

유도형과 저항형 초전도한류기의 파라메타를 고려한 전력계통도입효과의 분석 및 성능평가에 관한 연구

(On the Current Limiting Characteristics and Parameters of Superconducting Fault Current Limiter Introduced to 345kV Electric Power System due to Resistive-Type, Reactive-Type and Their Performance Comparison)

홍원표* · 김용학

(Won-Pyo Hong, Hak-Yong Kim)

요 약

본 논문은 전력설비에 조기적용이 예상되는 초전도한류기의 파라메타를 정의하고 앞으로 개발방향을 제시하기 위하여 한류기의 동작원리, 특성 및 계통조기적용가능성들을 근거로 파라메타의 특성을 비교·평가하였다. 또한 한류기의 계통적용효과를 분석하기 위하여 SFCL이 기간 특고압 모델계통에 도입한 경우를 상정하여 3선지락 고장에서 저항형과 유도형 SFCL의 도입 효과에 대하여 RTDS (Real Time Digital Simulation)/EMTDC (Electromagnetic Transient DC)로 시뮬레이션하였다. 특히 저항형과 유도형의 한류효과의 비교 평가, 모션전압의 저하 억제 및 계통과 한류기의 파라메타와의 관련성에 대하여 검토하였다.

Abstract

The maximum short circuit current of modern power system is becoming so large that circuit breaker is not expected to be able to shut down the current in the future. In order to cut over-currents, a system composed of a superconducting fault current limiter(SFCL) and traditional breaker seems to provide a promising solution for future power operation. In present paper, three line-to-ground fault is assumed to happen at the center of 345kV transmission lines in a large capacity electric power system. The superconducting fault current limiter was represented using a commutation type, which consists of a non-inductive superconducting coil and current limiting element(resistor or reactor). The introduction merits of the SFCL were investigated quantitatively by RTDS/EMTDC from the viewpoint of current limiting performance, the prevention of the voltage drop at the load bus and comparison characteristics for two type SFCL. Desired design specification and operation parameters of SFCL were also given qualitatively by the performance evaluation of the two type SFCL in the power system.

Key Words : RTDS/EMTDC, fault current, inductive type SFCL, resistive typeSFCL

* 주저자 : 한밭대학교 건축설비공학과 교수
Tel : 042-821-1179, Fax : 042-821-1175
E-mail : wphong@hanbat.ac.kr
접수일자 : 2002년 3월 15일
1차심사 : 2002년 3월 25일
심사완료 : 2002년 4월 22일

1. 서 론

전력수요의 증가 및 고도정보사회의 진전으로 인하여 전력의 고밀도 대용량화 고품질화의 요구가 한

충 높아지고 있다. 이를 대응하기 위하여 전력계통의 대규모화, 이를 구성하는 전력기기의 대용량화 또한 송전선 회선수의 증가가 불가피한 실정이다. 이와 같은 현상은 계통의 단락용량증대 뿐만 아니라 고장전류를 증가시키게 된다. 더욱이 가까운 장래에 교류 초전도 케이블이 도입되면 이러한 경향은 현저히 증가할 것으로 보이며 따라서 사고 발생시 계통기기에 가해지는 쇼크가 과대하게 되고, 차단기의 대용량화, 고가격화는 물론 계통의 고장전류가 차단기의 차단 능력을 초과하는 현상이 현재 나타나고 있으며 앞으로 더 증가할 것으로 예상된다[1]. 이와 같은 사태의 해결책의 하나로써 고장전류를 억제시키는 한류기가 있으며 즉 송전선[2] 및 배전선[3]의 고장전류를 억제하기 위하여 설치하는 경우 송전선의 직렬로 삽입하며 그 외에 중요한 기기 전후, 모선접속부 등에 삽입이 검토되고 있다[4]. 한류기의 기대되는 동작은 송전선에 흐르는 전류가 통상 운용치를 초과하여 사고로 판단되는 크기에 이르면 적절한 임피던스를 가지고 사고전류를 억제하도록 하는 것이다. 계통으로부터 한류기의 요구되는 성능으로는

- (1) 정상 운전시 손실이 극히 적어야하고 사고시 고 임피던스를 발생해야 한다.
- (2) 한류특성의 동작점이 정확할 필요가 있다.
- (3) 동작속도가 빨라야한다(1cycle 이하)
- (4) 송전선의 사고제거를 위하여 통상 1초 이내에 재 폐로 조치가 행해지기 위해서 사고제거 후 한류 동작상태로부터 정상상태로 복귀해야한다.
- (5) 연속되는 사고에 대해서도 대응할 수 있어야 한다.
- (6) 한류 동작시와 정상상태로의 복귀시 계통에 이상전압을 발생시키지 않아야 한다.

이와 같은 성능을 만족시키기 위하여 초전도를 이용하는 초전도한류기(Superconducting Fault Current Limiter: SFCL)가 유력하게 검토되고 있으며 고온초전도 소자를 이용한 다양한 종류의 연구가 1990년대를 기점으로 괄목할만한 진전을 이루고 있다. 지금까지의 연구의 성과로 수십 kV, 수 kA까지의 용량을 가진 SFCL을 개발한 바 있다[5]. SFCL은 정지기로서 구조가 비교적 간단할 뿐만 아니라 상전도시스템, 초전도시스템과 상전도시스템의 병용 운전되는 하이브리드 시스템 및 온 초전도시스템에서도 요구되는 조건을 효과적으로 충족시킬 수 있는 유력한 기기이

