

초전도소자의 저항변화에 따른 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 전류제한 특성 분석

논 문
60-10-4

Analysis on Current Limiting Characteristics of a Hybrid SFCL with the First Half Cycle Limiting Operation Due to Resistance of Superconducting Element

김진석* · 임성훈† · 김재철** · 최종수***
(Jin-Seok Kim · Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim · Jong-Soo Choi)

Abstract - The fault current has been increasing due to expansive substation facilities for meeting the increase of demand. To limit increasing fault current in a power system, among methods the superconducting fault current limiter (SFCL) has been considered to be adopted in the power grid. However, in case of adopting SFCL in the power system, most of SFCLs need to solve problems such as recovery, cost. With efforts to solve those problems, the novel fault current limiting device which is called hybrid SFCL is developed. To apply the hybrid SFCL, it has to be needed to analyze application possibility and itself operation characteristics. In this paper, the fault current limiting and operation characteristics of hybrid SFCL with first half cycle the limiting operation in case of various resistances of superconducting element were analyzed through experiment.

Key Words : Hybrid SFCL, Fault current, Superconducting fault current limiter

1. 서 론

전력수요가 수도권을 중심으로 지속적으로 증가하여 전원 설비의 증대가 이루어지면서 전력계통의 고장전류 증가를 야기하고 있다. 증가하는 고장전류에 대응하기 위하여 차단기의 교체, 직렬리액터 채용 또는 고임피던스 기기 사용 등의 방안들이 제안되어 왔다. 그러나 제시된 방안들은 평상시 손실 발생 및 전압강하 발생, 계통의 안정도를 저하 등의 문제점을 지니고 있다.

최근 고장전류 증가 대안으로 초전도 전류제한기라는 새로운 방안이 제시되고 연구되고 있다. 초전도 전류제한기는 기존의 고장전류 대책 방안들이 갖는 문제점들을 해결할 수 있을 뿐 아니라, 기존 전력설비를 사용과 효과적인 전력공급을 기대할 수 있어 초전도 전류제한기에 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [1-4]. 초전도 전류제한기를 전력계통에 적용하기 위해 고장전류 제한 효과 및 기기의 동작특성, 경제성 등을 보완하여 하이브리드 초전도 전류제한기가 개발되었다. 하이브리드 초전도 전류제한기는 크게 저항형 초전도 소자, 고속 스위치와 한류 소자로 구성된다. 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작에 있어 초전도 소자는 고장 초기 고장전류를 감지하고 고속 스위치를 동작시키는 역할을 함으로써 기존 초전도 전류제한기의 초전도 소자에 비해

상대적으로 작은 크기와 전력부담을 감소시켜 동작특성 및 경제성 등에 많은 장점을 지니고 있다. 또한 고장전류의 제한 동작을 하는 시점에 따라 반주기내 및 반주기 후 고장전류를 제한하는 형태로 구분된다.

하이브리드 초전도 전류제한기는 초전도 소자와 한류소자를 사용하여 고장전류를 제한하는 기기이고 동작 특성상 두 소자 사이에 스위치의 동작이 필요하다. 두 소자 사이의 스위치가 동작하는 시간은 초전도 전류제한기의 동작 특성을 좌우한다. 따라서 하이브리드 초전도 전류제한기를 전력계통에 적용하기 위해서 하이브리드 초전도 전류제한기의 설계 조건에 따른 동작 특성에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 반주기내 전류를 제한하는 하이브리드 초전도 전류제한기의 구성에서 초전도 소자의 저항 크기에 따른 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 특성과 고장전류의 특성을 모의실험을 통해 비교 분석하였다.

2. 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기

2.1 기본 구조

반주기내 고장전류를 제한하는 하이브리드 초전도 전류제한기의 기본 구조는 그림 1과 같다. 앞에서도 언급했듯이 하이브리드 초전도 전류제한기는 초전도 소자, 고속 스위치, 한류 소자로 구성되어 있다. 초전도 소자 (Superconducting element : SC)는 고장발생 초기에 초전도 소자의 켄치 특성을 이용하여 고장을 감지하는 역할을 하며, 고속 스위치가 동작할 수 있는 근원이 된다. 고속 스위치는 두 접점(SW₁, SW₂)과 구동코일(Driving coil)로 구성되어 있으며, 초전도 소자 켄치시 구동코일로 흐르는 전류에 의하여 발생하는 전

* 정 회 원 : 숭실대학교 공대 전기공학과 박사과정
** 펠로우 회원 : 숭실대학교 공대 전기공학과 교수
*** 정 회 원 : 한국전기안전공사 · 공박
† 교신저자, 정회원 : 숭실대학교 공대 전기공학과 교수
E-mail : superish73@ssu.ac.kr
접수일자 : 2011년 1월 14일
최종완료 : 2011년 9월 8일

자력으로 접점을 동작시킨다. 한류 소자(CLR)는 고속 스위치의 동작 완료시 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작에서 실질적으로 고장전류를 제한하는 역할을 한다.

