https://doi.org/10.6113/TKPE.2022.27.6.535

태양광 시스템의 미션 프로파일 고려한 3-레벨 NPC 인버터의 DC-link 커패시터 신뢰성 비교 분석

최재헌[1], 최의민†

Comparative Reliability Analysis of DC-link Capacitor of 3-Level NPC Inverter Considering Mission-Profiles of PV Systems

Jae-Heon Choi[1] and Ui-Min Choi†

Abstract

DC-link capacitors are reliability-critical components in a photovoltaic (PV) inverter. Typically, the lifetime of a DC-link capacitor is evaluated by considering the voltage and hot-spot temperature of the capacitor under the specific operating condition of the PV inverter. However, the output of the PV inverter is determined by solar irradiation and ambient temperature, which vary with the seasons; accordingly, the hot-spot temperature of the capacitor also changes. Therefore, the mission profile of the PV system should be considered to effectively evaluate the reliability of the DC-link capacitor. In this study, the reliability of the DC-link capacitor of a three-level NPC inverter is comparatively analyzed with and without considering the mission profiles of the PV system, where two mission profiles recorded in Arizona and Iza are considered. The accumulated damage of the DC-link capacitor is calculated based on the lifetime model by analyzing its thermal loading. Afterward, a reliability evaluation of the DC-link capacitor is performed at the component level and then at the system level by considering all capacitors by means of Monte Carlo analysis. Results reveal the importance of performing a mission-profile-based reliability evaluation during the design of high-reliability PV inverters to achieve the target reliability performance.

Key words: NPC inverter, DC-link capacitor, Reliability, PV system, Lifetime

1. 서 론

오늘날, 지구 온난화에 대한 문제가 부각되면서 탄소 배출 저감을 위한 신재생 에너지 발전 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 신재생 에너지 발전이 기존 화석 연료 기반 에너지 발전을 효과적으로 대체하기 위해서는 경쟁력 있는 에너지 원가(Cost-Of-Energy, COE)가 요구된다. 에너지 원가는 자본비, 운영유지비 및 연간 에너지 생산량으로 정의되며 신재생 에너지 발전 시스템의 신뢰성 향상은 운영유지비를 감소시키고 연간 에너지 생산량을 증가시켜 에너지 원가를 감소시킨다. 따라서, 신재생 에너지 발전 시스템의 신뢰성은 에너지 원가와 직결되는 중요한 문제 중 하나이다. 이에 따라, 신재생 에너지 발전 시스템의 신뢰성을 보장 및 향상 시키기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다[1]-[3].

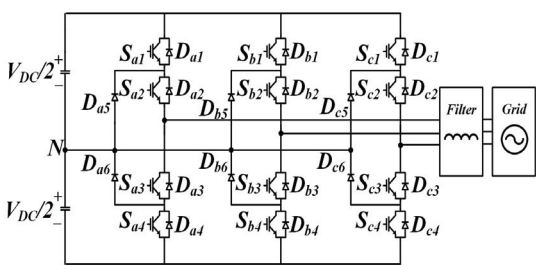


Fig. 1. Configuration of three-level NPC inverter.

Paper number: TKPE-2022-27-6-10
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: uch@seoultech.ac.kr, Dept. of Electronic & IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
Tel: +82-2-970-6437 Fax: +82-43-841-53200
[1] Dept. of IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
Manuscript received Sep. 26, 2022; revised Oct. 7, 2022; accepted Oct. 7, 2022
— 본 논문은 2022년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임
— 본 논문은 2022년 전력전자학술대회 우수추천 논문임

