

PCA, PSA, FTA 기법을 이용한 세 가지 절연형 DC-DC 컨버터에 대한 신뢰성 분석

차재훈¹, 강필순¹, 김선필²

경상국립대학교¹, G&EPS²

Reliability analysis of three isolated DC-DC converters using PCA, PSA, and FTA

Jae-Hun Cha¹, Feel-soon Kang¹, Sun-Pil Kim²

Gyeongsang National University¹, G&EPS²

ABSTRACT

본 논문은 다양한 전력변환시스템에서 활용되는 절연형 DC-DC 컨버터의 회로 구조에 대한 신뢰도를 분석한다. 절연형 풀-브리지 DC-DC 컨버터 중 변압기 1차측은 풀-브리지 구조로 동일하지만 변압기 2차측 구조가 풀-브리지, 배전류, 센터-탭 방식으로 구성되는 세 가지 회로 구조를 비교한다. 외부 환경 요인과 컨버터 동작 위험성을 고려한 신뢰성 분석을 위해서 PCA(Part Count Analysis), PSA(Part Stress Analysis), FTA(Fault-Tree Analysis) 기법을 이용하여 고장률과 MTBF(Mean Time Between Failures)를 비교한다.

1. 서론

본 논문은 최근 전력변환시스템에 활용이 증가하고 있는 절연형 DC-DC 컨버터의 회로 구조를 고장률 바탕으로 각 컨버터의 신뢰성을 분석한다. 절연형 풀-브리지 DC-DC 컨버터 회로 구조에서 변압기 1차측은 풀-브리지 구조로 동일하고, 변압기 2차측 구조가 풀-브리지, 배전류, 센터-탭 방식인 3가지 회로 구조를 비교한다. 외부 환경요인과 컨버터 동작 위험성을 고려한 신뢰성 분석을 위해서 PCA(Part Count Analysis), PSA(Part Stress Analysis), FTA(Fault-Tree Analysis) 기법을 이용하여 고장률과 MTBF(Mean Time Between Failures)를 비교한다. 동일한 조건에서의 비교를 위한 각각의 컨버터에 대한 설계 사양을 상세하게 제시하고 이를 기준으로 설계자가 신뢰성 측면에서 최상의 컨버터 구조를 선택할 수 있는 가이드 라인을 제시한다.

2. 절연형 DC-DC 컨버터의 신뢰성 분석비교

2.1 절연형 DC-DC 풀-브리지 컨버터 특성

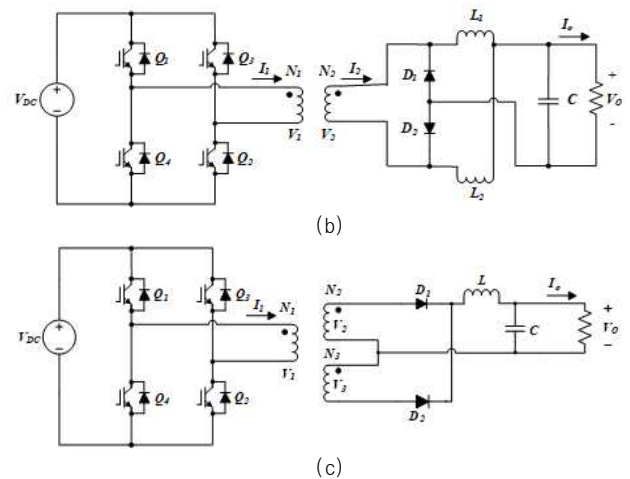
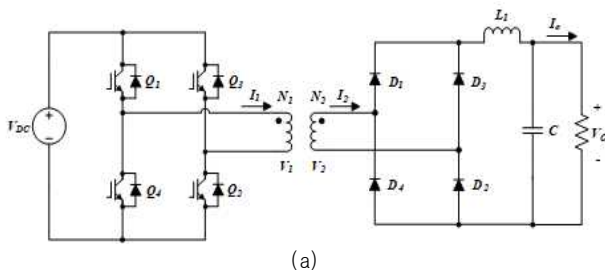


그림 1 서로 다른 변압기 2차측 구조를 갖는 절연형 DC-DC 컨버터 (a)Type1, 풀브리지 정류회로, (b)Type2, 배전류 정류회로, (c)Type3, 센터 탭 정류회로.

