

전력 반도체 기반의 고장 전류 제한기

김병준*, 김남훈**, 곽상신*
*중앙대학교, **한화테크윈

Solid State Based Fault Current Limiter

Byungjun Kim*, Namhun Kim**, Sangshin Kwak*

*School of Electronics and Electrical Engineering, Chung-ang University, **Hanhwa Techwin

ABSTRACT

본 논문에서는 전력 반도체 스위치를 기반으로 한 새로운 구조의 단상 FCL (fault current limiter) 토폴로지를 제안하였다. 제안된 회로는 정상상태 동작 시 손실이 매우 작지만 고장이 발생했을 때 빠른 속도로 증가하는 고장 전류를 효과적으로 제한할 수 있고 기존 FCL과 비교하여 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 제안하는 토폴로지는 PSIM 시뮬레이션을 통해 성능 및 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 전력수요가 증가함에 따라 대용량 시스템이 확대되면서 분산전원간 연계 시스템이 증가하고 있다. 이로 인해 유연한 전력 전달이 가능하지만 전력계통에 낙뢰, 지락, 단락과 같은 고장이 발생할 경우에는 큰 고장 전류가 흐르게 되어 시스템에 미치는 영향이 크다. 따라서 신뢰성을 요구하는 전력 계통 시스템은 일정 시간 동안 고장을 허용할 수 있도록 FCL을 통해 고장 전류를 제한해야 한다. 전력 반도체 기반 FCL은 동작이 쉽고 빠른 응답과 자발적인 복구가 가능하다는 장점으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다.

기존 전력반도체 기반 직류 리액터를 사용하는 구조의 FCL은 정상상태 손실이 발생하고 스위치 개수가 많이 필요하다.^[1] 또한, 3상에서의 FCL은 변압기 및 다이오드 정류기를 사용하므로 부피가 크고 정상상태 손실이 발생하는 문제점이 존재한다.^[2]

본 논문에서는 새로운 구조의 SFCL(solid state fault current limiter)을 제안한다. 정상상태 손실을 줄이고 스위치 개수를 줄인 SFCL로 고장이 발생하게 되면 L C 직렬공진회로의 인덕터를 통해 전류 상승 속도가 늦춰지고, 스위칭 동작을 통해 한류회로로 전류가 흘러 고장 전류의 크기를 제한한다. 제안하는 SFCL의 시뮬레이션을 통해 동작 및 성능을 확인하였다.

2. SFCL 구조 및 동작원리

2.1 SFCL의 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 SFCL의 구조를 나타낸다. SFCL은 직렬공진회로의 인덕터와 커패시터, 2개의 다이오드

및 3개의 스위치, 고장 전류를 제한하기 위한 한류저항으로 구성된다.

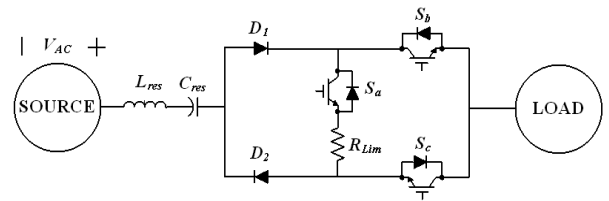


그림 1. 제안하는 전력반도체 기반 새로운 구조의 FCL
Fig 1. Proposed solid state based fault current limiter

2.2 SFCL의 동작 방법

SFCL는 표1과 같이 스위칭 동작을 하여 회로 임피던스 값을 변화시킨다.

표 1 SFCL 스위칭 상태
Table 1 SFCL switching states

	정상상태(mode1)	고장상태(mode2)
S _a	off	on
S _b	on	off
S _c	on	off

기존 전류에 따른 스위칭 동작을 통해 변화된 등가 회로를 그림 2 및 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. SFCL은 정상상태일 때 한류저항은 바이패스 되어 양의 주기에는 L C 직렬공진회로, D₁, S_b를 통해 전류가 흐르고, 음의 주기에는 L C 직렬공진회로, D₂, S_c를 통해 전류가 흐른다. 정상상태에서는 그림 2의 모드1과 같이 동작하는데 SFCL은 한류저항이 바이패스 되어 회로에서 보이지 않는 것처럼 동작을 한다. 하지만 고장이 발생하여 기존 전류를 초과하게 되면 그림 3의 모드2와 같이 동작하고 식(1)의 인덕터 시변전류 미분방정식과 같이 SFCL의 인덕턴스 성분으로 인해 전류 변화율이 감소하고 모드2에서의 회로 구성으로 인해 한류저항을 통해 고장전류가 제한된다. 고장 발생시 L C 직렬공진회로의 전류 미분방정식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = V_{AC}^* \sin \omega t \quad (2)$$

고장 전류를 제한하다가 고장이 사라지게 되면 SFCL은 모드2에서 모드1로 동작하게 된다.

