

여유율을 고려한 Markov model 기반 하이브리드 PCS의 신뢰성 분석

임성진¹, 강필순¹, 김선필², 박성준³
 경상국립대학교¹, 국립목포대학교², 전남대학교³

Reliability analysis of hybrid PCS based on Markov analysis considering redundancy

Seong Jin Lim¹, Feel-Soon Kang¹, Sun-Pil Kim², Sung-Jun Park³
 Gyeongsang National University¹, Mokpo National University², Chonnam National University³

ABSTRACT

본 논문에서는 태양광 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 부스트 컨버터, 에너지 저장장치용과 연료전지용 절연형 DC-DC 컨버터 및 계통연계형 인버터로 구성된 하이브리드 PCS(Power Conversion System)의 신뢰성을 분석한다. 각 컨버터의 출력단은 병렬로 연결되어 인버터와 직렬로 구성된다. 하이브리드 PCS는 DC-link 단이 병렬로 연결되므로 컨버터에 대한 Redundancy 효과가 발생한다. 하이브리드 PCS의 신뢰성은 여유율 효과에 따라 달라지므로 Markov model 기반의 분석을 통해 부분 고장에 따른 신뢰성을 분석한다. MIL-HDBK-217F 고장 라이브러리를 적용하며, 시스템의 평균 고장 발생시간 (Mean Time To Failure, MTTF)을 통해 하이브리드 PCS의 수명을 예측한다.

1. 서론

태양광, 에너지 저장장치 및 연료전지 같은 재생 가능 에너지원은 기후변화 및 지구온난화와 관련된 위기를 극복하는 데 필수적이므로 최근 관심 있는 연구 분야에 포함된다^[1]. 재생 가능 에너지원을 사용하여 AC 계통에 전력을 공급하기 위하여 PCS(Power Conversion System)가 필요하다. 본 논문에서는 출력이 병렬로 연결된 세 개의 컨버터와 직렬로 연결된 계통형 인버터로 구성된 하이브리드 PCS의 신뢰성을 분석한다. 하이브리드 PCS는 DC-link 단이 병렬로 연결되며 각각 100%의 전력용량을 담당하므로 세 컨버터 중 적어도 하나의 컨버터가 정상 동작 시 전체 시스템의 동작에 영향을 미치지 않는 Redundancy 효과가 발생한다. Redundancy 효과에 의해 신뢰성이 높아질 수 있지만, 시스템을 구성하는 회로가 증가하여 고장 발생 가능한 경우의 수가 증가한다. 따라서 하이브리드 PCS의 신뢰성에 관한 연구 및 분석이 필수적이다. 본 논문에서는 Markov model을 기반으로 하이브리드 PCS의 신뢰성을 하이브리드 PCS를 구성하는 모듈의 부분 고장에 대한 Redundancy 효과를 고려하여 분석한다. 시스템 고장의 정의는 계통에 전력이 공급되지 않는 경우로 한다.

2. 하이브리드 PCS의 신뢰성 분석

2.1 하이브리드 PCS의 구조

그림 1은 하이브리드 PCS의 구성도를 나타낸다. 하이브리드

PCS는 출력단이 병렬 연결된 세 개의 컨버터와 직렬로 연결된 계통형 인버터로 구성된다. 태양광 컨버터는 비절연형 부스트 컨버터로 구성된다. 에너지 저장장치용 컨버터는 풀 브리지 절연형 DC-DC 컨버터로 구성되며 풀 브리지 정류기를 사용한다. 연료전지용 컨버터는 DAB(Dual Active Bridge)구조를 가진다. 계통연계형 인버터는 단상 풀 브리지 인버터로 구성된다.

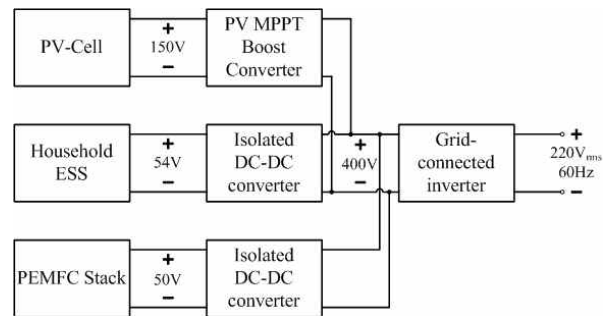


그림 1 하이브리드 PCS 구성도
 Fig. 1 Hybrid PCS configuration

2.2 PSA 기법을 사용한 모듈별 고장률 계산

Markov model을 사용하기에 앞서 하이브리드 PCS를 구성하는 모듈별 고장률을 계산한다. 모듈별 고장률은 MIL-HDBK-217F 고장 라이브러리를 기반으로 PSA(Part Stress Analysis) 기법을 사용하여 계산한다. PSA는 모듈을 구성하는 부품의 종류, 전압 스트레스와 부품의 주변 온도, 접합 온도 및 hot spot 온도 등의 환경 요인을 고려하여 부품별 고장률을 산출하고 부품 개수에 따른 모듈의 고장률을 계산한다.

표 1 PSA 기반의 부품 고장률 계산식
 Table 1 Part failure rate calculation formula based on PSA

Part	Failure rate calculation formula
IGBT	$\lambda_b \pi T^\pi A^\pi B^\pi C^\pi Q^\pi E$
Capacitor	$\lambda_b \pi T^\pi F^\pi S^\pi Q^\pi E$
Inductor	$\lambda_b \pi T^\pi Q^\pi E$
Transformer	$\lambda_b \pi T^\pi Q^\pi E$
Diode	$\lambda_b \pi T^\pi S^\pi C^\pi Q^\pi E$

표 2 하이브리드 PCS 모듈별 고장률
Table 2 Failure rate by hybrid PCS module

Module	Failure rate[failures/10 ⁴ hours]
PV converter	$\lambda_1 = 0.063653314$
ESS converter	$\lambda_2 = 0.056564376$
PEMFC converter	$\lambda_3 = 0.073603820$
Grid connected inverter	$\lambda_4 = 0.02700995$

표 1은 각 모듈을 구성하는 부품의 고장률 계산식을 나타내고 표 2는 모듈별 고장률을 정량적으로 제시한다.