Fig. 1 Isolated DC-DC converter with different transformer secondary side structures (a)Type1, full bridge rectifier, (b)Type2, current doubler rectifier, (c)Type3, center tap rectifier.

그림 1(a)는 변압기 2차측이 풀-브리지 정류회로로 구성되는 방식으로 가장 많이 이용되는 회로 구조(Type1)이다. Type1은 다이오드의 전압 스트레스가 변압기 2차측 전압과 같다. 또한, 센터-탭 정류기에 비해 도통 손실이 2배 크며 다이오드가 4개가 사용되기 때문에 다이오드에 의한 전압 강하가 그림 1(c)의 센터-탭 방식에 비해 2배 크다. 그림 1(b)는 변압기 2차측이 배전류 방식으로 구성된 회로(Type2)이다. Type2는 인덕터 두 개의 전류 상쇄 효과로 전류 리플이 작고 다이오드 전압 스트레스가 2차측 전압과 같다. 그림 1(c)는 센터-탭 방식의 회로(Type3)이다. Type1의 풀 브리지 방식보다 다이오드 전압 강하가 절반이지만 변압기의 권선이 증가하여 무게 및 부피가 증가한다. 또한, 다이오드 전압 스트레스가 Type1의 풀-브리지 방식 보다 두 배 크며 변압기 제작이 번거롭다^[1].

2.2 PCA (part count analysis)

PCA는 부품의 품질과 개수, 기본 고장률만 고려해 신뢰도를 분석한다. PCA기법을 적용하기 위해서는 먼저 컨버터를 구성하는 개별 부품의 고장률이 필요하다. 부품별 고장률은 기본

고장률과 부품의 품질 인자의 곱으로 구한다. 부품의 기본 고장률이 온도와 연관 있는 부품은 컨버터 동작 온도를 고려하여 65[°C]를 기준으로 한다.

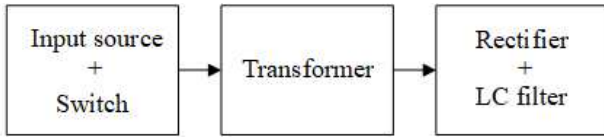


그림 2 DC-DC 풀브리지 컨버터 신뢰도 블록다이아그램
Fig. 2 DC-DC Full Bridge Converter Reliability Block Diagram

그림 2는 절연형 DC-DC full-bridge 컨버터의 신뢰성 블록도를 나타낸다. 비교 대상인 3가지 컨버터의 경우 회로 구조는 서로 상이하지만, 기능적으로는 동일하다.

$$\lambda_P = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (1)$$

여기서 λ_P : 컨버터 고장률, λ_i : i th의 고장률, m : 총 부품 개수
각 블록의 고장률은 식(1)을 이용하여 계산하고, 부품 고장률은 MIL-HDBK-217F 고장 라이브러리를 이용한다.

표 1 PCA기반 고장률 및 MTBF
Table 1 Failure rate and MTBF using PCA

	총 부품개수	고장률 ($10^{-4}/h$)	MTBF (Hours)
Type1	14	0.053306182	187509
Type2	13	0.02751388	363452
Type3	12	0.02742799	364591

표 1은 세 종류의 컨버터를 PCA 기법으로 분석한 고장률과 MTBF를 나타낸다. 부품 수에 비례하여 고장률이 증가하며 Type1의 고장률이 가장 높다. 하지만 PCA는 컨버터의 환경적 요인을 반영할 수 없다. 따라서 다음 장에서는 PSA 분석을 통해 환경적 요인을 추가하여 신뢰도를 분석한다.