기 때문에 전력계통에서의 조기 적용이 확실시되고 있다. 특히 1990년도 후반에 고온 초전도체를 이용한 SFCL연구개발이 집중적으로 이루어 졌으며 그 중요한 예로는 ABB사의 차폐코아형, GA사의 inductive/electronic 형, EA technology의 저항/유도형 및 Siemens사의 저항박막(resistive-thin-film) 형 등이 다[6]. 그러나 SFCL은 계통에 도입하려면 계통의 구성, 운용 및 보호 시스템에 현저한 변화를 주는 기기이기 때문에 계통관점에서 심도 있는 검토가 필요하다. 즉 다양한 시스템에서의 고장전류억제효과의 분석, 계통의 과도안정도 향상을 위한 각 SFCL의 특성 분석 및 평가, 계통보호시스템과 SFCL의 파라메타의 설정과 계통과의 상호 관련성 해석 및 이를 토대로 계통에서 요구하는 사양검토 등이 다각적인 관점에서 검토되어야 한다[7,8]. 또한 이를 수행하기 위하여 먼저 SFCL의 다양한 모델 개발이 이루어 져야하나 현재 실용화된 기기가 없고 계속적으로 개발연구가 진행되고 있다. 특히 [9]는 AC 손실을 고려한 Bi(2223)고온초전도 테이프샘플에 대하여 비 선형모델 개발을 시도한바 있으나 아직까지 초전도한류기의 열적, 전기적 및 기계적인 특성을 고려한 모델이 개발되어 있지 않다. 그러나 정확한 계통해석을 위해서는 계통해석 시뮬레이션 tool을 고려한 상세한 비선형 모델[10]의 개발이 필요하다. 현재까지는 SFCL의 한류 소자인 저항과 유도형 리액턴스가 계통에 직렬로 삽입되는 것으로 상정하여 계통해석이 주류를 이루고 있으나 현재 非轉移형에 대해서도 개념적인 연구와 실험 및 초보적인 계통해석이 최근에 이루어지고 있다[11]. 본 논문에서는 SFCL이 기간 345kV 모델계통에 도입한 경우를 상정하여 3선지락 고장에서 저항형과 유도형 SFCL의 한류기 도입 효과에 대하여 RTDS (Real Time Digital Simulation)/EMTDC (Electromagnetic Transient DC)로 시뮬레이션하였다. 특히 저항형과 유도형의 한류효과의 비교 평가, 모선 전압의 저하 억제 및 계통과 한류기의 파라메타와의 관련성에 대하여 검토한 중간 연구 결과이다.

2. SFCL의 분류 및 성능비교평가

2.1 SFCL의 분류

SFCL의 분류는 쉽게 재료에 따라서 고온과 저온 type로 분류할 수 있지만 이 분류는 SFCL의 시스템

특성을 나타내는 데 한계가 있으며 경제적 효과를 고려하여 고온 SFCL의 개발이 주로 이루어지고 있다. 따라서 SFCL의 분류방식은 현재까지 개발되어 보고된 자료를 근거로 SFCL의 특성과 구조 등을 종합적으로 반영한 분류는 다음과 같다. 이는 전이형 (Superconducting/ Normal: S/N)과 비전이형으로 크게 나눌 수 있으며 개발초기단계에서는 주로 높은 한류임피던스 발생을 목적으로 전이형 중심으로 개발이 집중되어 왔으나 전이형은 상전도 상태에서 초전도상태로의 복귀시간이 차단기의 재폐로시간 이내의 요구조건을 만족시키는 데 제한이 있기 때문에 비전이형 개발에 관심을 돌리게 되었다. 이 방식은 철심을 사용하는 것과 철심을 사용하지 않는 방식들이 개발되고 있다. 이 철심/비철심 비전이형은 한류개시전류의 변동, 전류리드 및 기계적 스위칭의 한계를 극복하기 위하여 변압기의 기본원리를 이용하게 되었다. 여기에 표기한 복합형(hybrid type)은 한류소자가 저항(resistive)형과 유도형(inductive)형 2가지 기능을 동시에 가지고 있는 것이며 한류소자의 전기적 관점에서는 복합형, 저항형 및 유도형으로 크게 나누어 일반적으로 표기하고 있다. 중요한 개발방향 중의 하나인 자기차폐형은 초전도의 고유특성인 Meissner's effect를 이용한 전이형이지만 종래의 전이형과는 고장전류가 직접적으로 초전도 소자에 흐르지 않고 고임피던스를 발생하는 특징을 가지고 있다. 또한 앞으로 SFCL의 개발에서 크게 주목해야 할 방식은 비전이형의 보조회로를 가진 반도체소자 (electronic type)를 사용하는 형이라 할 수 있다. 이 방식은 반도체소자의 대용량화와 빠른 스위칭 타임을 가지고 있기 때문에 배전계통의 소용량에서부터 송전계통의 대용량까지 검토되고 있다. 그리고 그 구조 및 특성을 계통의 조건에 적합하도록 설계가 가능한 장점을 가지고 있다. 동작특성상 비전이형과 전이형이 있으며 특히 비전이형은 정상상태에서 초전도의 특성인 무 손실을 효과적으로 이용하고 고장시 고 임피던스를 보조회로를 통하여 발생시켜 전이형 SFCL에서의 복귀(recovery) 시간 한계 극복과 에너지 손실의 문제점을 동시에 해결할 수 있는 형으로 계통측면에서 발전기측의 고장시 계통에 필요한 전력을 공급할 수 있는 기능이 있어 과도 안정도 향상에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 부하측 선로의 고장 시에는 계통에 전력을 흡수할 수 있어 고장전류억제

기능을 수행할 수 있는 등 계통의 적용을 고려한 여러 형태의 SFCL들이 개발되고 있다.