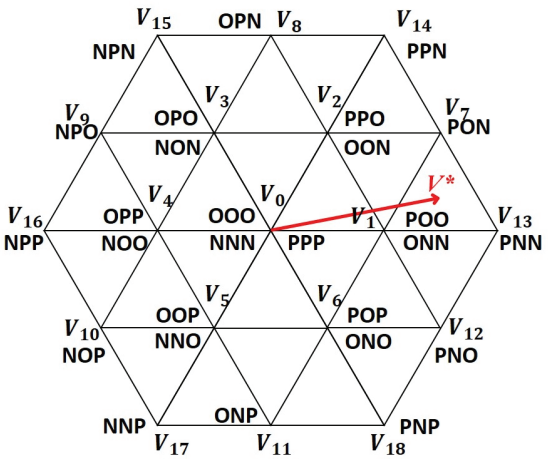


Fig. 2. Space vector diagram and reference voltage vector

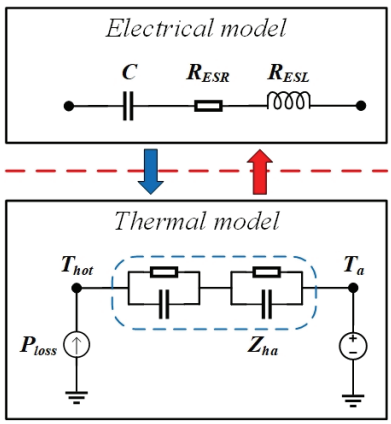


Fig. 3. Electrothermal model of the DC-link capacitors

3.5MW 태양광 발전 플랜트에서 5년간 발생한 고장을 분석한 결과에 따르면, 태양광 인버터는 태양광 발전 시스템 주요 고장 원인으로 여겨지며 DC-link 커패시터는 태양광 인버터의 주요 신뢰성 취약 소자이다.[4]-[5] 따라서, 오늘날 요구되는 태양광 발전 시스템의 신뢰성 성능을 만족시키기 위해서는 커패시터의 수명을 고려한 태양광 인버터의 신뢰성 설계가 필수적이다. 일반적으로, DC-link 커패시터의 수명 평가는 태양광 인버터의 특정 출력 및 특정 기온 조건에서 이루어진다. 하지만 실제 태양광 인버터의 출력은 계절에 따른 일사량 및 대기 온도에 영향을 받으며, 이에 따라 DC-link 커패시터의 동작 온도 또한 변화한다[6]. 따라서, 효과적인 DC-link 커패시터의 신뢰성 평가를 위해서는 태양광 인버터의 미션 프로파일이 고려되어야만 한다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 미션 프로파일에 따른 3-레벨 NPC 인버터 DC-link 커패시터의 수명을 분석한다. 미션 프로파일 고려 여부 및 서로 다른 미션 프로파일을 고려했을 때, DC-link 커패시터의 신뢰성을 PV 인버터 수준에서 비교 분석한다. 태양광 발전 시스템의 미션 프로파일을 고려하여 DC-link 커패시터의 열 부하와 개별 커패시터의 누적 손상률을 분석한다. 그 후, 몬테 카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 적용하여 각 커패시터 소자의 비신뢰성 함수를 얻고, 이를 통해, 모든 커패시터 소자를 고려한 PV 인버터 시스템 수준에서의 DC-link 커패시터의 신뢰성을 분석한다.

2. 본 론

2.1 NPC 인버터와 공간 벡터 변조 방법

그림 1은 3-레벨 중성점 클램핑(Neutral point clamped, NPC) 인버터의 구조를 보여주고 있다. NPC 인버터는 대표적인 3-레벨 인버터 토폴로지 중 하나로, 3-레벨 인버터는 2-레벨 인버터에 비해 반도체 스위치의 낮은 전압 스트레스 및 출력 전류의 낮은 전고조파 왜율 등의 장점을 가지고 있어 태양광 발전 시스템을 포함한 다양한 응용 분야에서 널리 사용되고 있다[7]-[8]. 3-레벨 NPC 인버터는 한 레그에 4개의 IGBT 스위치로 구성되어 있으며, 각 스위치의 동작 상태에 따라 3가지의 스위칭 상태 [P], [O] 그리고 [N]을 가진다. 스위칭 상태 [P]는 $S_{x(x=a,b,c)1}$과 S_{x2}가 켜진 상태를 의미하고 출력 극전압은 $+V_{DC}/2$가 된다. S_{x2}와 S_{x3}가 켜져 있는 스위칭 상태를 [O]라하며 이때 출력 극전압은 0이 된다. 마지막으로, 스위칭 상태 [N]은 S_{x3}과 S_{x4}가 켜진 상태로출력 극전압은 $-V_{DC}/2$가 된다. 따라서, 3-레벨 NPC 인버터는 총 27가지의 스위칭 상태 조합을 가지게 되고, 그림 2와 같이 공간벡터도로 나타낼 수 있다.