2.3 Markov model 기반의 하이브리드 PCS 신뢰성 분석

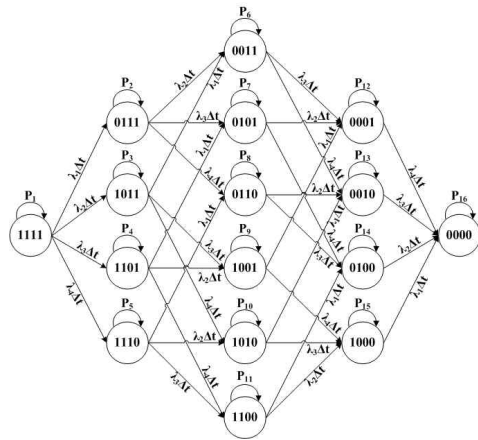


그림 2 하이브리드 PCS의 Markov model
Fig. 2 Markov model of hybrid PCS

그림 2는 하이브리드 PCS의 Markov model이다. 이는 부품의 부분 고장에 따른 고장 상태 및 상태 전이를 모델링한 것이다. 부품의 고장 여부에 따라 1 또는 0으로 표시하며 P는 각 상태를 유지할 확률이다. 모듈은 태양광 컨버터, 에너지 저장장치용 컨버터, 연료전지용 컨버터, 계통연계형 인버터 순서로 모델링 한다.

하이브리드 PCS는 각 컨버터에 의한 Redundancy를 가지기 때문에 하나 이상의 컨버터가 정상 동작 시 전체 시스템은 정상으로 판단한다. 그러나 계통연계형 인버터의 고장 발생 시 계통에 교류전력을 공급할 수 없으므로 인버터 고장이 발생하는 모든 상태는 전체 시스템의 고장으로 판단한다. 또한, 계통형 인버터를 제외한 모든 컨버터의 고장 발생 시 인버터 전원 공급이 불가능하므로 이 경우도 전체 시스템 고장으로 판단한다.

Markov model의 신뢰성은 시스템 고장으로 판단하지 않는 부분 고장의 합으로 계산하며 식(1)과 같이 나타낸다. 신뢰도 계산 방법은 다음과 같다. 첫째, Markov model을 참고하여 각 상태를 상태 방정식으로 표현한다. 둘째, Δt 를 아주 작다고 가정하여 미분방정식으로 유도하고 라플라스 변환을 적용한다. 셋째, 부분분수 공식으로 식을 정리하고 역 라플라스 변환을 적용하여 식(2)와 같이 시간에 따른 신뢰도를 도출한다. 추가적

으로 하이브리드 PCS의 평균 고장 발생시간은 식(3)을 통해 계산한다^[2]. 그림 3은 환경 온도에 따른 MTTF를 나타낸 그래프를 나타낸다. 환경 온도가 증가함에 따라 신뢰도와 MTTF는 지수적으로 감소함을 알 수 있다.

$$R(s) = \sum_{i=1}^4 P_i(s) + \sum_{j=6}^7 P_j(s) + P_9(s) \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_4)t} + e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)t} + e^{-(\lambda_3 + \lambda_4)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4)t} - e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t} \quad (2)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3)$$

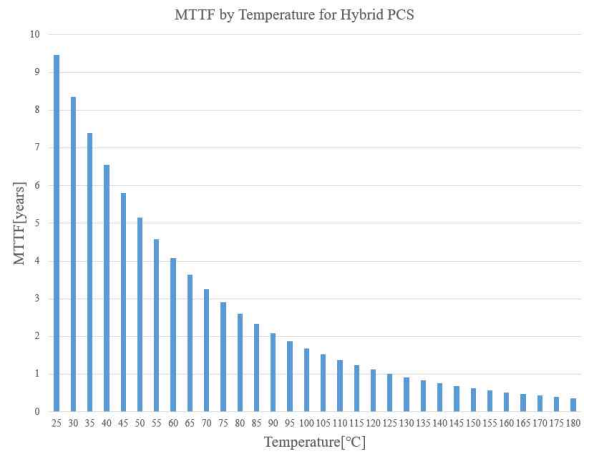


그림 3 하이브리드 PCS의 온도별 평균 고장 발생 시간
Fig. 3 MTTF by temperature for hybrid PCS

3. 결론

본 논문에서는 하이브리드 PCS의 신뢰성을 Redundancy를 고려하여 분석하기 위해 Markov model을 사용하였다. 계통에 전력이 공급되지 않는 경우를 고장으로 정의하고 신뢰도를 도출하였다. 환경 온도 60°C를 기준으로 하이브리드 PCS의 평균 고장 발생시간은 약 4년임을 확인하였다.

이 논문은 중소벤처기업부의 지역특화산업육성+(R&D)사업의 지원에 의한 연구임[S3365216]

참고 문헌

[1] F. Z. U. Abideen, H. A. Khalid, M. S. Khan, H. Rehman and A. Hasan, "Direct Model Predictive Control of Fuel Cell and Ultra-Capacitor Based Hybrid Electric Vehicle", IEEE Access, vol. 12, pp. 46774-46784, 2024.

[2] L. Mirtskhulava, R. Kakubava, N. Ananiashvili and G. Gugunashvili, "Internet Reliability and Availability Analysis Using Markov Method," 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge, UK, pp. 423-427, 2014.