2.2 SFCL의 성능비교

SFCL은 구조, 특성에 따라 다양한 종류가 개발되고 있으며 현재까지의 선진국 개발동향, 개발수준(개발비 및 용량), 특성의 장단점 및 동작방식 등의 기준으로 SFCL은 크게 전이 유도형(LSFCL, 계통에 병렬 연결), 전이 저항형(RSFCL, 계통에 직렬접속), 자기차폐형(SCRFL, 전이 하이브리드 형), 자속구속 (FLSFCL, flux lock)형, DC 리액터형(ReSFCL1, 비전 이, with bias current), DC 리액터(ReSFCL2, 비전 이, without bias current) 및 가 포화리액터 (SATFCL) 대별할 수 있다. 본 연구에서 검토한 SFCL의 특성 및 동작원리는 [7-22]자료를 근거로 하였다.

검토된 대표적인 7개형의 SFCL은 장단점을 가지고 있으며 개발의 중요성과 계통적용 가능성을 근거로 선정하였으며 이 성능비교 평가는 한류임피던스, 동작개시전류, 복귀특성, 동작시간(operation time) 및 동작손실에 대하여 검토하였다.

(1) 복귀시간

복귀시간은 가공 송배전선로의 차단기의 재폐로가 요구되는 곳에는 매우 중요한 파라메타로 짧을수록 좋은 특성을 가지나 초전도 선재, SFCL의 구조, 열 방출 상태 및 냉각시스템의 성능에 크게 영향을 받는다. 표 1은 SFCL의 종류별 복귀시간을 정성적으로 검토한 결과이다.

표 1. 퀘치 복귀시간
Table 1. Quench Recovery Time

Type	Investigation for recovery time
LSFCL	Difficult
RSFCL	Very difficult
SCRFL	Difficult
ReSFCL1	No problem
ReSFCL2	No problem
FLFCL	Difficult
SATFCL	No problem

평가항목에서 No problem은 비전이형이기 때문이며 문제가 되지 않지만, 특히 계통선로에 직렬로 삽입되는 RSFCL과 LSFCL은 전이형으로 재폐로가 필

요한 송전 및 배전선로의 사용에서는 특별한 설계가 필요하다. 또한 차단기의 차단성능과 협조가 이루어져야 하며 고속차단방식이 요구되는 345[kV]이상의 선로(3 cycle 이하)에서는 이 파라메타가 중요한 설계 요소가 된다.

(2) 한류임피던스

표 2는 한류 임피던스의 관계된 요소를 요약한 것이다. 이 파라메타는 계통의 고장전류 크기를 결정하는 데 제일 중요한 요소이다. 직렬로 계통에 연결되는 전이형 RSFCL에서는 초전도체(thin-film, bulk)가 상전도 상태로 전이되는 저항으로 최종저항을 얻기 위하여 매우 정교한 설계가 요구되며 또한 복귀시간과 연관된 검토가 필요하다. 전이형에서 복귀시간은 초전도체의 설계 및 냉각시스템 등과 연관되어 다각적인 검토가 필요하지만 한류시스템에서 회로적 설계 관점에서 해결방안을 모색해야 할 것으로 판단된다. 전이형과 비전이형에서 공히 한류임피던스를 용이하게 얻을 수 있도록 철심을 이용하여 또한 SFCL의 구조 및 동작성능을 향상시키기 위하여 보조적으로 변압기 원리를 이용하여 필요한 한류임피던스 및 복귀시간 문제를 해결할 수 있다.

표 2. 한류임피던스
Table 2. Final Impedance of SFCL

Type	Final impedance
LSFCL	Impedance of limit coil (SC coil)
RSFCL	Normal impedance of SC elements (thin-film, bulk, coil, tape)
SCRFCL	depend on inductance of conventional coil and resistance of SC
ReSFCL1	Impedance of SC coil
ReSFCL2	Impedance of SC coil
FLFCL	function of L1, L2, L3 and RSC(B)
SATFCL	Mutual and self inductance between SC and conventional coil the magnetic curve of iron core

그러나 비전이형에서는 시스템 자체가 복잡해지고 특히 철심이 매우 큰 사이즈로 설계하여 하기 때문에 계통실용화 관점에서는 전이형과 연관하여 심도 있는 검토가 요망된다. ReSFCL의 임피던스는 계통에서 볼 때 한류기에 흐르는 전류 및 계통의 상태에 따라 다르기 때문에 고장 해석시 이러한 특성을 고

려하여야한다.

(3) 동작개시전류

표 3은 동작개시전류와 초전도 퀸치전류와의 관계를 동작특성관점에서 파악한 것이다. 초전도한류기의 동작책무·비동작책무를 고려하는 파라메타로 SFCL의 동작개시전류를 선정하는 것은 어려움이 있다. 이를 효과적으로 해결하기 위하여 먼저 초전도선 자체의 제작성능을 향상시키는 것이며 다른 하나는 초전도 퀸치전류와 동작개시전류사이의 관계를 변동시킬 수 있는 SFCL의 구조 및 동작특성을 개선하는 것이다.