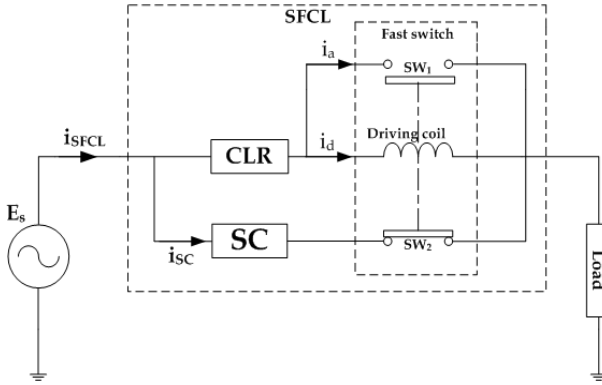


그림 1 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 구조.

Fig. 1 Scheme of hybrid SFCL with first half cycle limiting type.

2.2 동작 원리

반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작은 두 상태로 구분할 수 있다. 먼저 정상상태의 동작으로 초전도 상태를 유지하는 초전도 소자와 고속 스위치의 B접점(SW₂)을 통해 부하전류가 흐르게 된다. 이때, 흐르는 전류가 초전도 소자의 임계전류를 초과하지 않는다면 한류기에서 손실이 발생되지 않고 부하에 전력을 공급할 수 있다. 그러나 고장이 발생하면, 큰 고장전류가 발생하고 하이브리드 초전도 전류제한기를 통과하게 된다. 여기에 흐르는 전류는 초전도 소자의 임계전류를 넘는 전류로 켈치현상이 일어나고 저항이 발생하게 된다. 초전도 소자에 저항이 발생하게 되면 구동코일(Driving coil)로 전류가 분기되고, 구동코일의 임피던스는 초전도 소자의 저항에 비해 상대적으로 작기 때문에 구동코일로 전류가 많이 흐르게 된다. 이때 구동코일로 흐르는 큰 전류에 의해 전자력이 발생하고 이 힘으로 고속 스위치를 동작시키게 된다. 고속 스위치의 SW₁은 단락, SW₂는 개방되는 동작을 함으로써 초전도 소자로 흐르는 고장전류는 차단되며 고장전류는 한류소자로 흐르게 된다. 이러한 동작 순서로 고장전류를 고장발생 후 반주기내에 제한하는 형태가 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기이다. 본 논문은 모의실험에서 하이브리드 초전도 전류제한기의 고속 스위치를 대신해 전력용 반도체 스위치를 사용하였으며, 구동코일(Driving coil)에 흐르는 전류의 실효값에 따라 스위치가 동작하도록 구현하여 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 특성을 분석하였다. 그림 2는 모의실험에서 사용한 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 세부적인 전류파형으로 고장발생시 하이브리드 초전도 전류제한기 내부에서 이루어지는 동작을 전류의 파형으로 확인할 수 있다.

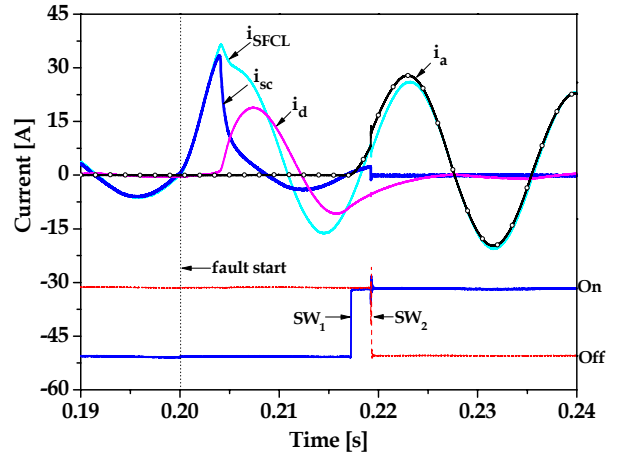


그림 2 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 내부 전류 파형.