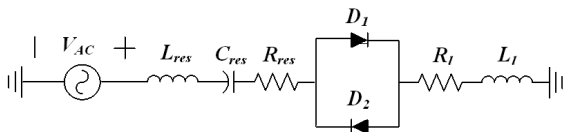


그림 2. 모드1에서의 SFCL 등가회로
Fig 2. SFCL's Equivalent circuit of Mode 1

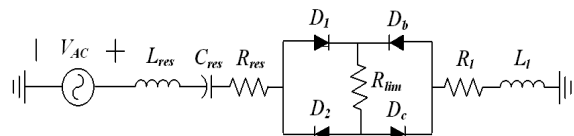


그림 3. 모드2에서의 SFCL 등가회로
Fig 3. SFCL's Equavalant circuit of Mode 2

FCL은 정상상태에서 발생하는 손실이 0에 가까울수록 이상적이다. 회로에서 LC 공진 회로의 공진 주파수는 입력 전압에 맞춰 조정되고, 각 주파수는 식(3)과 같다.

$$\omega = 1/\sqrt{LC} \quad (3)$$

따라서 정상상태에서 LC 공진회로의 임피던스는 0이고, 한류저항은 바이패스 되므로 부하 임피던스를 제외한 정상상태에서의 전체 임피던스는 식(4)와 같다.

$$Z \quad (4)$$

또한, 고장상태에서의 전체 임피던스는 식(5)과 같다.

$$Z \quad (5)$$

2.3 SFCL의 설계 값

SFCL의 LC 직렬공진회로, 한류저항의 소자 값은 시스템 안정도 및 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 인덕터, 커패시터, 한류저항 값의 선정은 매우 중요하다. LC 직렬공진회로에 사용되는 인덕터는 식(1)을 통해 전류 변화율을 고려하여 인덕턴스 값을 설정하게 되는데 인덕턴스 값이 매우 작게 되면 커패시터 값이 매우 커지게 되므로 인덕턴스 값은 5 mH에서 100 mH 범위 내에서 사용한다. 본 논문에서는 10 mH로 인덕턴스 값을 선정하였으며 입력 전원 주파수 60 Hz에 맞춰 공진주파수를 계산하여 커패시터 값을 선정하였다. 또한, LC 직렬공진회로의 인덕터 및 커패시터의 내부저항 값은 0.1 Ω으로 설정하였다. 모드 2의 한류저항은 식(6)과 같이 고장전류를 계산하여 설계하는데 고장시 과전류가 한류 저항에 흐르게 되므로 열이 많이 발생하게 되므로 식(7)과 같이 저항의 정격 전력용량을 고려하여 설계해야 한다.

$$i_{fault} = \frac{V_{AC}}{Z} \quad (6)$$

$$P = i_{fault}^2 * R \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 SFCL의 타당성을 검증하였고, 시뮬레이션에 사용된 시스템 및 소자의 파라미터 값은 표1과 같다.

그림 4는 정상상태에서 고장이 발생했을 때의 파형이다. 그림 4(a)는 FCL을 사용하지 않았을 때 고장 전류 결과 파형으

로 고장이 발생하게 되면 1주기 내 고장 전류가 급격하게 증가하여 시스템이 망가지게 된다. 그림 4(b)는 SFCL을 사용하여 고장 전류를 제한한 결과 파형이다. 고장이 발생한 순간에 인덕터로 인해 전류가 급변하지 않게 되어 모드1에서 모드 2로 동작시킬 수 있는 충분한 시간적 여유가 생기게 되므로 고장 전류를 효과적으로 제한할 수 있다.

표 2 SFCL 시뮬레이션 파라미터
Table 2 simulation parameters of SFCL

V _{AC}	380 V	L _{res}	10 mH
Freq	60 Hz	C _{res}	703 uF
R _{res}	0.1 Ω	R _{lim}	30 Ω

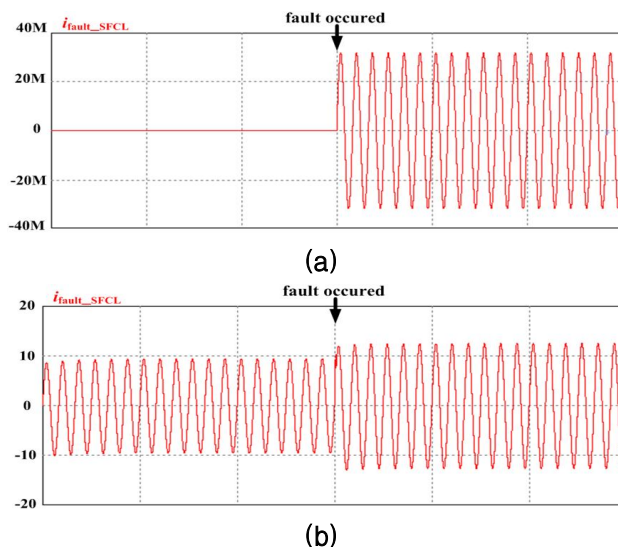


그림 4. 시뮬레이션 결과 파형 (a) SFCL 미적용시 (b) SFCL 적용시
Fig 4. simulation waveform (a) without SFCL (b) with SFCL

4. 결론

본 논문에서 제안하는 새로운 구조의 전력반도체 기반의 FCL은 구조적으로 스위치 개수를 기존의 방법보다 줄일 수 있고 LC 직렬공진회로 및 한류저항을 사용하여 고장전류를 효과적으로 제한할 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 구조의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2014년도 및 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2014R1A2A2A01006684) 및 (2017R1A2B4011444).

참고 문헌

[1] H Radmanesh, S.H. Fathi, G.B. Gharehpetian and Amir Heidary "Bridge Type Solid State Fault Current Limiter Based on AC/DC Reactor", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No. 1, pp. 200 209, 2016, Febuary.
[2] M.T. Hagh and M Abapour "Nonsuperconducting Fault Current Limiter With Controlling the Magnitudes of Fault Currents", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 24, No. 3, pp. 613 619, 2009, March.