표 3. 동작개시전류와 초전도소자의 퀸치전류와의 관계
Table 3. Relationship Operation Start Current and Quench Current of SC elements

Type	Relationship of I_{LS} and I_{quench}
LSFCL	$I_{LS} = I_{quench}$
RSFCL	$I_{LS} = I_{quench}$
SCRFCL	$I_{LS} = M \cdot I_{quench}$ (M is mutual inductance between SC element and conventional coil)
ReSFCL1	I_{LS} depends on DC bias current
ReSFCL2	I_{LS} depends on the capacity of the fault current limiting of SC coil
FLFCL	$I_{LS} = (1 \pm \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}) I_{quench}$ (L_1, L_2 represent the self inductance of two parallel coils respectively)
SATFCL	I_{LS} depend on mutual inductance between SC and conventional coil the magnetic curve of iron core

본 연구에서는 검토되지 않았지만 변압기원리를 이용하여 동작개시전류 레벨을 변화시킬 수 있는 SFCL도 실험실규모의 단계에서 제안되어지고 있다. 동작개시 전류는 비전이형 SFCL에서 특성에 영향을 미치기 때문에 계통의 고장전류 계산에서 특히 관심을 가져야 한다.

(4) 동작손실

냉각시스템 손실은 본 검토에서 고려되지 않았으나 RSFCL, LSFCL, SCRFCL 등은 냉각시스템 손실을 제외하면 기기동작손실은 적으며 변압기원리를 이용하는 전이형에서는 1차와 2차코일의 누설리액턴스로 인하여 무효전력을 소비하며 FLFCL과 SATFCL

에서는 상전도코일이 계통에 직렬로 연결되기 때문에 유효전력도 소비하게 된다. 또한 ReSFCL과 ReSFCL2는 반도체소자의 전압 강하에 의하여 동작 손실이 발생하게 된다.

(5) 동작시간

전이형에서의 동작시간은 초전도상태에서 상전도 상태로 전이하여 최종임피던스가 확립되는 시간이다. 계통에 직렬로 연결된 RSFCL은 상전도로 전이되어 최종적으로 저항이 확립되는 데 걸리는 시간이 된다. 계통의 고장전류를 억제하기 위해서는 빠른 동작시간이 요구되며 5msec이내가 요구된다 특히 고온초전도SFCL은 저온초전도SFCL보다 같은 길이의 초전도체에서 퀘치시간이 늦기 때문에 이 동작시간이 늦어져 기기설계에서 매우 어려운 과제를 가지고 있다. SATFCL은 마이즈너효과를 이용하기 때문에 1[msec]의 설계가 가능하고 ReSFCL에서는 동작시간의 고려 없이 전류를 한류할 수 있다. SATFCL은 포화철심의 임피던스 증가는 B-H 곡선과 철심의 동작점에 따라 다르다.

2. 모델계통과 모의 조건

2.1. 모델계통

그림 1은 검토대상인 모델전력계통을 표시한 것이다. 본 모델계통의 송전전압은 345[kV], 주파수는 60[Hz]이다. 평상시 발전기의 G1 및 G2는 각각 5220MVA를 발전하는 대용량 발전기와 모선 201에 연결된 6900+j1500[MVA]의 정 임피던스 부하를 상정하였다. 이 모델계통은 직접접지방식을 채용하였으며 고장은 2회선 송전선중 한 송전선 중간에 고장이 발생하는 것으로 하였다. SFCL을 도입하지 않는 경우 고장점 F에서의 3상단락 고장전류는 50[kA]로 그림 1은 대도시 지역에 전력을 공급하는 것으로 집약하여 단락전류가 현재 차단기의 최대정격차단전류치 40[kA]를 초과하도록 모델화 한 것이다.

본 해석에서는 발전기의 가속을 무시했으며 변압기 고·저압측 각각 Y결선방식을 채용하는 것으로 하였다. EMTDC에서 정확한 데이터를 얻기 위하여 PSS/E를 사용하여 조류계산을 실시하였다. 그 관련 데이터를 그림 1에 표시하였다. 또한 본 검토에서는 송전선을 3상의 대지 정전용량을 고려한 분포정수회로로 모의하였으며 정 임피던스 부하를 상정하였다.

표 4는 송전선로 정수를 나타낸 것이다.

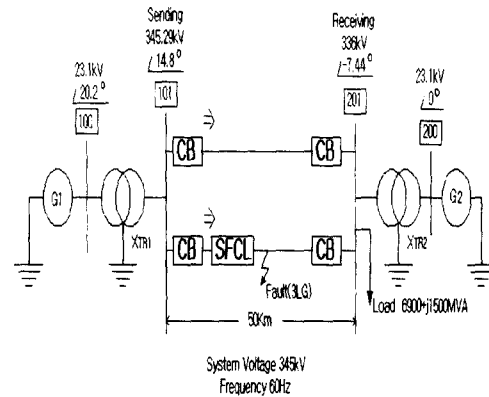


그림 1. 모델 전력계통
Fig. 1. Model power system

표 4. 송전선로정수
Table 4. Transmission line constants

	정상임피던스
저항[Ω/km/회로]	0.06759
인덕턴스[mH/km/회로]	1.605
정전용량[μF/km/회로]	0.0405

2.2 초전도한류기의 구성과 동작특성 모델화

그림 2는 본 검토에 사용된 SFCL의 저항발생 패턴을 표시한 것이다. 본 SFCL은 질소온도에서 초전도가 되는 고온초전도체의 무유도 코일로 가정하고 한류소자로는 저항소자와 리액터소자를 병렬로 접속하는 轉流型으로 한다. 여기서는 한류형소자가 저항인 경우에는 저항형SFCL(R-FCL), 리액터인 경우는 유도형 SFCL(L-FCL)이라고 하였다. 정상상태에서는 전류는 제로 임피던스를 가진 초전도소자로 흐른다. 그러나 단락 및 지락고장이 발생할 때에는 한류기의 동작개시전류 ILS이상에 도달하면 초전도소자는 그림 2와 같이 높은 저항을 발생시킨다. 이 때문에 고장전류는 병렬로 접속된 한류소자로 흐른다. 고장전류는 병렬로 접속된 한류소자로 전류되어 흐르며 한류소자와 초전도소자와의 합성임피던스(한류임피던스)인 한류임피던스 ZLF에 의하여 한류된다. 여기서 한류기의 동작개시전류치로는 초전도코일이 S/N으로 전이되어 한류동작을 개시하는 전류치를 지칭한다.