Fig. 2 Waveforms of hybrid SFCL's inside current with first half cycle limiting type.

3. 모의실험 구성 및 결과 분석

3.1 모의실험 구성 및 방법

그림 3은 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 구성에서 초전도 소자에서 나타나는 저항의 변화에 따라 초전도 전류제한기의 동작과 전류제한 특성을 분석하기 위한 모의실험 회로도를 나타낸 것이며, 표 1은 모의실험에서 사용한 변압기, 선로 임피던스, 부하를 보여준다. 모의계통에 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기는 피더 인출점에 설치하여 모의 단락시험을 시행하였다.

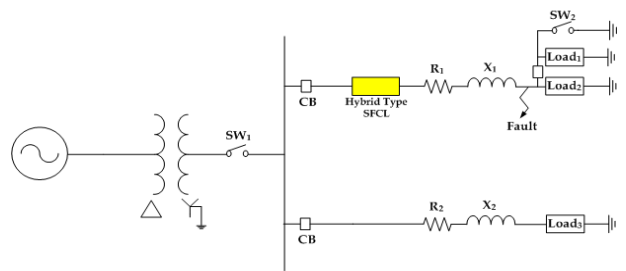


그림 3 모의실험 회로도.

Fig. 3 Experiment circuit of power system.

표 1 모의계통 파라미터.

Table 1 Parameters of power system.

기기명	파라미터	값	단위
변압기	S _{rate}	3	[kVA]
	N ₁ /N ₂	3	
선로	R ₁ + jX ₁	0.097 + j0.685	[Ω]
	R ₂ + jX ₂	0.140 + j1.048	[Ω]
부하	Load ₁ , Load ₂	41.20 ∠ 2.62	[Ω]
	Load ₃	10.47 ∠ 10.37	[Ω]

3.2 하이브리드 초전도 전류제한기 동작 특성 분석

그림 4는 저항형 초전도 전류제한기와 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 초전도 소자에서 나타나는 V-I 곡선을 보여준다. 저항형 초전도 전류제한기는 고장이 발생하면 고장기간 동안 초전도 소자가 직접적으로 고장전류를 제한하므로 오랜 시간동안 저항이 발생·지속되므로 여러 곡선이 나타난다. 이는 저항형 초전도 전류제한기의 초전도 소자에 많은 부담이 가해진다는 것을 의미한다. 반면에 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 V-I 곡선은 저항형 초전도 전류제한기의 곡선보다 반복된 횟수가 현저히 적게 보인다. 이 결과는 반주기내 한류형 초전도 전류제한기의 동작특성으로 초전도 소자는 짧은 시간에 고장전류를 감지하고 회복하는 형태로 부담이 적은 것을 의미한다. 두 곡선의 기울기를 비교하면 발생된 저항의 크기를 알 수 있는데, 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 기울기가 저항형 초전도 전류제한기보다 작은 것은 짧은 시간에 고장전류 제한 동작을 하기 때문에 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기가 작은 점을 알 수 있다.

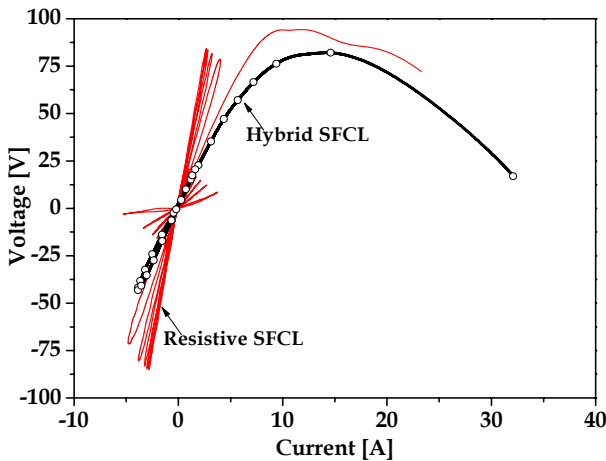


그림 4 저항형 초전도 전류제한기와 하이브리드 초전도 전류제한기의 초전도 소자 V-I 곡선.

Fig. 4 V-I curves of superconducting element between resistive SFCL and hybrid SFCL.