그림 2와 같이, 공간벡터도는 전압 벡터와 해당하는 스위칭 상태로 나타낼 수 있다. 전압 벡터들은 크기에 따라 영 벡터, 작은 벡터, 중간 벡터, 큰 벡터로 분류된다. 영 벡터는 V_0로 표기하며, 그 크기는 0과 같다. 작은 벡터는 V_1-V_6으로, 중간 벡터는 V_7-V_{12}으로 표기하고, 크기는 각각 $V_{DC}/3$과 $V_{DC}/\sqrt{3}$이다. 마지막으로, V_{13}-V_{18}은 큰 벡터를 의미하고 크기는 $2 \cdot V_{DC}/3$와 같다.

공간 벡터 변조 방법(Space vector pulse width modulation, SVPWM)은 지령 전압 벡터 V^*와 가장 인접한 전압 벡터들을 선택하여 합성하는 변조 방법이다. 그림 2와 같이 지령 전압 벡터 V^*가 위치할 때, V_1, V_7 그리고 V_{13}을 합성하여 지령 전압을 생성한다. 따라서, 그림 2와 같이 V^*가 위치할 때, SVPWM의 스위칭 순서는 [ONN] - [PNN] - [PON] - [POO] - [PON] - [PNN] - [ONN]이다.

2.2 DC-link 커패시터의 열 부하 분석

커패시터의 열화 고장은 주로 온도 스트레스에 의해 발생되며, 온도 스트레스는 주로 커패시터 전류에 의한 전력 손실로 인해 발생한다[9]-[10]. 커패시터의 전력 손실은 커패시터에 흐르는 전류와 등가 직렬 저항(Equivalent series resistance, ESR)에 의해 발생하며,

TABLE I
SIMULATION PARAMETER

Parameter	Value
Rated Power	20 [kW]
DC-link voltage	650 [V]
Grid voltage	220 [V_{rms}]
Grid frequency	60 [Hz]
Switching frequency	15 [kHz]
DC-link capacitance	2200 [uF]
Filter inductance	1.5 [mH]

커패시터의 온도 및 전기적 특성을 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 커패시터의 전력 손실은 식 (1)과 같다.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{m} [ESR(f_i, T_{hot}) \times I_{rms}^2(f_i)] \quad (1)$$

여기서 T_{hot}은 커패시터의 동작온도, $I_{rms}(f_i)$는 특정 주파수에서 커패시터 전류 실효값이다. ESR은 커패시터의 동작 온도와 주파수에 따라 다른 값을 가지기 때문에 커패시터의 전력 손실을 얻기 위해서는 이를 고려해주어야 한다. 전력 손실 P_{loss}에 의한 DC-link 커패시터의 동작 온도는 다음과 같다.

$$T_{hot} = T_a + R_{ha} \times P_{loss} \quad (2)$$

여기서 T_a는 대기 온도이고 R_{ha}는 커패시터의 고온점에서부터 대기까지의 열 저항을 의미하고 커패시터의 표면적에 반비례하다. 커패시터의 수명 L은 동작 온도 T_{hot}와 전압에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$L = L_0 \times (\frac{V}{V_0})^{-n} \times 2^{\frac{T_0 - T_{hot}}{10}} \quad (3)$$

여기서, L_0, V_0, T_0 그리고 V는 각각 커패시터의 가속 수명, 정격 전압, 정격 온도 그리고 동작 전압을 나타낸다. n은 전압 스트레스 지수이며, 전해 커패시터의 경우 지수 n은 대략 3에서 5사이의 값을 갖는다[11]. 따라서 커패시터의 예상 수명 L은 커패시터의 동작 온도 T_{hot}에 직접적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

2.3 DC-link 커패시터의 누적 손상률

커패시터 신뢰성 분석을 위한 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다. 커패시터는 TDK B43510 모델이 고려되었으며, NPC 인버터의 직류단은 2개의 전해 커패시터로 구성되어 있다고 가정하였다. 커패시터 수명 모델에 관한 파라미터는 참고문헌 [12]과 [13]을 참고하였다.

