

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^[1], 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_a가 ON 상태이고 Q_b가 OFF 상태면 계통 전원과 인덕터에 저장된 에너지를 직류링크로 방출한다. Q_a가 OFF 상태이고 Q_b가 ON 상태면 인덕터에 에너지를 충전하고 커패시터에 저장된 에너지가 부하로 방출된다. 계통전압이 양전압일 때 Q_P는 ON 상태를 유지하고 Q_N은 OFF 상태를 유지한다. Q_a, Q_b는 각각 상보로 동작하며 Q₁, Q₂, Q₃는 PSM 방식으로 제어한다. Q_{1a}, Q_{1b}, Q_{2a}, Q_{2b}, Q_{3a}, Q_{3b}는 고주파로 동작하고, Q_N, Q_P는 저주파로 동작하게 된다.

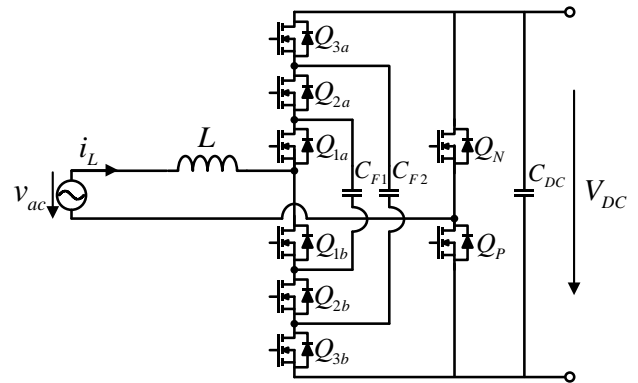


그림1 4-레벨 플라잉 커패시터 토템폴 PFC 컨버터 회로
 Fig.1 Circuit diagram of four-level flying capacitor totem-pole PFC

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.^[2]

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

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

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

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

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° 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 토렘폴 PFC 사양

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

V _{ac}	220 [V _{rms}]	C _{DC}	990 [uF]
V _{DC}	400 [V]	C _{F1}	20 [uF]
I _L	13.64 [A _{rms}]	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.

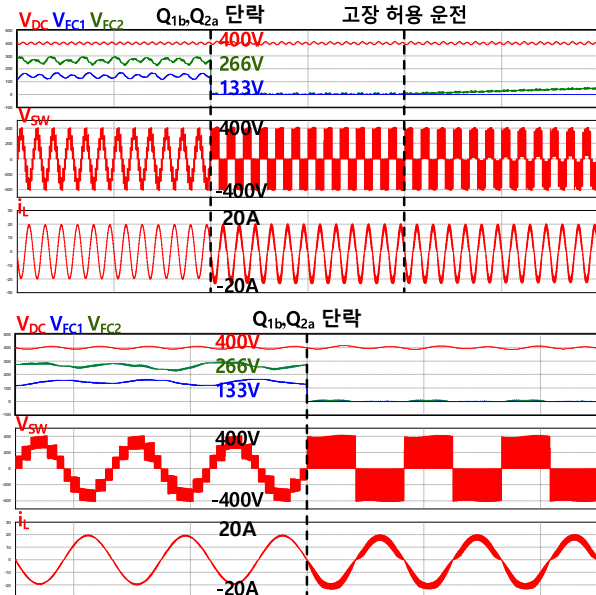


그림2 Q_{1b}, Q_{2a} 단락고장 시 파형
Fig.2 Waveforms under Q_{1b}, Q_{2a} short circuit failure

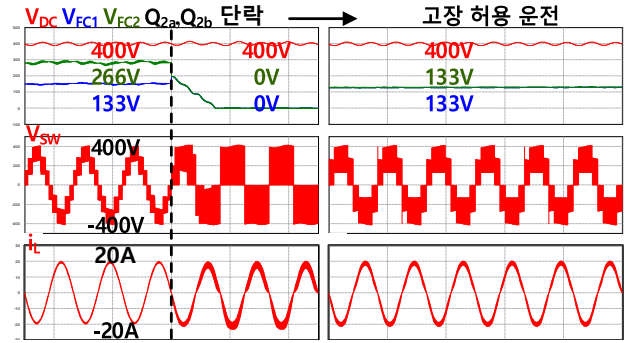


그림3 Q_{2a}, Q_{2b} 단락고장 시 파형
Fig.3 Waveforms under Q_{2a}, Q_{2b} short circuit failure

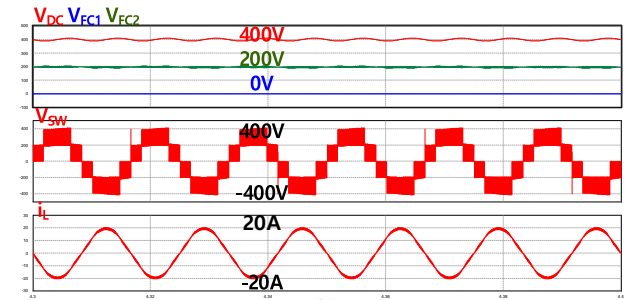


그림4 고장 허용 운전 시 정상상태 파형
Fig.4 Waveforms under fault tolerant compensator

3. 결론

본 논문에서는 4-레벨 플라이 커패시터 토렘폴 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.