반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 초전도 소자가 부담하는 크기가 저항형 초전도 전류제한기보다 적은 점을 확인하였다. 그러나 반주기내 한류형 초전도 전류제한기에서 초전도 소자의 저항의 크기에 따라 구동코일로 흐르는 전류에 의하여 동작 특성이 달라진다. 따라서 초전도 소자의 저항에 크기에 따라 동작 변화를 분석하였다. 초전도 소자의 저항을 변화시키는 방법은 초전도 소자에 병렬로 저항을 연결하고 병렬로 연결된 저항의 크기를 변화함으로써 켜치시 초전도 소자에 발생하는 저항의 크기를 조절할 수 있다. 병렬로 연결된 저항의 크기는 2.3, 5.2, 10.4 [Ω]으로 증가시키는 형태로 설계 조건을 정하였고, 병렬 연결 저항의 변화에 따른 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 특성을 분석하였다.

그림 5는 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기에서 설계 변수로 설정한 초전도 소자의 저항 크기의 변화

를 보여준다. 이는 앞선 설명과 같은 방법으로 초전도 소자에 병렬로 저항을 연결하여 저항의 크기를 조절하였을 때 초전도 소자에 발생하는 전압 및 전류에 의하여 나타난다. 저항 곡선에서 초전도 소자의 켜치로 저항이 증가하다가 갑자기 0이 되는 부분은 구동 코일에 전류가 분기되어 흐르다가 전력용 스위치의 동작으로 초전도 소자에 직렬 연결된 SW2가 개방되어 초전도 소자에 흐르는 전류와 양단의 전압이 0이 되어 초전도 소자의 회복특성을 보이지 못하고 저항이 0이 되는 결과를 보여준다.

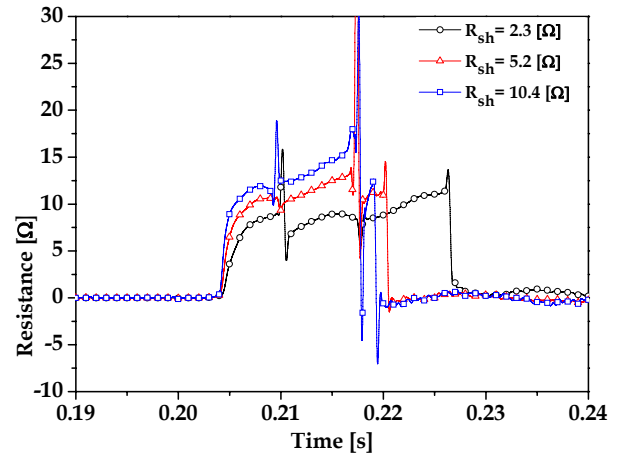


그림 5 병렬저항에 따른 초전도 소자의 저항 변화.

Fig. 5 Resistance of superconducting element in case of various shunt resistances.

초전도 소자에 병렬로 연결된 저항의 크기에 따라서 켜치시 발생하는 초전도 소자의 저항이 조절됨을 확인할 수 있다. 또한 저항의 발생 시간으로부터 초전도 소자에 발생한 저항이 작을수록 구동코일로 흘리는 전류가 적기 때문에 구동 코일에서 전자력이 발생하기까지 시간이 더 필요하다는 것을 알 수 있다. 각 병렬저항에 따라 나타나는 영향을 분석하면 그림 6부터 그림 8과 같다.

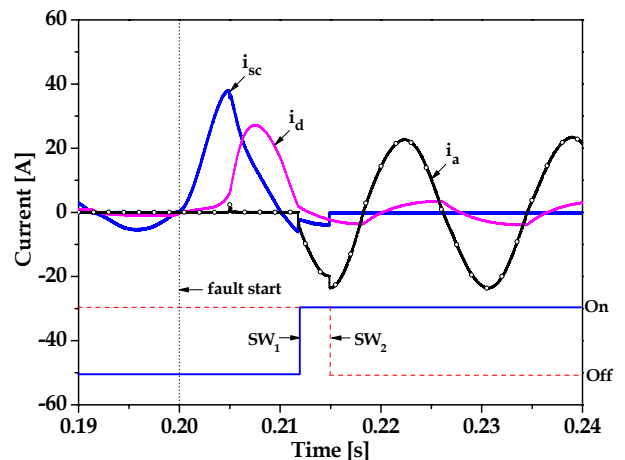


그림 6 초전도 전류제한기의 내부전류 ($R_{sh} = 2.3$ [Ω]).

