# Markov 모델을 이용한 DAB 모듈의 직병렬 구조와 신뢰도 관계분석

조재성[1], 강필순[1], 박성준[2]
경상국립대학교[1], 전남대학교[2]

# Reliability analysis according to the series and parallel configuration of the DAB module using the Morkov model

Jae-sung Jo[1], Feel-soon Kang[1], Sung-jun Park[2]
Gyeongsang National University[1], Chonnam National University[2]

## ABSTRACT

본 논문에서는 DAB 컨버터와 비절연형 dc-dc 컨버터를 모듈 구조로 하는 배터리 충방전 시스템의 신뢰성을 비교 분석한다. 직렬-직렬, 직렬-병렬, 병렬-직렬, 병렬-병렬 모듈 구조에 대한 시뮬레이션을 수행하고 Markov 모델을 이용하여 시간 경과에 따라 변화하는 고장 양상을 모델링한다. 배터리 충방전 시스템의 고장 추이를 분석하여 다중화가 신뢰도에 미치는 영향을 정량적 값으로 제시한다.

## 1. 서론

DAB 컨버터는 양방향 전력수수가 가능하며 고효율, 고주파 동작의 장점을 가지고 있어서 산업용 전력변환기, 에너지 저장 시스템, 태양광 인버터, 전기차 충전기 등 다양한 분야에서 유용하게 쓰이고 있다. DAB는 전원 공급에 필수적이지만, 고장이 발생할 경우 전체 시스템의 작동이 중단될 수 있다. 또한 고전압, 대전류 및 높은 온도에 노출되므로 내구성 및 신뢰성 문제가 발생할 수 있다. DAB 컨버터에 대한 이전 연구는 고주파 변압기 및 전체 시스템 손실을 최소화하는 효율성 향상 관련 연구는 많지만, 신뢰성에 대한 연구는 아직 미비하다. 따라서 본 논문에서는 DAB 컨버터를 모듈로 사용하는 배터리 충방전 시스템의 4가지 연결 구조를 평가하고 Markov 모델을 이용하여 각 구조의 신뢰도와 평균 수명주기를 산출한다.

## 2. 배터리 충방전 시스템 신뢰도 분석

### 2.1 DAB모듈 기반 배터리 충방전 시스템 특성

그림 1은 본 논문에서 신뢰성 분석의 대상인 배터리 충전-방전 시스템의 회로 구성을 보여준다. DAB 컨버터와 비절연형 dc-dc 컨버터를 연결하고 시스템은 출력 전압을 제어하여 전류 리플을 줄이고 빠른 응답 특성을 갖는다[1]. 입력 전압은 직렬로 연결되고, DC 링크는 병렬로 연결한다. 직렬 연결은 다양한 입력 전압 범위를 얻을 수 있고, 병렬 연결은 전력 용량을 증가시킬 수 있다. 그러나 구성 요소 수가 증가하면 고장률도 증가하므로 신뢰성 측면에서 추가적인 연구가 필요하다.

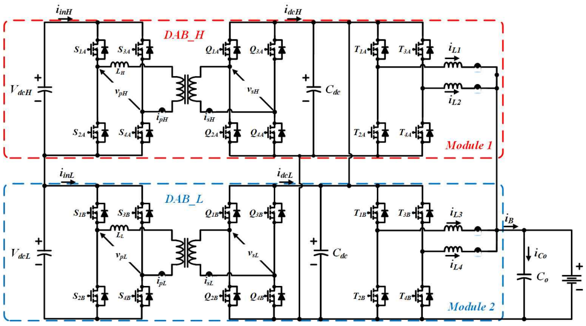



그림 1 DAB 컨버터 및 비절연 DC-DC 컨버터를 이용한 배터리 충방전 시스템 구성

Fig. 1 Configuration of battery charging/discharging system using DAB converters and non-isolated dc-dc converters[1]

표 1 두 개의 모듈을 결합하여 구성할 수 있는 네 가지 유형

Table 1 Four structures that can be created by combining two modules[1]

