와 강압모드로 구분된다. 전기차 구동시에는 승압모드로 동작해서 240 V의 추진용 배터리 전압으로부터 680 V 이상의 dc-link 전압을 생성하며, 전기차에 회생전력이 발생하여 dc-link 전압이 상승하는 경우에는 강압모드로 동

* 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. 26, 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.

작해서 추진용 배터리를 충전시키게 된다. 양방향 컨버터와 MCU의 사이에 위치하는 dc-link 커패시터는 승압모드시에 680 V 이상의 높은 전압 스트레스와 낮은 전압리플을 만족시키기 위해 충분한 크기의 커패시턴스를 가져야 한다. 하지만 높은 동작전압(Working Voltage)과 커패시턴스 용량의 증가는 커패시터의 단가상승을 초래한다. 이를 보완하기 위해 출력 커패시터의 위치를 변경한 양방향 컨버터가 소개되었다[3]. 이 컨버터는 출력 커패시터를 추진용 배터리와 직렬로 연결하는 구조로 커패시터의 동작전압을 추진용 배터리 전압 크기만큼 낮출 수 있는 장점이 있다. 변형된 컨버터의 입·출력 특성은 기존 양방향 컨버터와 동일하지만 추진용 배터리 전원이 항상 dc-link와 전기적으로 결합되어 있어 전기적 불안전성이 증가할 수 있다.

본 논문에서는 컨버터의 설계가 변경될 경우 발생할 수 있는 고장 발생 가능성을 분석하기 위해서 기존 양방향 컨버터와 커패시터 위치가 변경된 양방향 컨버터의 고장률을 분석·비교한다. 이를 위해서 변경이 발생된 커패시터 부품에 대한 고장률을 MIL-HDBK-217F[4]를 이용하여 구하고 커패시턴스 및 동작온도에 따른 고장률을 구한다. 다음으로 양방향 컨버터의 위험도를 고려한 고장나무(Fault-tree)에 커패시터 부품 고장률을 반영하여 컨버터 고장률의 변화를 비교·분석한다.

II. 양방향 컨버터의 고장률 분석

2.1 컨버터의 회로 구조적 차이

그림 1은 기존 양방향 dc-to-dc 컨버터의 회로 구조와 커패시터의 위치가 변경된 양방향 컨버터의 회로 구조를 보여준다. 상단의 기존 양방향 컨버터는 MCU와 연결되는 양단에 dc-link 커패시터가 위치하며 하단의 회로는 커패시터의 위치를 추진용 배터리 상단으로 이동하여 직렬결합 시킨다. 출력전압($V_{dc-link}$)은 추진용 배터리 전압과 커패시터 전압의 합으로 나타난다. 그러므로 추진용 배터리 전압의 크기만큼 커패시터의 동작전압이 감소한다. 두 컨버터 모두 동일하게 Q_1 의 스위칭에 의해서 승압모드가 제어되며, Q_2 의 스위칭에 의해 강압모드가 제어되어 동일한 입·출력 전압 특성을 갖는다.

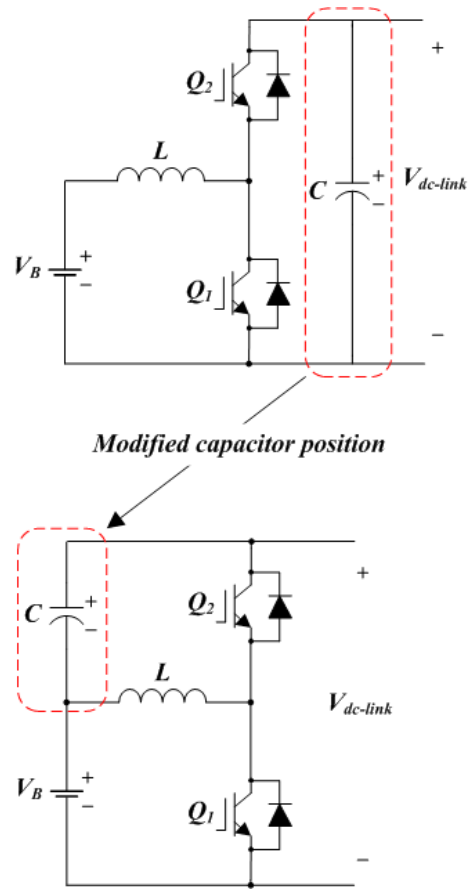


Fig. 1. Circuit configuration of prior bidirectional converter and converter with modified converter position.
그림 1. 기존 양방향 컨버터 회로 구조와 커패시터 위치가 변경된 컨버터