Fig. 6 Waveforms of hybrid SFCL's inside current ($R_{sh} = 2.3$ [Ω]).

그림 6은 2.3 [Ω]의 병렬 저항을 적용한 경우 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 구성에서 초전도 소자와 구동 코일에 흐르는 전류를 나타낸 파형이다. 그림 2에서 본바와 같이 고장전류가 초전도 소자로 흐르다가 고장 발생으로 큰 전류로 인하여 구동 코일로 전류가 분기되고, 구동 코일에 흐르는 전류에 의하여 각 접점의 동작이 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 병렬 저항이 각각 5.2 [Ω], 10.4 [Ω]을 적용하였을 경우 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류 제한기의 초전도 소자와 구동코일의 전류 파형을 보여준다. 두 결과도 그림 2, 6과 같이 고장전류에 의하여 초전도 소자에 저항이 발생되고, 구동 코일로 전류가 분기되면서 스위치가 동작됨을 확인할 수 있다. 그림 6-8의 동작은 반주기내 한류형 초전도 전류제한기의 동작으로 일정함을 볼 수 있지만, 구동 코일로 흐르는 전류(i_d)를 비교하면, 증가되는 기울기와 크기가 변하는 점을 확인할 수 있다.

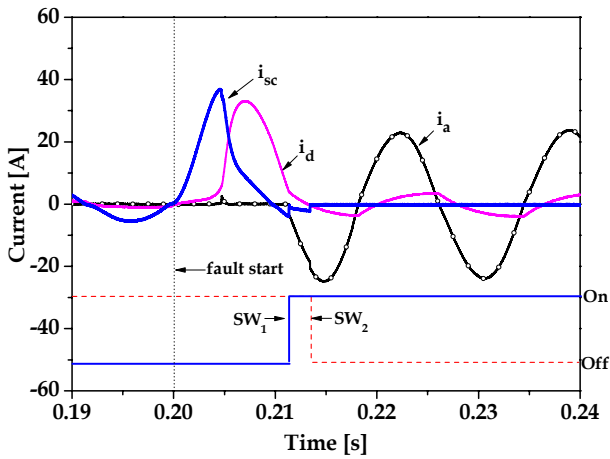


그림 7 초전도 전류제한기의 내부전류 ($R_{sh} = 5.2$ [Ω]).
Fig. 7 Waveforms of hybrid SFCL's inside current ($R_{sh} = 5.2$ [Ω]).

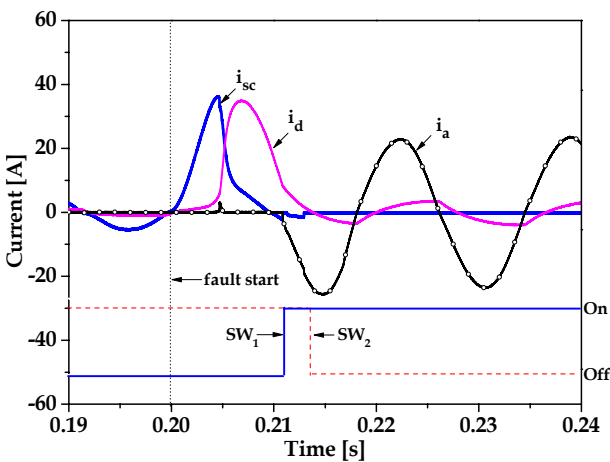


그림 8 초전도 전류제한기의 내부전류 ($R_{sh} = 10.4$ [Ω]).
Fig. 8 Waveforms of hybrid SFCL's inside current ($R_{sh} = 10.4$ [Ω]).

이는 병렬된 저항이 증가하면서 초전도 소자에서 발생하는 저항이 증가하여, 구동 코일이 갖는 임피던스의 크기와 비교하여 구동 코일로 흐르는 전류의 양이 크기 때문에 구동 코일에서 나타나는 전류의 기울기와 크기가 증가함을 알 수 있다. 또한 구동 코일에 흐르는 전류가 많을수록 구동 코일의 전류 크기로 동작하는 접점 스위치의 동작 시간이 변하는 결과를 확인할 수 있다.

