

ESS 하드웨어 다중화에 따른 신뢰성 분석에 관한 연구

김남규, 김명진*

충북대학교

imtng@chungbuk.ac.kr, *mckim@chungbuk.ac.kr

A Study on Reliability Analysis According to ESS Hardwares Redundancy

Namgyu Kim, Myungchin Kim*

Chungbuk National Univ.

요 약

태양광(Photovoltaic: PV) 발전 시스템이 증가함에 따라 안정적인 전력 공급을 위해 에너지 저장 시스템(Energy Storage System: ESS)이 요구된다. 그러나 ESS의 높은 가격으로 인해 유지보수 비용을 낮추기 위해서는 배터리의 수명 특성과 전력 변환 장치(Power Conversion System: PCS)의 신뢰성을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 ESS 시스템 구성에 따른 PCS의 신뢰성 분석을 통해 유지보수 비용을 최소화하기 위한 시스템 구성 방안을 제시한다.

I. 서론

태양광 발전 시스템과 같은 신재생 에너지원이 증가함에 따라 특정 시간대에 순 부하가 낮아지는 덕 커브(Duck curve) 현상이 더욱 심해지고 있다. 이에 전력 수요·공급을 일정하게 유지하기 위해 에너지 저장 시스템이 요구된다. 그러나 ESS의 높은 가격으로 인해 배터리의 수명과 전력 변환 장치의 신뢰성을 고려하여 운영비용을 최소화하기 위한 설계가 필요하다. 그 중 3상 인버터로 구성된 PCS의 MTBF(Mean time between failures)는 5년 이하로 분석된 선행 연구가 있으며[1], 고장에 의한 시스템 교체는 운용비용 증가로 이어진다. 다양한 고장 요인 중 스위칭 소자의 고장률이 전체 고장률의 큰 비중을 차지하는 것을 확인할 수 있으며[2], 스위칭 소자의 고장률을 낮추기 위해 접합 온도를 낮춰 열적 스트레스를 줄여야 한다. 접합 온도를 낮추는 방안으로 방열 설계를 하거나 시스템을 병렬로 추가 연결함으로써 전력 손실을 줄이는 방안 등이 있다. 한편, 예비 전원을 추가로 설치하여 주 전원이 고장 발생 시 예비 전원이 동작함으로써 전체 시스템의 고장률을 낮추는 방안도 제시되었다[3]. 이에 본 논문에서는 계통 연계형 3상 인버터의 고장률을 분석 후, 다양한 시스템 구성에 대한 신뢰성을 분석한다.

II. 본론

2.1. 3상 인버터 고장률 분석

배터리를 계통과 연계하기 위해 DC 신호를 AC 신호로 변환하는 인버터가 필요하다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 커패시터 1개, IGBT 스위칭 소자 6개, Diode 소자 6개 그리고 인덕터 3개로 구성된 시스템을 고려하였다. 신뢰성 분석 방법은 MIL-HDBK-217F 핸드북을 참조하였으며, 3상 인버터의 고장률은 아래와 같다.

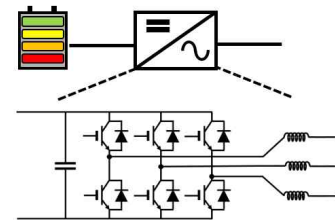
$$\lambda_p = \lambda_C + 3 \times \lambda_L + 6 \times (\lambda_I + \lambda_D) \quad (1)$$

여기서, λ_p 는 전체 시스템의 고장률, λ_C 는 커패시터 고장률, λ_L 는 인덕터 고장률, λ_I 는 IGBT 고장률 그리고 λ_D 는 다이오드 고장률이다. 전체 시스템 고장률인 λ_p 를 이용하여 MTBF와 신뢰도는 다음과 같이 계산된다.

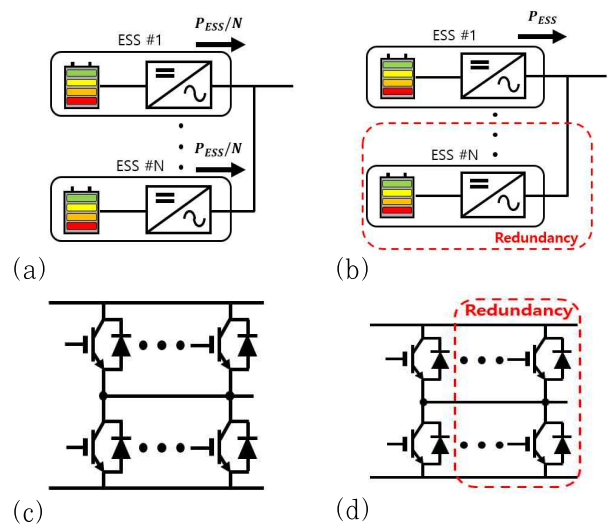
$$MTBF = 1/\lambda_p \quad (2)$$

$$R = e^{-\lambda_p t} \quad (3)$$

λ_p 가 낮을수록 MTBF는 증가하며, 시간에 따른 신뢰성 또한 향상됨을 알 수 있다.