전류가 동작개시전류이하로 감소해도 초전도소자는 초전도상태로 복귀하지 않고 한류동작을 계속하는 것으로 하였다. 초전도소자의 S/N 전이 후 상전도저항의 발생과정은 그림 2에 표시한 바와 같이 RSC ($1 - \exp(-t/TSC)$)로 모의하였으며 RTDS/EMTDC의 모의에서는 상전도가 매우 빠르게 적정 저항치에 도달하기 때문에 계단 값으로 한류저항이 접속되는 것으로 하였다. 본 연구에서 상정한 SFCL의 동작 파라메타는 표 5에 나타내었다.

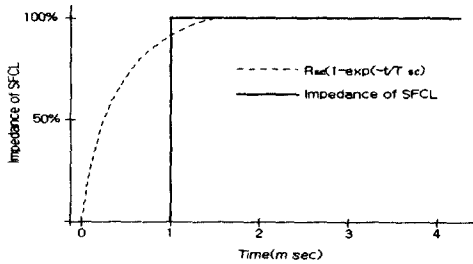


그림 2. SFCL의 저항발생 패턴
Fig. 2. Variable resistance pattern of a superconducting coil under quench

표 5. SFCL의 동작파라메타
Table 5. Operating parameters of SFCL

고장종류	3상 지락
FCL의 종류	저항형, 유도형
초전도 개시전류치(I _{cs})	20kA
초전도소자의 상전도저항치 R _{sc} (Ω)	100
초전도소자의 저항발생시정수T _{sc} (ms)	1, 5
한류임피던스의 크기	10, 30Ω

2.3 동작개시전류치

SFCL의 동작개시전류의 상정은 계통운용에서 매우 중요하다. 정격전류 I_N에 대하여 한류 동작개시전류 ILS의 비를 k라하고 시스템운영상의 여유도라한다.

$$I_{LS} = k \times I_N$$

여기서 k가 1에 가까우면 과부하에 의한 통전전류가 순시적으로 정격전류를 초과하기가 쉬워 SFCL이 파민반응 하고, 한류기가 동작을 개시하게 된다. 반면에 k가 크게되면 정격치보다도 큰 통전 전류가 시스템에 연속 통전해도 SFCL이 한류동작을 개시하지 않는다. 따라서 k의 값을 어느 정도 설정할 것인가

앞으로 전체시스템운영에 중요한 문제가 된다.

또한 변압기 여자돌입전류 Irush에 대하여 한류개시전류를 어떤 레벨로 설정하는가가 중요한 사항이다. SFCL의 동작빈도를 적게 하고 싶은 경우에는 전류제한 동작개시전류를 여자돌입전류보다 아주 높게 설정하면 된다. 그러나 동작개시전류를 아주 높게 설정할 수 없기 때문에 초전도변압기에 있어서는 철심의 자속밀도를 낮게 하든가 공심을 사용하고 또는 전원 투입시에 위상을 조정, 여자돌입전류를 낮게 하여 SFCL의 여자돌입전류에 의한 동작을 방지해야 한다. 이와 같은 초전도전력시스템에 있어서는 초전도선의 켄치를 방지하기 위하여 각 기기의 켄치전류 레벨에 착안한 협조가 필요하고 종래 시스템에서와는 아주 다른 보호방식의 켄치전류보호 협조라는 새로운 개념의 보호방식을 구현해야 하며 이의 근간이 되는 기기가 SFCL이다. 따라서 본 연구에서는 모선 1회선의 부하전류의 약 10배인 20[kA]를 동작개시전류치 ILS로 선정하였다. 이는 변압기의 돌입전류이상이어야 하며 차단기의 정격차단전류의 파괴치 50[kA]이기 때문에 상한 설정치는 50[kA]이하에서 선정되어야한다.

2.4 전류 및 전압파형 및 평가항목

표 2에서 표시한 바와 같이 저항형과 유도형 한류기가 한 송전선 중간에 3상지락사고가 발생한 후 SFCL 별 (1)한류효과의 비교 평가(고장전류의 교류 성분 억제) 및 (2) 모선에서의 저압 저하의 개선에 대하여 중점적으로 검토하였다. (1)은 전력기기 및 전선의 내단락용량 저감에 의한 코스트다운에 중요한 역할을 하게되며 (2)는 건전화선에 있어서 전력의 안정공급에 매우 밀접하게 관련되어 있다.

3. 3상지락고장시 한류기 도입효과

본 검토에서는 중성점 직접접지 계통을 대상으로 3상지락사고에 대하여 송전선의 중간에서 고장이 발생한 경우에 대하여 전력연구원에 설치되어 있는 RTDS/EMTDC 프로그램으로 모의하였다.

3.1 고장전류의 교류성분의 억제

그림 3에서 SFCL을 설치하지 않은 경우 고장점 F에 유입되는 고장전류의 파고치를 나타내었다. 이때

100ms에서 고장이 발생 직후 고장전류 50[kA]까지 상승하였다가 150ms(약 9주기)이후에는 29[kA]로 안정되는 것을 보여주고 있다.