실험 결과, 초전도 소자의 저항이 클수록 구동 코일로 흐르는 전류의 크기가 증가하게 되고 구동 코일에 흐르는 전류의 크기가 클수록 스위치가 좀 더 빠르게 동작하는 것을 확인하였으며, 구동 코일에 흐르는 전류의 크기에 따라 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기의 동작 시간에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.3 고장전류 제한 및 모션 전압 특성 분석

반주기내 한류형 초전도 전류제한기의 구성요소 중 초전도 소자의 저항 크기에 따른 동작을 분석하였다. 또한 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기에 대하여 고장전류 제한 특성을 분석하였다.

그림 9는 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기를 적용했을 경우와 적용하지 않았을 경우의 고장전류의 파형을 보여준다. 결과적으로 몇 주기 후에 고장전류는 초전도 전류제한기의 동작으로 제한되는 것을 볼 수 있지만 고장 발생 초기에 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기에 따라서 제한되는 특징이 다른 것을 확인할 수 있다. 이는 고장발생 후 반주기내에서 초전도 소자가 고장전류를 제한하기 때문에 초전도 소자에 발생된 저항의 크기에 의존한다. 또한, 초전도 소자의 저항 크기에 따라 접점 스위치의 동작이 달라지므로 고장전류가 제한되는 시점도 약간의 차이가 발생한다. 즉, 초전도 소자에 연결된 병렬 저항의 크기가 2.3, 5.2, 10.4 [Ω] 순으로 증가하면 그에 따라 초전도 소자에 발생하는 저항이 증가되므로 고장발생 후 반주기에 제한되는 고장전류의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

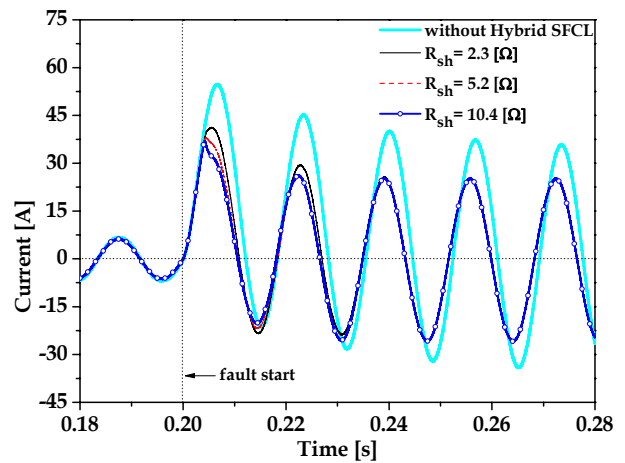


그림 9 초전도 소자의 저항변화에 따른 고장전류 곡선.
Fig. 9 Waveforms of fault current in case of various resistances of superconducting element.

그림 10은 반주기내 한류형 하이브리드 초전도 전류제한기를 적용하지 않았을 경우와 그림 3과 같이 피더 인출점에 적용했을 경우의 모선 전압을 나타낸다. 피더 인출점에 반주기내 한류형 초전도 전류제한기의 설치로 모선에 고장점까지 기존에 없는 임피던스가 추가되어 모선에는 반주기내 한류형 초전도 전류제한기가 갖는 임피던스 크기만큼 전압강하가 보상되는 특징을 보여준다. 모선 전압의 보상크기역시 고장전류 제한의 특징과 같이 최종적으로 보상되는 전압의 크기는 같지만, 반주기내의 동작에서는 초전도 소자의 크기가 증가할수록 보상되는 전압의 크기가 증가하고 점점 스위치의 동작 시간에 따라 전압이 보상되는 시점이 다른 것을 알 수 있다.

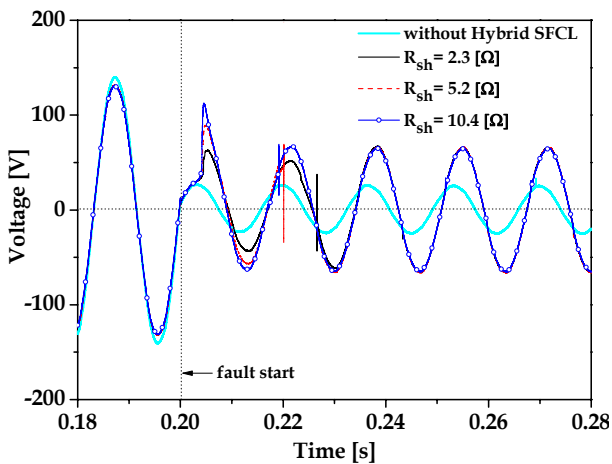


그림 10 초전도 소자의 저항변화에 따른 모선 전압 곡선.
 Fig. 10 Waveforms of bus voltage in case of various resistances of superconducting element.