표 1에 두 컨버터의 설계 사양을 제시한다[5]. 승압모드에서 30 kW 용량을 기준으로 추진용 배터리 240 V에서 dc-link 680 V를 공급하도록 설계한다. 강압모드는 승압모드의 반대 방향이며 회생전력은 구동전력의 20%인 6 kW를 기준으로 설계한다. 두 컨버터의 유일한 차이는 커패시터의 결합 위치이며 표 1의 조건으로 설계할 경우 변형된 컨버터의 커패시터 동작전압은 440 V로 추진용 배터리 전압

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	$f_s = 20kHz$

240 V 만큼 낮은 동작전압의 커패시터 사용이 가능하여 원가절감이 가능하다[3].

2.2 커패시터 부품의 고장률

두 컨버터에서 사용하는 커패시터의 동작전압에 따른 부품 고장률을 MIL-HDBK-217F를 이용하여 구한다. 커패시터의 고장률은 $\lambda_{p,C}$ 은 식(1)로 구할 수 있다[4], [5].

$$\lambda_{p,C} = \lambda_b \pi_T \pi_C \pi_V \pi_{SR} \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6\text{h} \quad (1)$$

전해 커패시터의 기본 고장률 $\lambda_b=0.00012$, π_T 는 온도인자, π_C 는 커패시턴스 인자, π_V 는 전압 스트레스 인자, π_{SR} 은 직렬저항인자이고, π_Q 는 품질인자, π_E 는 환경인자이다.

두 컨버터에 사용되는 커패시터의 커패시턴스 값에 따른 전압 스트레스 인자 π_V 는 식(2)에 의해 구할 수 있다[4].

$$\pi_V = \left(\frac{S}{0.6}\right)^5 + 1 \quad (2)$$

여기서 S 는 식(3)과 같으며 V_{dc} 는 커패시터에 인가되는 DC 전압, $V_{pp\%}$ 는 전압리플의 피크치, V_R 은 커패시터 정격전압이다.

$$S = \frac{V_{dc} + V_{pp\%}}{V_R} \quad (3)$$

전압 정격의 1.5배 여유를 갖도록 선택하면 기존 컨버터의 V_R 은 1020 V, V_{dc} 는 680 V이고, 변형된 컨버터의 V_R 은 660 V, V_{dc} 는 440 V이다. 두 컨버터 모두 출력전압은 680 V이므로 전압리플의 피크치 $V_{pp\%}$ 는 동일하다. 그림 2(a)는 커패시터 전압 리플에 따른 전압 스트레스 인자의 변화를 보여준다. 변형된 컨버터의 커패시터 동작전압은 줄어들지만 전압 스트레스는 상대적으로 더 증가함을 보여준다.

인덕터 전류리플률 10%인 311 μH 인덕턴스를 가질 때 동작온도에 따른 커패시턴스 용량별 고장률을 그림 2(b)에 나타낸다. 210 μF , 150 $^\circ\text{C}$ 조건에서 기존 컨버터는 0.06255 Failures/ 10^4h , 변형된 컨버터는 0.06282 Failures/ 10^4h 의 커패시터 고장률을 가지며 변형된 컨버터의 커패시터가 0.00027 Failures/ 10^4h 만큼 고장률이 증가하지만 둘의 차이는 아주 작다. 또한 커패시턴스 값이 작고 동작온도가 낮을

수록 고장률은 낮으며 두 컨버터는 유사한 커패시터 고장률을 보임을 알 수 있다.