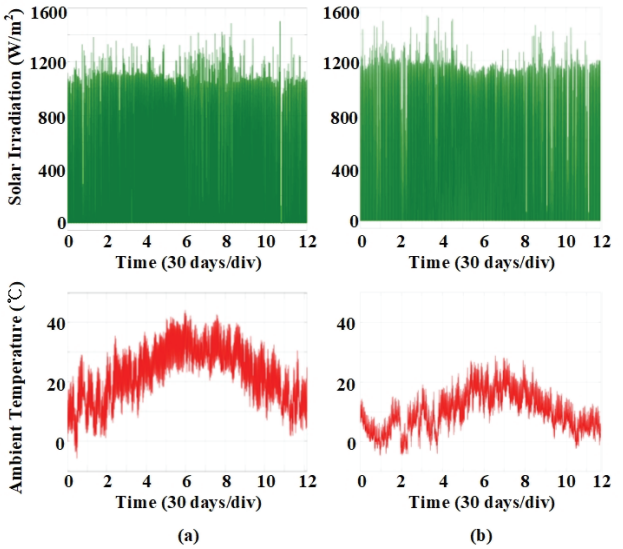


Fig. 4. Annual mission-profiles of PV system recorded in (a) Arizona, USA (b) Iza, Spain.

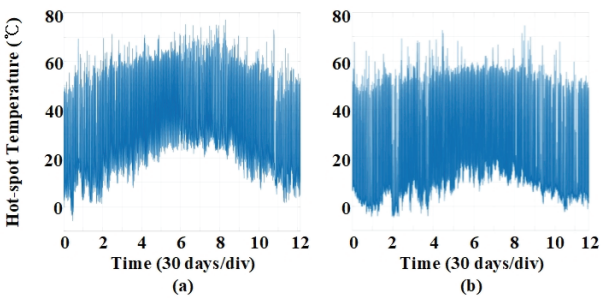


Fig. 5. Hot-spot temperature profiles of DC-link capacitor under the mission-profile recorded in (a) Arizona, USA (b) Iza, Spain.

미션 프로파일을 고려하지 않았을 경우와 미국 애리조나(Arizona, USA)와 스페인 이자(Iza, Spain)에서 1년간 측정된 태양광 시스템의 미션 프로파일을 고려한 경우로 나누어 PV 인버터의 DC-link 커패시터 신뢰성을 비교 분석 하였다. 미션 프로파일을 고려하지 않았을 경우, 대기 온도는 40℃, PV 인버터의 출력은 20kW, 그리고 하루 8시간 동작을 조건으로 하였다. 전해 커패시터의 경우, 온도 스트레스가 마모 고장의 주된 원인이다. 따라서, 본 논문에서는 온도 스트레스에 따른 DC-link 커패시터의 수명 분석에 초점을 맞추었다.

그림 4는 Arizona와 Iza에서 1년간 측정된 태양광 시스템의 미션 프로파일을 보여주고 있다. 그림 5는 그림 4와 같이, Arizona와 Iza의 미션 프로파일을 고려했을 때, 식 (1)과 (2)로부터 얻은 PV 인버터의 DC-link 커패시터 동작 온도를 보여주고 있다. 그림 4와 5를 통해 알 수 있듯, 미션 프로파일은 측정되는 지역에 따라 다른 값을 가지고 있기 때문에 같은 PV 인버터 시스템일지라도, DC-link 커패시터에 가해지는 열 부하는 달라진다는 것을 알 수 있다.

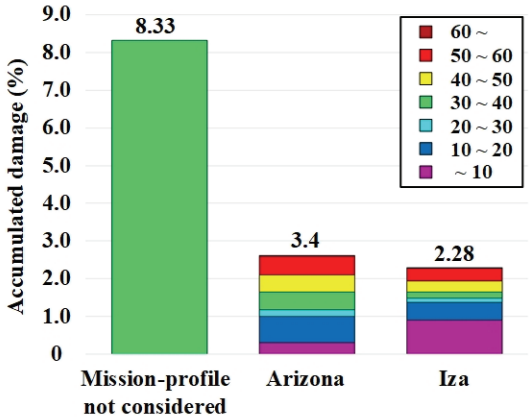


Fig. 6. Accumulated damages of the capacitor with and without considering the annual mission profile of the PV system.

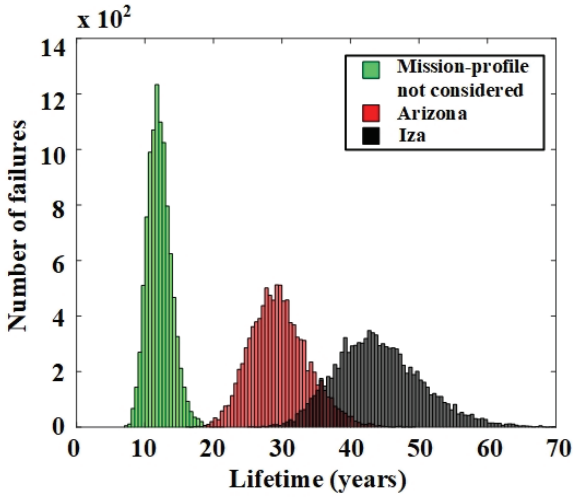


Fig. 7. The lifetime distributions of the capacitors with and without considering the annual mission profile of the PV system.