4. 결 론

본 논문에서는 반주기내 한류형 초전도 전류제한기의 초전도 전류제한기의 동작 및 고장전류 제한 특성에 대하여 분석하였다.

반주기내 동작하는 하이브리드 초전도 전류제한기의 구성요소 중 초전도 소자의 저항 변화에 따라 고장전류의 제한 특징을 검토하였다. 또한, 설계 변화에 따라 고속 스위치가 동작하는 시간의 변화에 대하여 분석하였다.

첫 번째로 구동 코일로 흐르는 전류는 초전도 소자에서 발생하는 저항의 크기에 의존하며, 점점 스위치의 동작시간이 변함을 알 수 있었다. 두 번째로 초전도 소자의 저항이 증가하게 되면 고장 발생시 점점 스위치 동작 전까지 전류가 제한효과가 크다는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 기존의 초전도 전류제한기와 다르게 반주기내 한류형 초전도 전류제한기는 초전도 소자의 크기나 전력 부담이 상대적으로 적어지기 때문에 회복 특성 등 장점을 지니고 있다. 본 논문에서 분석결과는 초전도 전류제한기를 계통에 적용할 때 동작시간을 고려한 동작설계에 용이할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 경제부/한국산업기술평가관리원[사업명: 컨버전스 기반의 신재생에너지원 개발을 위한 원천융합기술 인력양성]에 의해 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 이강완, “전력계통 고장전류 문제와 초전도 한류기”, 초전도와 저온공학, 3권 1호, pp. 8-12(5), 2001.
- [2] Lin Ye, LiangZhen Lin, Klaus-Peter Juengst, “Application Studies of superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems,” IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 12, no. 1, pp. 900-903, 2002.
- [3] B. Gromaoll, G. Ries, W. Schmidt, H-P. Kramer, P.kummeth, and H.-W. Neumuller, “Resistive currentlimiters with YBCO films,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp. 828-831, June 1997.
- [4] W. Paul, Th. Baumann, J.Rhyner, and F. Platter, “Test of 100 kW high-Tc superconducting fault current limiter,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 5, no. 1, pp. 1059-1062, June 1995.
- [5] 안재민, 김진석, 문종필, 임성훈, 김재철, 김철환, 현옥배, “배전계통에 초전도 전류 제한기 적용시 보호협조 분석”, 제 57권 제 5호, pp. 755-760, 2008.
- [6] B. W. Lee, J. Sim, K. B. Park, I. S. Oh, S. W. Yim, H. R. Kim, O. B. Hyun, “Fabrication and Test of the 24kV class Hybrid Superconducting Fault Current limiter,” Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol. 9, no.4, pp. 32-36, 2007.
- [7] H.-R. Kim, S.-W. Yim, O.-B. Hyun, J. Sim, and S.-Y. Oh, “Analysis on recovery characteristics of superconducting fault current limiters,” MT-20 Conference on Magnet Technology, 2007.
- [8] Ok-Bae Hyun, Jung-Wook Sim, Hye-Rim Kim, Kwon-Bae Park, Seong-Woo Yim, and Il-Sung Oh, “Reliability Enhancement of the Fast Switch in a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter by Using Power Electronic Switches,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1843-1846, June 2009.
- [9] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G. Lee, H. R. Kim, and O. B. Hyun, “Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, no. 2, pp. 624-627, June 2008.

저 자 소 개



김진석 (金辰碩)

1983년 1월 26일생, 2007년 서울산업대 전기공학과 졸업, 2009년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2009년~현재 동대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 817-7966

Fax : (02) 817-0780

E-mail : redwolf832@ssu.ac.kr



임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일생, 1996년 전북대 전기공학과 졸업, 2003년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 2006년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 828-7268

Fax : (02) 817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr



김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 817-0647

Fax : (02) 817-0870

E-mail : jckim@ssu.ac.kr



최종수 (崔鍾壽)

1958년 2월 19일생. 1993년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2001년 8월 한양대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 2월 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업 (박사).

Tel : (041) 330-5010

Fax : (041) 330-5005

E-mail : choijs@kesco.or.kr