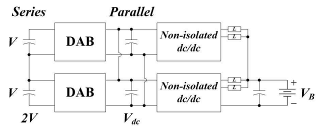
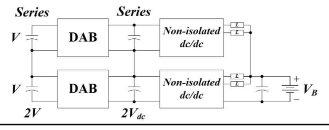
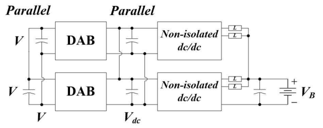
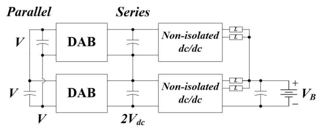
| Case | Configuration | Description |
|---|---|---|
| [1] Series Parallel |  | Input V : $V_{dc}$ : $V_B$<br>720V : 180V : (50~150)V<br>@each DAB<br>actual input voltage = 360V |
| [2] Series Series |  | Input V : $V_{dc}$ : $V_B$<br>720V : 360V : (50~150)V<br>@each DAB<br>actual input voltage = 360V<br>actual dc-link voltage = 180V |
| [3] Parallel Parallel |  | Input V : $V_{dc}$ : $V_B$<br>360V : 180V : (50~150)V |
| [4] Parallel Series |  | Input V : $V_{dc}$ : $V_B$<br>360V : 360V : (50~150)V<br>@each DAB<br>actual dc-link voltage = 180V |

표 1은 DAB 컨버터와 비절연형 dc-dc 컨버터 모듈을 결합하여 구성할 수 있는 네 가지 직병렬 구조를 보여준다[1]. Case 1에서는 두 개의 입력 전압을 직렬로 연결하고 DC 링크단을 병렬로 연결한다. Case 2에서는 두 개의 입력 전압과 DC 링크단계를 직렬로 연결한다. Case 3에서는 두 개의 입력 전압과 DC 링크 단을 병렬로 연결한다. Case 4에서는 두 개의 입력

전압을 병렬로 연결하고 DC 링크 단을 직렬로 연결한다. 이 네 가지 경우 모두 각 DAB에 적용되는 입력 전압은 360V이고, 각 비절연형 dc-dc 컨버터에 적용되는 DC 링크 전압은 180V이다.

## 2.2 Markov 모델 기반 신뢰도 분석

그림 2는 배터리 충방전 시스템의 Markov 모델이다. 이 Markov 모델에서 모듈의 상태는 정상 상태일 때 1로 표시하고 고장 시 0으로 표시한다. 초기 상태 (1,1,1,1)에서 최종 상태 (0,0,0,0)까지 전이 과정을 나타낸다. Markov model을 이산계 함수로 표현하여 각각의 구조에 대한 신뢰도 함수를 산출한다.

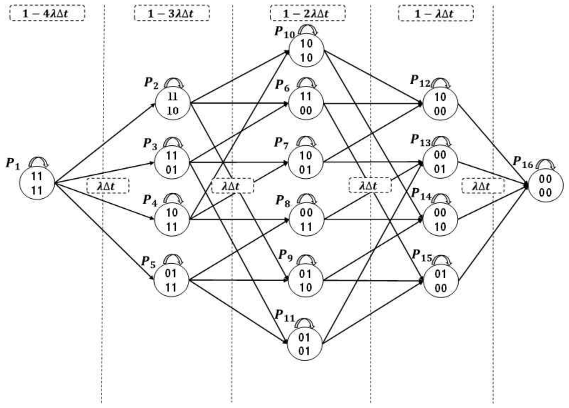


그림 2 배터리 충방전 시스템의 상태 전이 모델링
Fig. 2 State transition modeling for battery charging/discharge system

배터리 충방전 시스템에서 사용된 모듈의 고장률은 MIL-STD 217F를 기반으로 산출한다.