미션 프로파일을 고려한 DC-link 커패시터의 동작 온도와 식 (3)을 이용하여, Palmgren-Miner 법칙에 의해 DC-link 커패시터의 누적 손상률(Accumulated Damage, AD)은 다음과 같이 계산된다[14]-[16].

$$AD=\sum_{i=1}^{k}\frac{t_i}{(L_f)_i} \tag{4}$$

여기서 t_i는 특정 조건에서의 시간 비율을 의미하고, $(L_f)_i$는 특정 온도 조건에서, 식 (3)으로부터 계산된, DC-link 커패시터가 고장 나기까지 걸린 시간을 의미한다. 누적 손상률 AD가 $AD=1$을 만족한다면, 이는 고장이 발생한 것으로 판단한다.

그림 6은 미션 프로파일을 고려하지 않았을 경우와 두 종류의 미션 프로파일을 고려했을 경우, DC-link 커패시터의 연간 누적 손상률을 보여주고 있다. 실제 PV 인버터가 동작환경을 고려하지 않은 경우 DC-link 커패시터의 누적 손상률은 8.33%로, 미션 프로파일을 고려한 경우보다 더 큰 누적 손상률 값을 갖는다. Arizona의 미션 프로파일을 고려했을 경우, 누적 손상률은 3.4%이고 Iza의 미션 프로파일을 고려했을 경우, 누적 손상률은 2.28%이다. 지역의 위치 특성상, Arizona의 일사량 및 대기 온도가 Iza 보다 가 더 큰 값을 가지기 때문에 Arizona의 미션프로파일에 하에서 동작한 PV 인버터의 DC-link 커패시터의 열 부하가 더 크다는 것을 알 수 있다.

2.4 PV 인버터 시스템 수준에서의 DC-link 커패시터 신뢰성 분석

실제로 개별 커패시터는 물리적 파라미터의 차이, 제조 공정에서의 차이 등과 같은 다양한 이유로 인해 같은 조건에서 동작하더라고 서로 다른 수명을 갖는다. 따라서, 커패시터의 수명은 고정된 값으로 표현되는 것이 아닌 통계적 분석을 기반으로 한 백분위 수명으로 표현되어야 한다. 하지만 일반적으로 통계적 분석을 고려한 수명 모델은 제공되고 있지 않기 때문에 본 논문에서는 몬테카를로 분석 방법을 이용하여 커패시터의 백분위 수명을 분석하였다[17]. 몬테카를로 시뮬레이션에서 커패시터 수명 모델의 파라미터 및 온도 스트레스는 편차가 5%인 정규 분포를 따른다고 가정하였으며 10000개의 표본이 고려되었다.

그림 7은 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 수집된 10000개의 표본에 대한 수명 분포를 히스토그램으로 보여주고 있다. 미션 프로파일을 고려하지 않은 경우, 데이터 중심은 12년, 데이터 산포는 약 7년에서 19년이다. Arizona의 미션 프로파일을 고려한 경우, 데이터 중심은 약 29년이고, 데이터 산포는 약 18년에서 45년이다. 마지막으로, Iza의 미션 프로파일을 고려한 경우, 데이터 중심은 약 43년이, 데이터 산포는 약 26년에서 70년이다. 즉, 미션 프로파일의 고려 여부 및 미션 프로파일에 따라 DC-link 커패시터의 평균 수명이 다르다는 것을 알 수 있다.

몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 그림 8과 같이 개별 커패시터의 수명 분포를 얻고 와이블 분포(Weibull distribution)로부터의 확률 밀도 함수 $f(t)$는 식 (5)와 같다.