2.3 PSA (part stress analysis)

표 2 PSA기반 고장률 및 MTBF
Table 2 Failure rate and MTBF using PSA

	총 부품개수	고장률 ($10^{-4}/h$)	MTBF (Hours)
Type1	14	0.473685804	21111
Type2	13	0.41600731	24038
Type3	12	0.41566372	24057

표 2는 PSA기법으로 분석한 고장률과 MTBF를 나타낸다. PCA에서는 고려하지 않았던 다양한 환경 인자를 추가하여 부품 고장률을 산정한다. 부품 소재, 전압 스트레스, 작동 환경 등과 같은 고장 인자는 각 부품에 따라 적용되는 고장 가중치가 다르다. 따라서 PCA와 비교했을 경우 비교적 높은 고장률과 낮은 MTBF를 나타낸다.

2.4 FTA (fault-tree analysis)

FTA는 고장을 정의하고 시스템을 기능 중심으로 구분한 후, 최소 단위 부품 고장을 이용하여 고장률을 계산하는 하향식 고장률 분석 방식이다. 본 논문에서 고장은 정격 출력(DC 24V, 50A)이 발생하지 않는 경우를 최상위 고장으로 정의한다. 시스템의 기능을 입력 전원 공급 기능(배터리), 전력변환을 위한 스위칭 기능, 변압기 2차측으로의 전력전달 기능, 출력측의 정류 및 LC 필터링 기능으로 구분한다. 부품별 고장률은

MIL-HDBK-217F를 이용하며 알 수 없는 고장률과 비전개 고장에 대한 고장률은 컨버터에서 발생할 수 있는 최소 고장률로 가정한다.

표 3 FTA기반 고장률 및 MTBF
Table 3 Failure rate and MTBF using FTA

	총 부품개수	고장률 ($10^{-4}/h$)	MTBF (Hours)
Type1	14	0.391343482	25553
Type2	13	0.35500017	28169
Type3	12	0.35477347	28187

표 3은 세 종류의 컨버터에 대한 고장나무를 그리고 4개의 기능별로 고장나무를 구분하여 산출해낸 컨버터별 고장률과 MTBF이다. 자성체부품을 사용한 Type2와 Type3의 경우 매우 근사한 고장률을 나타내며 다이오드 기반의 Type1과 평균 10.27[%]의 고장률 차이를 나타낸다.

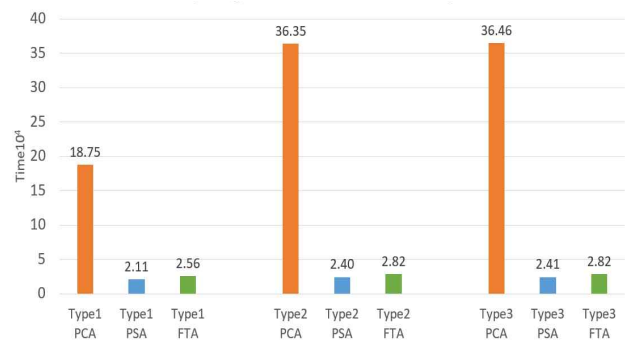


그림 3 세 종류의 컨버터에 대한 PCA, PSA, FTA기반의 MTBF
Fig. 3 PCA, PSA, and FTA-based MTBF for three types of converters

그림 3은 PCA, PSA, FTA 방식으로 분석한 세 종류의 절연형 DC-DC 컨버터에 대한 평균고장시간(MTBF)을 비교한다. Type1의 PSA MTBF가 나머지 Type과 비교해 3000시간 정도의 차이를 보이게 되며 FTA의 경우 동작 위험성까지 고려한 결과로 수명이 조금 더 증가한 결과를 나타낸다.

3. 결론

PCA, PSA, FTA기법을 활용하여 풀-브리지, 배전류, 센터-탭 회로 구조의 고장률과 MTBF를 비교하였다. 외부 환경요인과 컨버터 동작 위험성을 고려한 결과, 자성체 위주의 부품으로 구성된 컨버터가 다이오드 위주의 부품으로 구성된 컨버터보다 높은 신뢰도를 나타낸다. 결과적으로 절연형 DC-DC 풀브리지 컨버터를 설계할 때 배전류방식과 센터-탭방식의 회로 구성이 신뢰도 측면에서 유리함을 알 수 있다.

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

참 고 문 헌

- [1] 이우석, “위상천이 풀브리지 컨버터 동작분석 및 설계에 관한 연구.” 국내석사학위논문 계명대학교, 2017. 대구