

# 4-레벨 플라잉 커패시터 토템폴 PFC의 고장 허용 운전 방안

안상우, 조영훈  
 건국대학교 전력전자연구소

## Fault-Tolerant Operation Scheme of Four-Level Flying Capacitor Totem-Pole PFC

Sangwoo Ahn, Younghoon Cho  
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

### ABSTRACT

본 논문에서는 4-레벨 플라잉 커패시터 토템폴 PFC의 멀티레벨 구조를 활용하여 단상 정류 동작 중 스위칭 소자 오동작 시 고장 허용 운전 방안을 제안한다. PSM(Phase Shift Modulation)방식을 기반으로 연속 도통 모드에서 동작하며, 부품 고장의 영향을 완화하고 고장 조건에서 신뢰성 있는 운전을 목표로 하였다. 각각의 고장 상황을 가정하여 모의실험을 통해 대응하였고 성능을 검증했다.

### 1. 서론

전력 전자 분야에서 전력 공급의 효율성과 안정성은 산업 및 생활의 다양한 분야에서 핵심적인 요소로 작용한다. 토템폴 PFC는 간단한 구조와 높은 효율성으로 다양한 분야에서 널리 사용되는 토폴로지 중 하나이다. 그러나 스위칭 소자의 파손이나 오동작으로 인한 고장 발생 시 안정적인 전원 공급에 문제가 발생하며, 특히 데이터 센터나 배터리 충전기와 같은 지속적인 전원 공급이 필요한 시스템에서는 심각한 문제로 대두될 수 있다. 고장 시 작동하는 보조 소자들을 병렬로 배치하거나 대기 상태의 컨버터를 준비하기도 하지만<sup>[1]</sup>, 정상 동작 시 사용되지 않는 소자는 비용과 전력밀도 측면에서 좋지 않다. 본 논문에서는 높은 전력밀도와 효율성을 가지는 멀티레벨 구조의 특성을 이용하여 추가적인 대기 상태의 보조 소자 없이 고장 시나리오에 대한 허용 운전 방안을 제안하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 4-레벨 플라잉 커패시터 토템폴 PFC의 동작원리

그림1은 4-레벨 플라잉 커패시터 토템폴 PFC 컨버터의 구조를 나타낸다. Q<sub>a</sub>가 ON 상태이고 Q<sub>b</sub>가 OFF 상태면 계통 전원과 인덕터에 저장된 에너지를 직류링크로 방출한다. Q<sub>a</sub>가 OFF 상태이고 Q<sub>b</sub>가 ON 상태면 인덕터에 에너지를 충전하고 커패시터에 저장된 에너지가 부하로 방출된다. 계통전압이 양전압일 때 Q<sub>P</sub>는 ON 상태를 유지하고 Q<sub>N</sub>은 OFF 상태를 유지한다. Q<sub>a</sub>, Q<sub>b</sub>는 각각 상보로 동작하며 Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>는 PSM 방식으로 제어한다. Q<sub>1a</sub>, Q<sub>1b</sub>, Q<sub>2a</sub>, Q<sub>2b</sub>, Q<sub>3a</sub>, Q<sub>3b</sub>는 고주파로 동작하고, Q<sub>N</sub>, Q<sub>P</sub>는 저주파로 동작하게 된다.

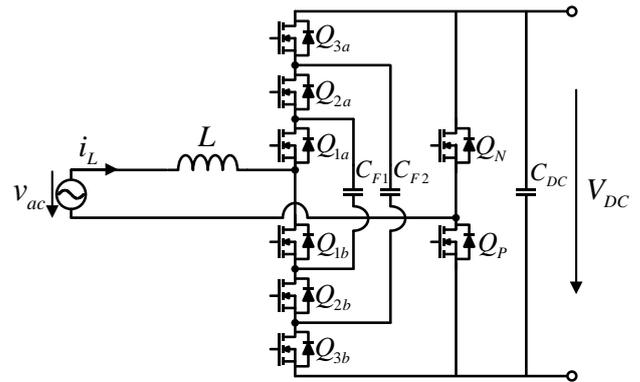


그림1 4-레벨 플라잉 커패시터 토템폴 PFC 컨버터 회로  
 Fig.1 Circuit diagram of four-level flying capacitor totem-pole PFC