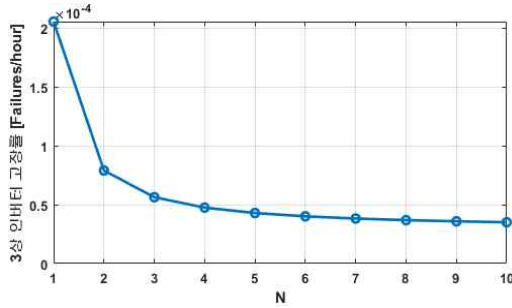


〈그림 1〉 ESS 하드웨어 구성

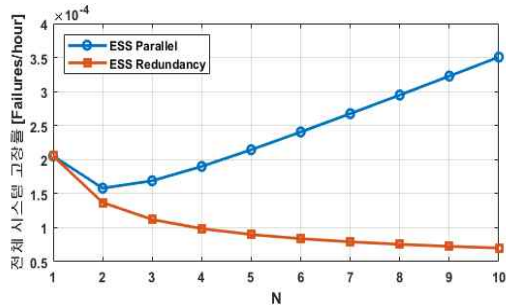


〈그림 2〉 ESS 구성 방안

- (a) 병렬 구성 (b) 다중화 구성 (c) IGBT 모듈 병렬 구성
(d) IGBT 모듈 다중화 구성



〈그림 3〉 ESS 수에 따른 각 인버터의 고장률



〈그림 4〉 ESS 구성에 따른 전체 시스템 고장률

2.2. ESS 시스템 구성에 따른 고장률 분석

신뢰성을 향상시키는 방안으로는 고장률 증가의 원인이 되는 스위칭 소자의 접합 온도를 낮추기 위해 열 저항이 낮은 방열판 혹은 쿨링 시스템을 이용함으로써 방열 설계하는 방안이 있다. 그러나 시스템의 부피를 줄여야 하거나 쿨링 시스템 추가함으로써 발생하는 고장률로 인해 방열 설계에 한계가 있는 경우에는 그림 2와 같이 ESS 혹은 스위칭 소자를 병렬로 추가 연결하는 방안이 있다[4]. 그림 2 (a) 구성의 경우, 다수의 ESS를 병렬로 연결함으로써 각 인버터에서 소비되는 전력 손실을 줄일 수 있다. 즉, 접합 온도가 감소함으로써 그림 3과 같이 각 ESS 인버터의 고장률을 감소시킬 수 있다. 그러나 해당 시스템의 경우에는 모든 ESS가 동작해야 하기 때문에 아래 식과 같이 인버터의 개수에 따른 전체 시스템의 신뢰성에 대한 분석도 필요하다.

$$\lambda_p = \lambda_{p,N} \times N \quad (4)$$

여기서, $\lambda_{p,N}$ 은 각 ESS 인버터의 고장률, N 은 인버터의 개수이다. 식 (4)을 통해 전체 시스템에 대한 고장률을 구할 수 있으며 그 결과는 그림 4에서 확인할 수 있다. $N=2$ 인 경우, 단일 ESS인 경우에 비해 고장률이 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 인버터 수가 증가함에 따라 전체 시스템의 고장률이 증가하며, $N=5$ 인 순간부터 단일 ESS인 경우보다 고장률이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

한편, 그림 2 (b) 구성의 경우, 하나의 ESS를 가동시킨 후, 고장이 발생한 경우 나머지 ESS를 작동시키는 방안이다. 인버터의 고장률은 단일 시스템을 작동시킨 경우와 같으나, 예비 시스템을 구성함으로써 아래 식과 같이 전체 시스템의 고장률을 낮출 수 있다[3].

$$\lambda_p = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i}} \quad (5)$$

여기서, λ 은 단일 ESS 인버터의 고장률이다. 그림 4를 보면 인버터 수가 증가함에 따라 고장률이 점점 낮아짐을 확인할 수 있다. 그러나 N 이 증가함에 따라 고장률이 감소하는 폭은 줄어들며 시스템 추가 구성으로 인한 비용 증가도 고려해야 한다. 그림 2 (c)의 경우, 전체 고장률의 큰 비중을 차지하는 IGBT 및 다이오드를 병렬로 연결함으로써, IGBT 및 다이오드

에 흐르는 전류를 감소시켜 전력 손실 및 접합 온도를 줄임으로써 고장률을 낮추는 방안 중 하나이다. 그림 2 (d)의 경우, 스위칭 소자를 그림 2 (b)와 같이 다중화 구성함으로써 스위칭 소자 고장 발생 후 나머지 스위칭 소자를 사용하는 방식이다.

III. 결론

본 논문에서는 ESS 시스템 구성에 따른 고장률 분석 결과를 확인할 수 있었다. 병렬 구성의 경우, 각 ESS의 인버터에서 발생하는 전력 손실을 줄이고 고장률을 낮출 수 있다. 그러나 모든 ESS를 동시에 가동함으로써 전체 시스템의 고장률 감소에 한계가 있음을 확인할 수 있다. 반면, 다중화 구성의 경우 ESS의 인버터에서 부담하는 전력 손실은 크지만 인버터 수가 증가함에 따라 전체 시스템의 고장률이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 고장률 분석 결과는 방열 설계를 어떻게 하는지 따라 달라질 수 있다. 향후 경제성 분석 및 배터리의 수명 특성을 추가하여 ESS의 최적 구성 방안에 대한 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2020R1C1C1011572). 또한, 이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2020R1A6A1A12047945).

참고 문헌

- [1] Kwak Y.-g., Heo D.-h., Kim S.-P, Song S.-G, Park S.-J, Kang F.-s, "Reliability and Economic Efficiency Analysis of 4-Leg Inverter Compared with 3-Leg Inverters." *Electronics* 2021, 10(1), 87, Jan, 2021.
- [2] F. Chan and H. Calleja, "Reliability Estimation of Three Single-Phase Topologies in Grid-Connected PV Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2683-2689, July 2011.
- [3] X. Yu and A. M. Khambadkone, "Reliability Analysis and Cost Optimization of Parallel-Inverter System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3881-3889, Oct. 2012.
- [4] H. Behjati and A. Davoudi, "Reliability Analysis Framework for Structural Redundancy in Power Semiconductors," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4376-4386, Oct. 2013.