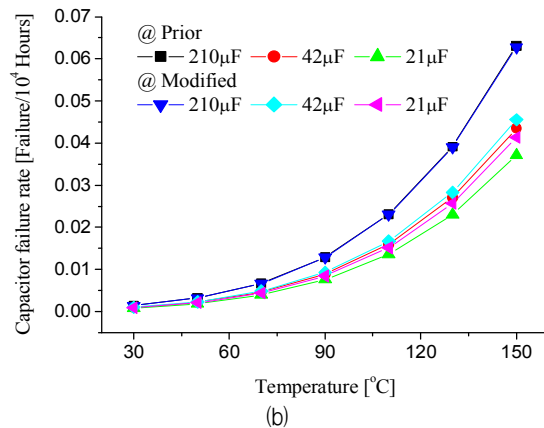
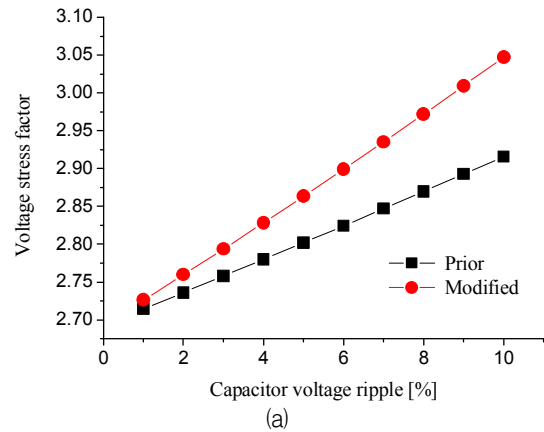


Fig. 2. Voltage stress factor and capacitor failure rate, (a) voltage stress factor with capacitor voltage ripple, (b) capacitor failure rate according to temperature.

그림 2. 전압스트레스 인자와 커패시터 고장률, (a) 커패시터 전압 리플에 따른 전압 스트레스 인자값, (b) 온도에 따른 커패시턴스 고장률

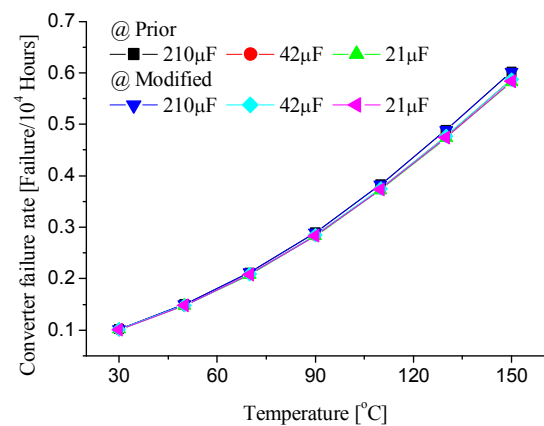


Fig. 3. Failure rate comparison of both converters according to capacitance value and operating temperature.

그림 3. 커패시턴스 값과 동작온도에 따른 두 컨버터의 고장률 비교

기존 양방향 컨버터와 커패시터 위치가 변경된 양방향 컨버터의 동작과 입·출력 전압 특성이 서로 동일하므로 컨버터의 동작의 위험도를 포함하는 고장나무(Fault-tree) 역시 동일하다[5]. 그림 3은 커패시턴스와 동작온도에 따른 두 컨버터의 고장률을 보여준다. 컨버터 개별 부품 고장률은 [5]에 주어진 결과 값과 동일하며 변형된 컨버터의 커패시터는 변경된 전압스트레스 인자값을 반영하여 구한 고장률을 적용한다. 두 컨버터의 고장률은 동작온도가 증가할수록 증가하는 특성을 보인다. 두 컨버터는 온도 변화에 따라 유사한 고장률을 가지며 가장 큰 차이를 보이는 210 μF , 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 기존 컨버터는 0.60164 Failures/ 10^4h , 변형된 컨버터는 0.60187 Failures/ 10^4h 로 0.00023 Failures/ 10^4h 의 차이를 가진다.