기존의 브리지리스 토템폴 PFC 구조에 플라잉 커패시터를 추가하여 PSM 제어를 하기 때문에 스위칭 소자의 전압 스트레스와 전류 리플을 1/3배로 줄이면서 전류 주파수를 3배로 높일 수 있으며, 정류 다이오드를 스위칭 소자로 대체하여 양방향 동작이 가능하다. 회로 동작에 대한 주요 수식은 다음과 같다.<sup>[2]</sup>

$$V_{FC1} = \frac{1}{3}V_{DC}, V_{FC2} = \frac{2}{3}V_{DC} \quad (1)$$

$$d = \begin{cases} \frac{v_{ac}}{V_{DC}} & \text{if } v_{ac} > 0 \\ 1 + \frac{v_{ac}}{V_{DC}} & \text{if } v_{ac} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta i_L = \begin{cases} \frac{(V_{DC}-V_{ac})}{L} \cdot \left(\frac{1}{3}-d\right) \cdot \frac{1}{f_{sw}}, 0 < d < \frac{1}{3} \\ \frac{\left(\frac{2}{3}V_{DC}-V_{ac}\right)}{L} \cdot \left(\frac{2}{3}-d\right) \cdot \frac{1}{f_{sw}}, \frac{1}{3} < d < \frac{2}{3} \\ \frac{\left(\frac{1}{3}V_{DC}-V_{ac}\right)}{L} \cdot (1-d) \cdot \frac{1}{f_{sw}}, \frac{2}{3} < d < 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta v_{FCn} = \begin{cases} \frac{i_L \cdot d}{C_{Fn} \cdot f_{sw}}, 0 < d < \frac{1}{3} \\ \frac{i_L}{3 \cdot C_{Fn} \cdot f_{sw}}, \frac{1}{3} < d < \frac{2}{3} \\ \frac{i_L \cdot (1-d)}{C_{Fn} \cdot f_{sw}}, \frac{2}{3} < d < 1 \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 고장 허용 운전 방안

직류링크와 직접 연결되는  $Q_{3a}$ ,  $Q_{3b}$  개방 고장의 경우 회로는 동작을 멈추게 되기 때문에 고장 허용을 위해서는 병렬 구조로 대기상태의 스위칭 소자를 연결하는 것으로 고장 허용 운전을 할 수 있다. 본 논문에서는 플라이 커패시터와 연결되는  $Q_{1a}$ ,  $Q_{1b}$ ,  $Q_{2a}$ ,  $Q_{2b}$ 가 오동작 할 경우, 전류 리플을 통해 고장을 진단하고 위상 제어를 변경하여 회로의 동작 레벨을 변경시키는 방안을 제안한다. 스위칭 소자 이상 동작 시  $Q_{3a}$ ,  $Q_{3b}$ 의 위상을 기준으로  $Q_{1a}$ ,  $Q_{1b}$ ,  $Q_{2a}$ ,  $Q_{2b}$ 의 위상을  $180^\circ$  지연시킨다. 추가적인 소자 없이 존재하는 소자의 조합으로 동작을 구현하여 고장 허용 운전이 가능하다. PSIM 모의실험을 통해 각 고장 상황에 대응하였다. 컨버터 사양은 표 1에 나타내었다.

표 1 4-레벨 플라이 커패시터 토템폴 PFC 사양

Table 1 Specifications of four-level flying capacitor totem-pole PFC

$V_{ac}$	220 [V <sub>rms</sub> ]	$C_{DC}$	990 [uF]
$V_{DC}$	400 [V]	$C_{F1}$	20 [uF]
$I_L$	13.64 [A <sub>rms</sub> ]	$C_{F2}$	10 [uF]
$P_{OUT}$	3 [kW]	L	311 [uH]

## 2.3 모의실험

그림 2는  $Q_{1b}$ ,  $Q_{2a}$  단락고장 시 파형이다. 단락고장 혹은 스위칭 소자 오동작 시 고장 허용 운전으로 상보 동작 가능한 상하단 스위칭 소자 쌍이 있다면 제어 시퀀스가 변경되어 컨버터는 3레벨 동작을 하게 된다. 그림 3은  $Q_{2a}$ ,  $Q_{2b}$  단락고장 시 파형이며, 그림 4는 각 고장 상황에서 고장 허용 운전에 대한 정상상태 파형을 나타낸다.  $Q_{1a}$ ,  $Q_{1b}$  고장 시,  $Q_{2a}$ ,  $Q_{2b}$  고장 시,  $Q_{1b}$ ,  $Q_{2a}$  고장 시,  $Q_{1a}$ ,  $Q_{2b}$  고장 시 각 플라이 커패시터에 인가되는  $V_{FC1}$ ,  $V_{FC2}$  전압을 제외하고 모두 같은 파형으로 3레벨 고장 허용 운전을 하게 된다.