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{5}$$

여기서 β와 η는 형태 파라미터와 크기 파라미터를 의미하고, t는 동작 시간을 의미한다. 그림 8은 미션 프로파일 고려 여부 및 미션 프로파일에 따른 개별 커패시터의 $f(t)$를 보여주고 있다. 확률 밀도 함수로부터 누적

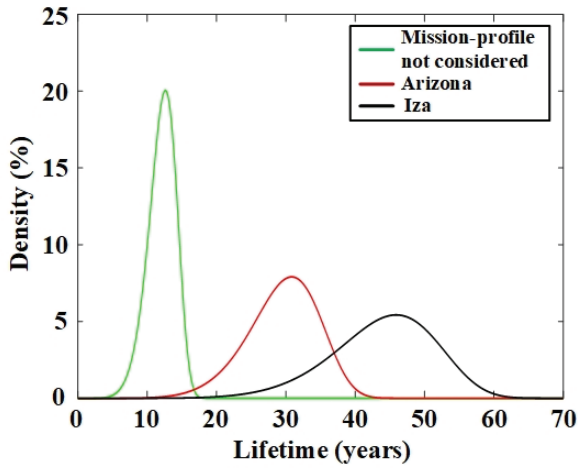


Fig. 8. The Weibull probability density functions from the lifetime distributions.

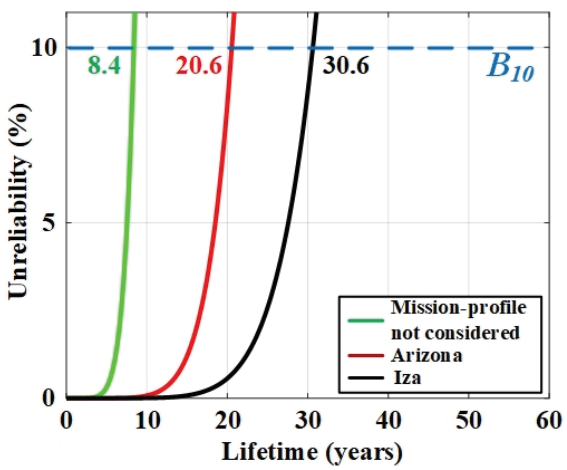


Fig. 9. System-level unreliability functions of DC-link capacitors and B_{10} lifetimes.

확률 밀도 함수를 식 (6)과 같이 얻을 수 있으며 이를 비신뢰성 함수 $F(t)$라고 한다.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dx \tag{6}$$

여기서 비신뢰성 함수 $F(t)$는 한 개의 커패시터 소자만을 고려한 것이기 때문에 인버터 시스템 전체에 대한 비신뢰성 함수는 식 (7)과 같다.

$$F_{entire}(t) = 1 - \prod_{k=1}^{n}(1 - F_k(t)) \tag{7}$$

여기서 n은 PV 인버터의 DC-link 커패시터 전체 소자 개수를 의미하고, $F_k(t)$는 k번 커패시터의 비신뢰성 함수를 의미한다.

그림 9는 PV 인버터 시스템 수준에서의 DC-link 커패시터의 비신뢰성 함수와 B_{10} 수명을 보여주고 있다. B_{10} 수명이란, 특정 모집단의 10%에 고장이 발생할 때까지의 시간을 의미한다. 본 논문에서는 10000 개의 커패시터의 10%에 고장이 발생하기까지의 시간을 의미한다. 미션 프로파일을 고려하지 않은 경우, DC-link 커패시터의 B_{10} 수명이 8.4년으로 가장 짧았다. Arizona와 Iza의 미션 프로파일을 고려한 경우, DC-link 커패시터의 B_{10} 수명이 각각 20.6년과 30.6년으로, 미션 프로파일을 고려하지 않은 경우 보다 약 2.5배, 3.6배 긴 예측 수명을 갖는다.

3. 결 론

본 논문에서는 Arizona 및 Iza에에서 측정된 태양광 시스템의 미션프로파일을 고려하여 태양광 시스템의 미션프로파일 및 미션프로파일 적용 여부에 따른 태양광 NPC 인버터의 DC-link 커패시터의 수명을 비교 분석하였다. 미션프로파일 고려하지 않은 경우 DC-link 커패시터의 B_{10} 수명은 8.4년으로 가장 짧았으며 Arizona와 Iza의 미션프로파일이 고려된 경우 B_{10} 수명은 20.6년과 30.6년으로 분석 되었다. 이로부터 태양광 인버터의 설치 장소에 따라 태양광 인버터의 신뢰성은 달리지게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 태양광 인버터의 미션프로파일을 고려하지 않고 정격 출력에서의 동작만을 고려할 경우 과도한 신뢰성 설계로 인한 비용 상승을 야기할 수 있다. 따라서 과도한 신뢰성 설계를 방지하고 태양광 인버터에 요구되는 신뢰성을 충족하기 위해서는 미션프로파일을 고려한 신뢰성 설계가 이루어져야한다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1A2C1091791).