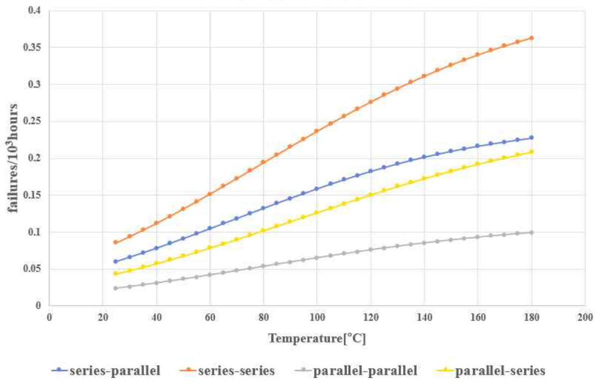



그림 3 네 개의 직렬 및 병렬 구조에 따른 고장률 비교
Fig. 3 Comparison of failure rates according to four types of series and parallel structures

그림 3은 온도 변화에 따른 시스템 고장률을 비교하기 위해 각각의 구조에 대한 신뢰도 함수를 이용하여 고장률을 산출한다. series-series 연결에서 가장 높은 고장률이 나타나며, 25°C에서의 고장률은 0.08564 failures/$10^3$hours 이다. 가장 높은 여유율이 적용된 parallel-parallel 연결에서 가장 낮은 고장률이 나타나며, 25°C에서의 고장률은 0.02371 failures/$10^3$hours이다. 여유율이 증가함에 따라 고장률이 감소하며, 변동 폭 반비례 관계이다. 180°C에서 series-series 연결의 고장률은 0.3627 failures/$10^3$hours이고, parallel-parallel 연결의 고장률은 0.0990 failures/$10^3$hours이다.

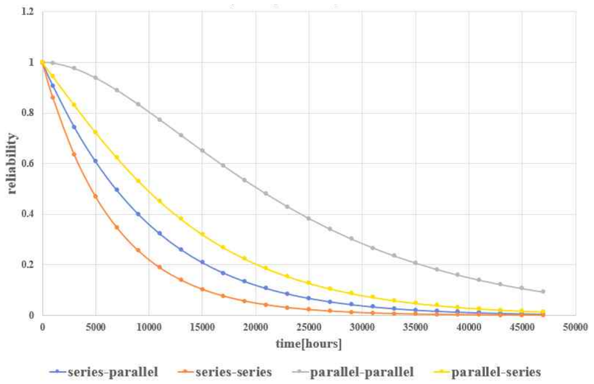



그림 4 네 개의 직렬 및 병렬 구조에 따른 신뢰도 비교
Fig. 4 Reliability comparison according to four series and parallel structures

그림 4는 각각의 신뢰도 함수를 이용하여 네 개의 구조에 대한 신뢰성을 비교한다. series-series로 연결할 때는 redundancy 효과가 없으므로 신뢰성이 가장 낮다. 신뢰성이 0.4로 감소하는 데에는 약 6,000시간이 소요된다. series-parallel로 연결할 때는 dc-dc 컨버터에서 redundancy 효과가 발생하여 신뢰성이 증가한다. 신뢰성이 0.4로 감소하는 데에는 약 9,000시간이 소요된다. parallel-series로 결합할 때는 DAB 컨버터에서 redundancy 효과가 발생한다. 신뢰성이 0.4로 감소하는 데에는 약 12,000시간이 소요된다. parallel-parallel로 연결할 때는 DAB 컨버터와 비절연형 dc-dc 컨버터 모두에서 redundancy 효과가 발생하여 신뢰성이 가장 높게 나타난다. 신뢰성이 0.4로 감소하는 데에는 약 24,000시간이 소요된다. 이는 redundancy 효과가 없는 series-series 연결보다 약 4배 더 오래 유지되는 것을 보인다.

## 3. 결론

본 논문은 시간에 따라 변화하는 고장 패턴을 모델링하여 배터리 충방전 시스템의 신뢰성을 비교 분석하기 위해 Markov 모델을 사용한다. 신뢰도 함수를 그래프로 나타내어 컨버터의 수명을 정량적으로 산출한 결과, parallel-parallel 연결 시 약 24,000 시간의 수명을 가지며, series-series 연결 시 약 6,000 시간의 수명을 가진다. 따라서 parallel-parallel 연결 구성은 series-series 연결 구조보다 약 네 배 더 긴 수명을 보장할 수 있다.

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

## 참 고 문 헌

[1] S. J. Park, J. W. Park, K. H. Kim and F. S. Kang, "Battery energy storage system with interleaving structure of dual-active-bridge converter and non-isolated DC-to-DC converter with wide input and output voltage," IEEE Access, vol. 10, pp. 127205-127224, 2022.