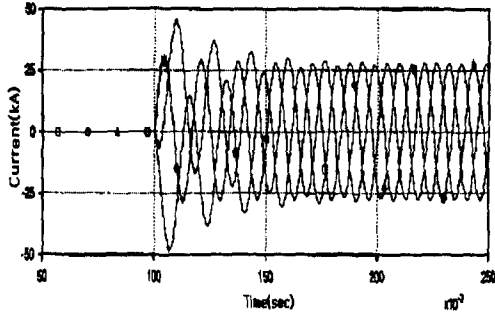
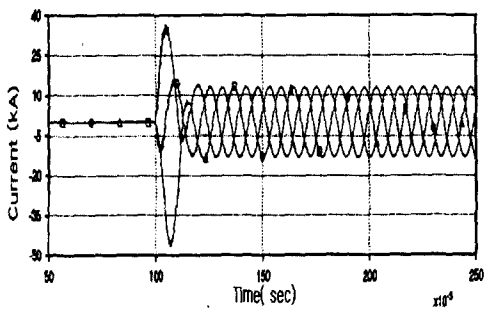
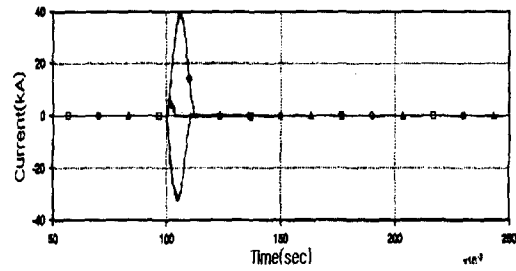


그림 3. 3선지락고장전류 파형 (한류기 없을시)
Fig. 3. Waveform of Three-Phase Ground fault current without SFCL

모델계통에서 차단기 후단에 초전도한류기를 적용한 경우 고장전류 제한능력을 파악하기 위하여 먼저 한류임피던스 $10[\Omega]$ 인 유도형과 저항형 SFCL을 도입한 결과 각각의 SFCL은 고장전류 억제효과가 매우 커서 현재의 차단기의 최대정격전류 $40[\text{kA}]$ 이하에서 한류 시킴을 알 수 있다(그림 4). 그림 5는 한류 임피던스가 $10[\Omega]$ 인 경우 고장전류의 실효치를 비교한 것으로 유도형 한류기가 한류효과 측면에서는 매우 유리함을 보여주고 있으며 한류임피던스가 증가함에 따라서 고장전류 억제 효과가 커짐을 알 수 있다.

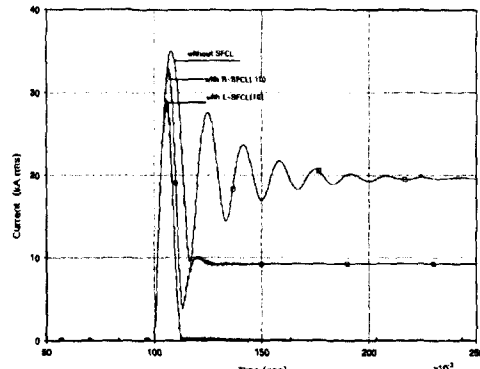


(a) Fault current waveform at the fault point(with R-SFCL)

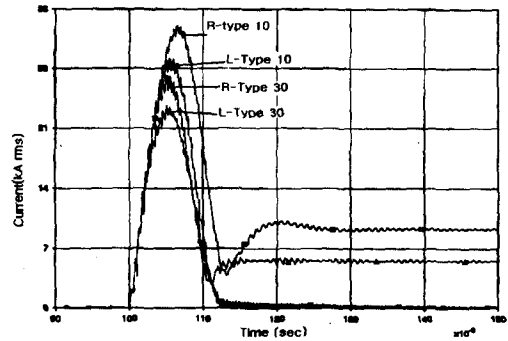


(b) Fault current waveform at the fault point(with L-SFCL)

그림 4. 3선지락시 고장전류의 파형 (SFCL 동작시)
Fig. 4. An example of fault current waveforms during SFCL operation in case of three line-to-ground fault (ILS=20kA, TSC=1ms, ZLF=10 Ω)



(a) Fault current AC components(with SFCL and without SFCL, ILS=20kA, TSC=1ms, ZLF=10 Ω)



(b) Comparison of fault current AC components(with SFCL and without SFCL(ILS=20kA, TSC=1ms)(R-type:ZLF=10 Ω ,30 Ω ,L-type:ZLF=10 Ω ,30 Ω)

그림 5. 3선지락고장시 한류효과의 비교한 교류성분
Fig. 5. Comparison for AC components of fault current to fault point in case of three line-to-ground fault

3.2 모선전압의 개선 효과

그림 6은 3선지락고장 발생시 한류기를 설치하지 않은 경우와 저항형과 유도형 한류기 동작이 완료된 후 부하모선(201)과 송전단 모선(101)의 선간전압의 실효치를 나타낸 것이다. SFCL을 설치하지 않은 경우 101모선은 실효치 0.79[pu], 201 부하모선은 0.76[pu]로 저하하는 것을 보여 주고 있다. 반면 저항형 SFCL을 설치한 경우의 101모선은 0.88[pu]이고 부하모선은 0.98[pu]로 높은 전압이 유지되었고 또한 유도형 SFCL을 설치한 경우도 101모선과 부하모선 선간전압을 각각 1.0[pu]로 나타냈다. 표 6은 이 검토 결과를 요약한 것이다.