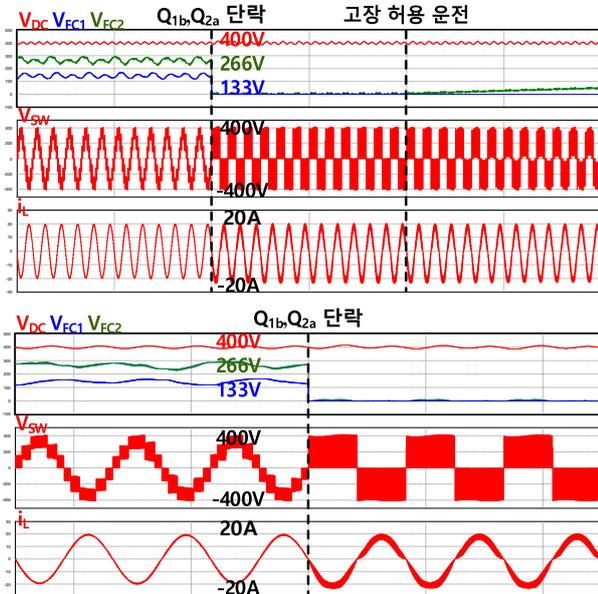


그림2  $Q_{1b}$ ,  $Q_{2a}$  단락고장 시 파형  
Fig.2 Waveforms under  $Q_{1b}$ ,  $Q_{2a}$  short circuit failure

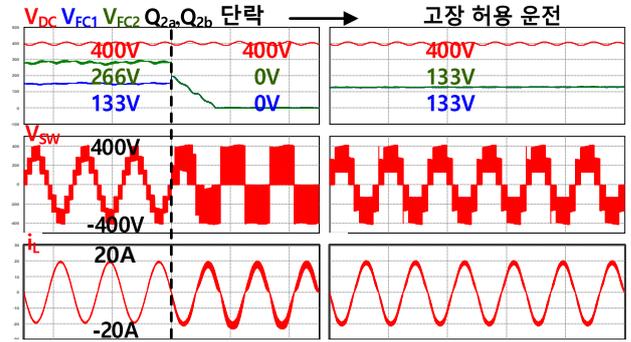


그림3  $Q_{2a}$ ,  $Q_{2b}$  단락고장 시 파형  
Fig.3 Waveforms under  $Q_{2a}$ ,  $Q_{2b}$  short circuit failure

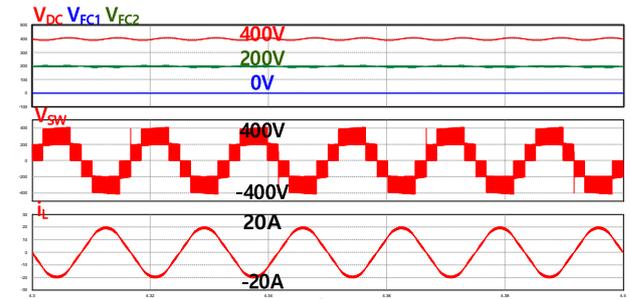


그림4 고장 허용 운전 시 정상상태 파형  
Fig.4 Waveforms under fault tolerant compensator

## 3. 결론

본 논문에서는 4-레벨 플라이 커패시터 토템폴 PFC 컨버터의 고장 허용 운전 방안을 제안하였다. 플라이 커패시터와 연결된 4개의 스위칭 소자 중 상보 동작이 가능한 상하단 소자가 있으면 멀티레벨 컨버터의 구조적인 특성을 이용하여 추가적인 소자 없이 지속적인 전원 공급이 가능하다. 모의실험을 통해 결과를 확인하였다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1A5A1031868)

## 참고 문헌

- [1] K. S. Muhammad, R. Baharom, M. K. M. Salleh and D. D. -c. Lu, "Open-circuit fault tolerant bridgeless boost rectifier," IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, Italy, 2016, pp. 2201-2206.
- [2] Q. Huang, Q. Ma, P. Liu, A. Q. Huang and M. A. de Rooij, "99% Efficient 2.5-kW Four-Level Flying Capacitor Multilevel GaN Totem-Pole PFC," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 5795-5806, Oct. 2021.