그림 4(a)는 고장률의 역수 관계로 정의되는 평균고장시간(MTBF)의 변화를 나타낸다[6], [7]. 온도가 높을수록 평균고장시간이 단축되어 고장 발생이 빈번해진다. 210 μF , 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 기존 컨버터는 16621 Hours, 변형된 컨버터는 16615 Hours로 약 6시간의 평균고장시간이 단축됨을 보여준다. 그림 4(b)는 커패시턴스 용량에 따라 최댓값을 갖는 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 MTBF와 최솟값을 갖는 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 MTBF의 차이를 비교한다. 낮은 용량의 커패시턴스에서는 기존 컨버터가 변형된 컨버터보다 온도에 강인한 특성을 나타내지만 커패시터 용량이 증가하면 온도변화에 대한 차이가 거의 없이 두 컨버터 모두 고장이 빈번해짐을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 전기차 MCU용으로 적합한 기존 양방향 컨버터와 출력 커패시터의 위치를 추진용 배터리 쪽으로 이동시킨 변형된 양방향 컨버터의 고장률을 비교·분석하였다. 먼저 두 컨버터의 회로 구조적 동일성과 차이점을 분석하고 변형된 컨버터의 커패시터가 낮은 동작전압을 가짐을 확인하였다. MIL-HDBK-217F를 기반으로 커패시터의 용량과 온도에 따른 전압스트레스 인자를 분석하고 커패시터 부품 고장률을 구하였다. 마지막으로 두 컨버터의 고장률을 비교한 결과, 평균고장시간에 가장 큰 차이를 보이는 210 μF , 150 $^{\circ}\text{C}$ 조건에서 기존 컨버터는 16621 Hours, 변형된 컨버터는 16615 Hours로 커패시터의 위치를 변경할 경우 커패시터의 동작전압은 추진용 배터리 전압의 크기인 240 V 만큼 저감이 가능하지만 평균고장시간은 기존 컨버터에 비해 6시간 단축됨을 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.

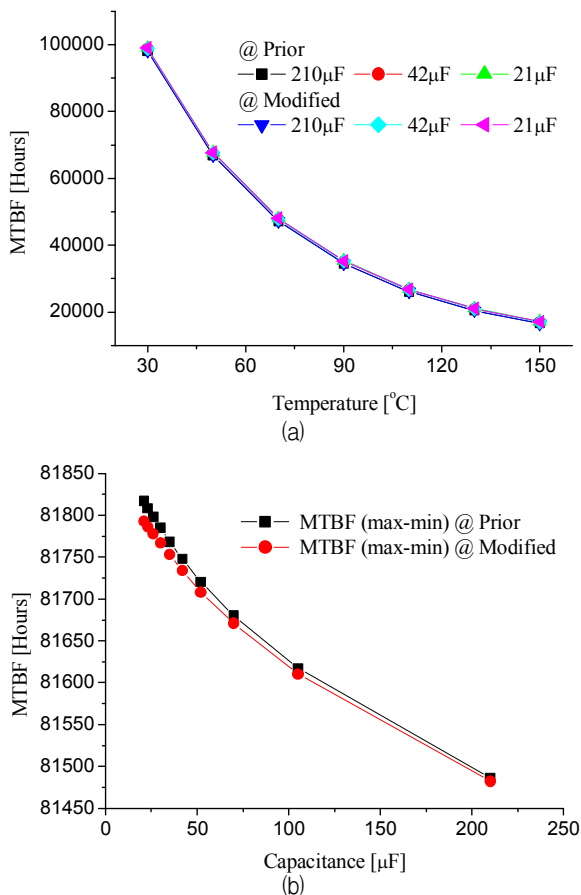


Fig. 4. MTBF comparison of both converters according to capacitance and operating temperature, (a) MTBF, (b) difference between maximum and minimum of MTBF.

그림 4. 커패시턴스 값과 동작온도에 따른 두 컨버터의 평균고장시간 비교, (a) 평균고장시간, (b) 평균고장시간 최댓값과 최솟값의 차

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] Military Handbook, *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, 1991.

[5] D. H. Kim and F. S. Kang, "Fault-tree based reliability analysis for bidirectional converter," *Journal of inst. Korean. electr. electron. eng.*, vol. 23, no. 1, 2019.

[6] 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.

[7] 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

BIOGRAPHY

Ye-rin Kim (Member)



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

2015~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.