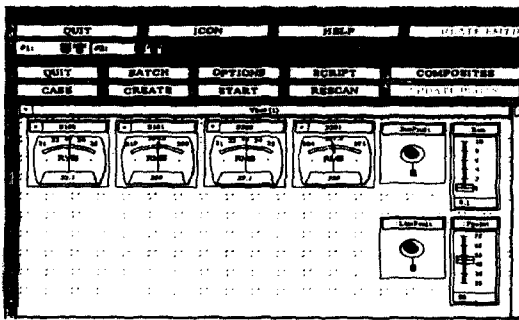


그림 6. 각 모선의 선간전압의 주 화면(SFCL 삽입 시)
Fig. 6. Main Screen for Line-to-line voltage (RMS value) of load bus 201 & 101 bus in case of three line-to ground fault (L-type SFCL) (I_{LS}=20kA, TSC =1ms)

표 6. 모선 전압의 비교 (한류기 삽입시)
Table. 6. Comparison of bus line-to-line voltage of without SFCL and with SFCL

구 분	부하모선 (201bus)[pu]	101 bus[pu]	비 고
without SFCL	0.79	0.76	I _{LS} =20kA Z _{LF} =10Ω
with SFCL	R type	0.88	I _{LS} =20kA Z _{LF} =10Ω
	L type	1.0	I _{LS} =20kA Z _{LF} =10Ω

이상과 같이 SFCL을 도입하는 경우 부하 및 사고 근방의 모선전압의 저하를 신속하게 회복시키는 것

을 알 수 있다. 모델 계통에서는 동일한 한류임피던스를 비교한 결과 유도형이 전압회복 능력이 우수한 것으로 나타났다. 이는 유도형 SFCL이 고장전류 한류효과가 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 한류임피던스가 클수록 전압회복능력이 우수한 것으로 나타났다.

4. 동작개시전류의 설정방법에 대한 검토

동작개시전류를 설정하는 데 있어서 SFCL의 동작 책무와 부동작책무를 “SFCL과 직렬로 접속된 CB의 차단용량한계를 초과하는 사고에 대해서는 확실히 동작하고 건전회선에 설치된 SFCL은 동작하지 않는다”로 정하였다. SFCL이 일단 동작하면 소비에너지와 SFCL의 회복을 위하여 CB가 차단되는 것이 요구된다. 이렇게 되면 SFCL이 회복되기까지 송전선이 분리되고 전력수송능력이 감소하게 된다. 소비 에너지 등을 다각적으로 검토하여 SFCL이 짧은 시간에 회복되면 CB의 차단이 불필요하게 되고 이 부동작 책무는 완화되지만 이 경우 SFCL의 동작조건에 대하여 기기자체 및 계통과 관련된 심도 있는 검토가 필요하다. 그림 7은 고장점에서 3선지락사고가 발생한 후 건전회선측전류의 파고치가 5.0[kA]까지 흐르는 것을 보여주고 있다.

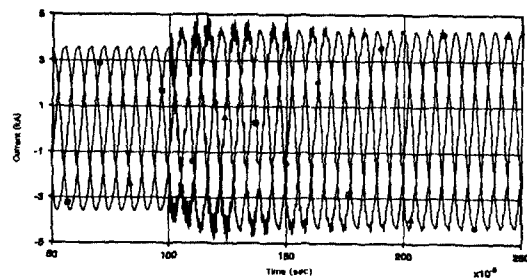


그림 7. 3선지락고장시 건전회선로 전류 파형
Fig. 7. Current waveforms of the sound line in case of three line-to-line ground fault

그림 8는 그림 7에서 구한 건전상의 최대전류를 토대로 동작개시전류 설정가능범위를 나타낸 것이다. 즉 동작개시전류 하한치는 과도직류분전류를 고려한 건전회선에 흐르는 전류 순시치의 최대치로 하였으

며 설정 상한치는 차단기의 차단용량이하로 하였다. 이때 SFCL은 전류의 순시치에서 동작하는 것을 고려해야 하기 때문에 전류분포는 사고 종류 및 사고 발생 위상을 변화 시켜 구할 필요가 있지만 여기서는 3선지락사고를 대상으로 구하였다.

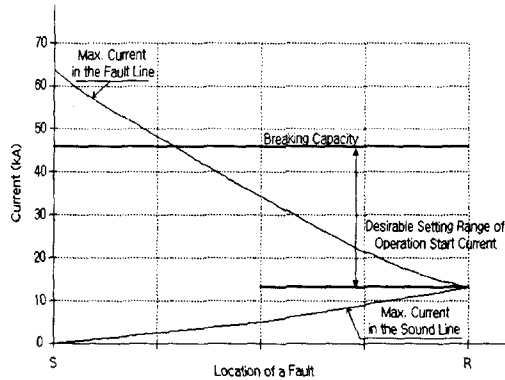


그림 8. SFCL의 동작개시전류 설정방법
Fig. 8. Setting method of operation start current of SFCL

5. 결 론

본 연구에서 345[kV] 송전계통에서 발생하는 3선 지락사고를 상정하여 저항형과 유도형 SFCL의 도입에 따른 고장전류 억제효과 모션전압저하 억제 및 SFCL의 파라메타 등에 관하여 2회선 1기 무한대 모델전력계통에서 한류기의 도입효과를 RTDS/EMTDC 프로그램을 사용하여 정량적으로 검토하였다. 본 연구에서 얻은 중요한 결론은 다음과 같다.

(1) 이 모델 계통에서 SFCL의 고장전류 억제효과가 현저했으며 유도형 SFCL이 저항형 SFCL보다 한류효과가 더 큰 것(본 모델계통 : 약 12%)을 확인하였다. 이 경우에 한류 임피던스가 크면 고장전류억제 효과도 우수하였다.

