

# 여유율을 고려한 Markov model 기반 하이브리드 PCS의 신뢰성 분석

임성진<sup>1</sup>, 강필순<sup>1</sup>, 김선필<sup>2</sup>, 박성준<sup>3</sup>  
 경상국립대학교<sup>1</sup>, 국립목포대학교<sup>2</sup>, 전남대학교<sup>3</sup>

## Reliability analysis of hybrid PCS based on Markov analysis considering redundancy

Seong Jin Lim<sup>1</sup>, Feel-Soon Kang<sup>1</sup>, Sun-Pil Kim<sup>2</sup>, Sung-Jun Park<sup>3</sup>  
 Gyeongsang National University<sup>1</sup>, Mokpo National University<sup>2</sup>, Chonnam National University<sup>3</sup>

### 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<sup>[1]</sup>. 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.

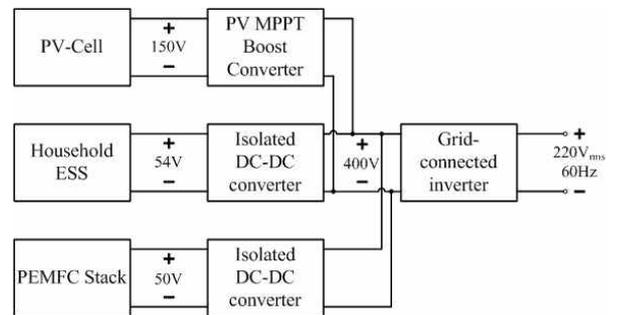


그림 1 하이브리드 PCS 구성도  
 Fig. 1 Hybrid PCS configuration

#### 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	$\lambda_b \pi T^\pi A^\pi B^\pi S^\pi Q^\pi E$
Capacitor	$\lambda_b \pi T^\pi I^\pi S^\pi Q^\pi E$
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 <sup>4</sup> 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

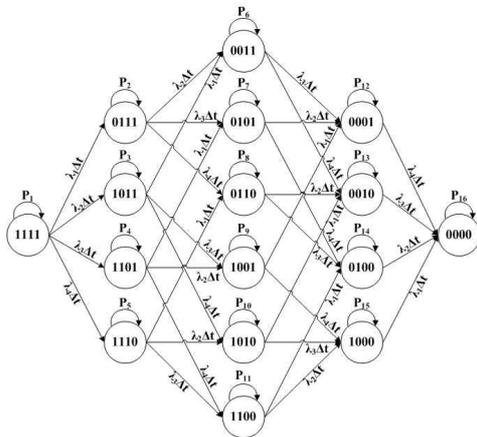


그림 2 하이브리드 PCS의 Markov model  
Fig. 2 Markov model of hybrid PCS

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,  $\Delta t$ 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<sup>[2]</sup>. 그림 3은 환경 온도에 따른 MTTF를 나타낸 그래프를 나타낸다. 환경 온도가 증가함에 따라 신뢰도와 MTTF는 지수적으로 감소함을 알 수 있다.

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

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

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

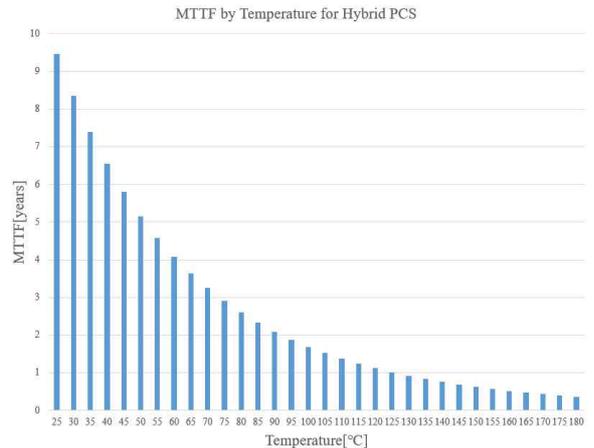


그림 3 하이브리드 PCS의 온도별 평균 고장 발생 시간  
Fig. 3 MTTF by temperature for hybrid PCS

### 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.