References

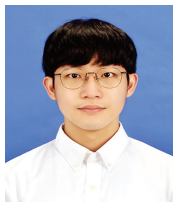
[1] J.M. Lenz, et al., “Mission profile characterization of PV systems for the specification of power converter design requirements,” *Sol. Energy*, Vol. 157, pp. 263 - 276, 2017.

[2] Y. Yong, A. Sangwongwanich, and F. Blaabjerg, “Design for reliability of power electronics for grid-connected photovoltaic systems,” *CPSS Trans. on Power Electron. Appl.*, Vol. 1, No. 1, pp. 92-103, Dec. 2016.

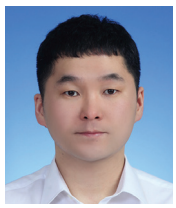
[3] P. V. Chiantore *et al.*, “Future renewable energy costs: solar photovoltaics,” Tech. Rep., 2015, [Online]. Available: https://www.innoenergy.com/

[4] L. M. Moore and H. N. Post, “Five years of operating

experience at a large, utility-scale photovoltaic generating plant," *Progress Photovoltaic: Research and Application*, Vol. 16, No. 3, pp. 249 - 259, 2008.
[5] S. Yang, D. Xiang, P. Mawby, L. Ran, P. Tavner, "Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 11, pp. 2734-2752, Nov. 2010.
[6] A. Golnas, "PV system reliability: an operator's perspective," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, No. 1, pp. 416-421, Jan. 2013.
[7] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-17, No. 5, pp. 518-523, Sep./Oct. 1981.
[8] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, L. G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: an overview of recent research and emerging PV converter technology," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, Vol. 9, No. 1, pp. 47-61. Mar. 2015.
[9] H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters - an overview," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No. 5, pp. 3569-3578, Sep./Oct. 2014.
[10] Y. Yang, K. Ma, H. Wang and F. Blaabjerg, "Instantaneous thermal modeling of the DC-link capacitor in photovoltaic systems," *IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 2733-2739, Mar. 2015.
[11] A. Albertsen, "Electrolytic capacitor lifetime estimation," Jianghai Capacitor Technical Note. [Online]. Available:http://jianghai-america.com/uploads/technology/JIANGHAI_Elcap_Lifetime_-_Estimation_AAL.pdf, Apr. 2020.
[12] H. Wang, C. Li, G. Zhu, Y. Liu and H. Wang, "Model-based design and optimization of hybrid DC-link capacitor banks," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 35, No. 9, pp. 8910-8925, Sep. 2020.
[13] TDK, "Aluminum electrolytic capacitors," B43630 datasheet, Dec. 2019.
[14] M. Miner, "Cumulative damage in fatigue," *J. Appl. Mech.*, Vol. 34, No. 5, pp. 4064-4078, May 2019.
[15] D. Zhou, H. Wang and F. Blaabjerg, "Lifetime estimation of electrolytic capacitors in a fuel cell power converter at various confidence levels," *IEEE Annual Southern Power Electron. Conf.*, pp. 1-6, Dec. 2016.
[16] D. Zhou, H. Wang and F. Blaabjerg, "Mission profile based system-level reliability analysis of DC/DC converters for a backup power application," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, No. 9, pp. 8030-8039, Sep. 2018.
[17] H. Wang, P. Davari, H. Wang, D. Kumar, F. Zare and F. Blaabjerg, "Lifetime estimation of DC-link capacitors in adjustable speed drives under grid voltage unbalances," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 34, No. 5, pp. 4064-4078, May 2019.



최재헌(崔宰憲)
1996년 11월 27일생. 2021년 서울과학기술대 전자IT미디어공학과 졸업. 2021년~현재 동 대학원 IT미디어공학과 석사과정.



최의민(崔毅敏)
2011년 아주대 전자공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2016년 Department of Energy Technology, Aalborg University(덴마크) 졸업(공박). 2016년~2018년 동 대학원 박사후연구원. 2018년~현재 서울과기대 전자IT미디어공학과 조교수. 당 학회 편집위원.