(2) 부하모션 및 송전모션에서의 2종류의 SFCL이 3선지락 고장시 전압회복 능력이 우수했으며 유도형 SFCL(한류임피던스 : 10Ω)은 사고발생 후 반주기후 정상전압이 회복되는 것을 확인하였으며 저항형 SFCL도 부하모션에서 반주기후 부하모션이 0.88pu로 회복되었다. 또한 한류임피던스가 클수록 모션전압 회복 능력이 우수하였다.

(3) 동작개시전류 하한 설정범위는 건전상의 1회

선 최대전류의 순시값의 (13kA)이상(여유고려), 상한 설정치는 차단기의 차단능력이하에서 설정하는 것이 바람직하며 이는 SFCL의 종류, 파라메타의 특성 및 계통과의 관련성 등을 심도 있게 검토해야 한다.

또한 본 연구에서는 전이형SFCL을 간략화 하여 3선지락고장에 대하여 2종류의 한류기에 대하여 파라메타를 중심으로 검토하였지만 현재 개발중인 비전이형 SFCL 등 다양한 SFCL의 비선형 모델을 개발하고 이를 사용한 계통도입효과(과도안정도 포함) 및 SFCL의 사양결정방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 다른 초전도 기기모델 개발을 기초로 초전도전력시스템과 하이브리드시스템에서의 다각적인 계통도입효과에 대한 분석도 병행하여야 할 것이다.

References

- [1] Young-Sun, Kim et al., "Investigation for Installing 345kV Serial Reactor for Limiting Fault Current of Transmission Power System", Electric Journal, pp.37-45, 2000, 9.
- [2] S. Sugimoto et al., "Principle and Characteristics of a fault Current Limiter with Series Compensation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 842-847, 1996.
- [3] P. G Slade et al., "The Utility Requirements for a Distribution Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 507-515, 1992.
- [4] Technoba, "The Study of Total System for Development of Applied Superconductivity Technology", 1994 New Sunshine Planning Report, 1995.
- [5] ELung et al., "Design & Development of a 15kV, 20 kA HTS fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 832-835, 2000.
- [6] EM Lung, "Superconducting Fault Current Limiter", IEEE power Engineering Review, pp 15-30, August 2000.
- [7] H. Kameda et al., "Setting Method of Specific Parameter of a Superconducting Fault Current limiter Considering the Operation of Power System protection", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 1355-1360, 1999.
- [8] L. Salasoo et al., "Comparison of Superconducting Fault Limiter concepts in Electric Utility Application", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 5, No. 2, pp 1079 - 1082, June 1995.
- [9] B.Dutoit et al., "A Nonlinear Model of Silver Sheathed Bi(2223) High Temperature Superconducting Tape", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp 294-297, 1997.
- [10] R.A Weller et al., "Computer Modelling of Superconducting Film Type Fault Current Limiters", IEEE Tans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.1377-1380, 1999.

- [11] T. Ise et al., "Reduction of influence and Current Rating of the Coil and Enhancement of fault Current Limiting Capacity of a Rectifier Type Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.1377-1380, 1999.
- [12] T. Satoh et al., "Three-Phase Fault Current Limiter with One DC S/N Transition Element", IEEE Trans. AS, Vol. 11, No. 1, pp 2398-2401, 2001.
- [13] P. Tixador, "Superconducting Current Limiters-Some Comparison and Influential Parameters", Principle and Previous Studies", IEEE Trans. AS, Vol. 4, No. 4, pp. 190-197.2001.
- [13] P. Tixador, "Superconducting Current Limiters-Some Comparison and Influential Parameters", Principle and Previous Studies", IEEE Trans. AS, Vol. 4, No. 4, pp. 190-197.2001.
- [14] T. Matsumura et al., "Design Guideline of Flux-Lock Type HTS Fault Current limiter for Power System Application", IEEE Trans. AS, Vol. 11, No. 1, pp. 1956-1959, 2001.
- [15] T. Hoshino et al., "Recovery Time of Superconducting Non-Inductive Reactor Type Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp.2403-2406, 1996.
- [16] N. Hayakawa et al., "A System Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with the Function of Fault Current Suppression and System Stability Improvement", IEEE Trans. AS, Vol. 11, No. 1, pp. 1936-1939, 2001.
- [17] M. Yamaguchi et al., "A Study on One DC Reactor Type Three-Phase Current Limiter", T. IEE Japan, Vol. 119-B, No. 11, pp. 1166-1173, 1999.
- [19] L.S. Fleishman et al., "Design Consideration an Inductive High Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. AS, Vol. 3, No. 1, pp. 570-573, 1993.
- [20] V.D Pham et al., "Toward the SFCL", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No.2, pp. 801-808, 1991.
- [21] T. Hara et al., "Development of A New 6.6kV/1500A Class SFCL", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No.1, pp. 182-190, 1993.
- [22] M. Yamaguchi et al., "Performance of DC Reactor Type Fault Current Limiter Using High Temperature Superconducting Coil", IEEE Trans. AS, Vol. 9, No. 2, pp. 940-943, 1999.

◇ 저자소개 ◇

홍원표 (洪元杓)

1978년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1980~1993년 한국전력 전력연구원 선임연구원. 현재 한밭대학교 건축설비공학과 교수.

김용학 (金容鶴)

1994년 전남대 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 근무.

본 연구는 한밭대학교 연구개발비와 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 이 연구를 위하여 RTDS/EMTDC를 이용할 수 있도록 배려하고 기술적인 토의에 응해준 윤용범 부장님께 감사드립니다.