

유도형과 저항형 초전도한류기의 파라메타를 고려한 전력계통도입효과의 분석 및 고찰

홍원표^{*}, 김용학[§], 전영환[%], 이승학[&]
한밭대학교, 한전전력연구원, 전기연구원, 대덕대학

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

Hong, Won-Pyo^{*}, Kim, Yong-Hak[§], Chun, Yong-Hwan[%], Lee, Sung-Hak[&]
Hanbat national University of Technology, KEPRI of KEPCO[§], KERI[%], DaeDok Collage[&]

wphong@hanbat.ac.kr^{*}, kimyh@kepri.re.kr, yhchun@keri.re.kr, leeshak@ail.ddc.ac.kr

Abstract - Power systems are becoming larger and larger for meeting electric power demand. Therefore, the over-currents resulting from contingencies such short circuits are increasing higher. The Maximum short circuit current of modern power system is becoming so large that circuit breaker are 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.

1. 서 론

전력수요의 증가 및 고도정보사회의 진전으로 인하여 전력의 고밀도 대용량화 고품질화의 요구가 한층 높아지고 있다. 이를 대응하기 위하여 전력계통의 대규모화, 이를 구성하는 전력기기의 대용량화 또한 송전선 회선수의 증가가 불가피한 실정이다. 이와 같

은 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 차단능력을 초과하는 현상이 현재 나타나고 있으며 앞으로 더 증가할 것으로 예상된다[1]. 이와 같은 사태의 해결책의 하나로서 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 고임피던스를 발생해야 한다.
- (2) 한류특성의 동작점이 정확할 필요가 있다.
- (3) 동작속도가 빨라야한다(1cycle 이하)
- (4) 송전선의 사고제거를 위하여 통상 1초 이내에 재폐로 조치가 행해지기 위해서 사고제거 후 한류동작상태로부터 정상상태로 복귀해야 한다.
- (5) 연속되는 사고에 대해서도 대응할 수 있어야 한다.
- (6) 한류 동작시와 정상상태로의 복귀시 계통에 이상전압을 발생시키지 않아야 한다.

이와 같은 성능을 만족시키기 위하여 초전도용량 이용되는 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 초전도시스템에서도 요구되는 조건을 효과적으로 충족시킬 수 있는 유력한 기기이기 때문에 전력계통에서의 조기 적용이 확실시되고 있다. 특히 1990년도 후반에 고온 초전도체를 이용한 SFCL연구개발이 집중적으로 이루어졌으며 그 중요한 예로는 ABB사의 차폐코아형, GA사의 inductive/electronic 형, EA technology의 저항/유도형 및 Siemens사의 저항박막(resistive-thin-film) 형이 그 좋은 예이다[6]. 그러나 SFCL은 계통에 도입된다면 계통의 구성, 운용 및 보호 시스템에 현저한 변화를 주는 기기이기 때문에 계통관점에서 심도 있는 검토가 필요하다. 즉 다양한 시스템에서의 고장 전류억제효과의 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 이루어져야하나 현재 실용된 기기가 없고 지속적으로 개발연구가 진행되고 있다. 특히 [9]는 AC 손실을 고려한 Bi(2223)고온초전도 테이프샘플에 대하여 비선형모델개발을 시도한바 있으나 아직까지 초전도한류기의 열적, 전기적 및 기계적인 특성을 고려한 모델이 개발되어 있지 않다. 그러나 정확한 계통 해석을 위해서는 계통해석 시뮬레이션 tool을 고려한 상세한 비선형 모델[10]의 개발이 필요하다. 현재까지는 SFCL의 한류 소자인 저항과 유도형 리액터가 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 한류효과와의 비교 평가, 모션전압의 저하 억제 및 계통과 한류기의 파라메타와의 관련성에 대하여 검토한 중간 연구 결과이다.

2. 모델계통과 모의 조건

2.1. 모델계통

그림1은 검토대상인 모델전력계통을 표시한 것이다. 본 모델계통의 송전전압은 345kV, 주파수는 60Hz이다. 평상시 발전기의 G_1 및 G_2 는 각각 5220MVA를 발전하는 대용량 발전기와 모션 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 3

상단락 고장전류는 50kA로 그림 1은 대도시 지역에 전력을 공급하는 것으로 집약하여 단락정류가 현재 차단기의 최대정격차단전류치 40kA를 초과하도록 모델화 한 것이다.

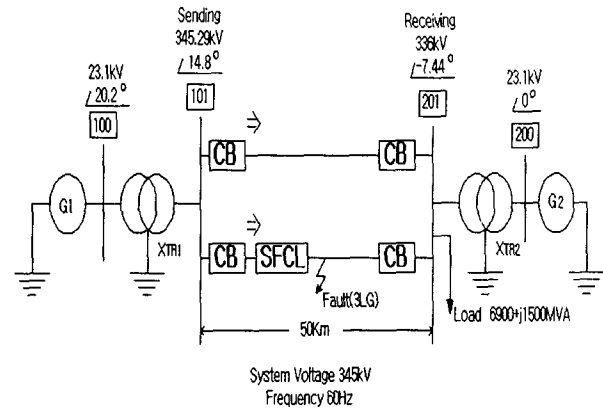


Fig. 1. Model power system

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 1은 송전선로 정수를 나타낸 것이다.

Table 1. Transmission line constants

	정상임피던스
저항[Ω /km/회로]	0.06759
인덕턴스[mH/km/회로]	1.605
정전용량[μ F/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 저항형 SFCL(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 I_{LS} 이상에 도달하면 초전도소자는 그림 2와 같이 높은 저항을 발생시킨다. 이 때문에 고장전류는 병렬로 접속된 한류소

자로 흐른다. 고장전류는 병렬로 접속된 한류소자로 전류되어 흐르며 한류소자와 초전도소자와의 합성임피던스(한류임피던스)인 한류임피던스 Z_{LF} 에 의하여 한류된다. 여기서 한류기의 동작개시전류치로는 초전도코일이 S/N으로 전이되어 한류동작을 개시하는 전류치를 지칭한다.

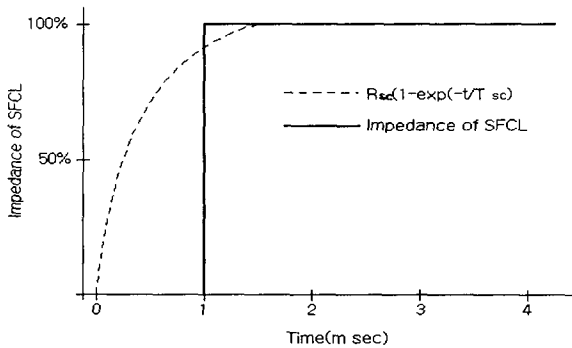


Fig. 2. Variable resistance pattern of a superconducting coil under quench

전류가 동작개시전류이하로 감소해도 초전도소자는 초전도상태로 복귀하지 않고 한류동작을 계속하는 것으로 하였다. 초전도소자의 S/N 전이 후 상전도저항의 발생과정은 그림 2에 표시한 바와 같이 $R_{sc}(1-\exp(-t/T_{sc}))$ 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 2에 나타내었다.

Table. 2. Operating parameters of SFCL

고장종류	3상 지락
FCL의 종류	저항형, 유도형
초전도 개시전류치(I_{LS})	20kA
초전도소자의 상전도저항치 $R_{sc}(\Omega)$	100
초전도소자의 저항발생시정수 $T_{sc}(ms)$	1, 5
한류임피던스의 크기	10, 30 Ω

2.3 동작개시전류치

SFCL의 동작개시전류의 상정은 계통운용에서 매우 중요하다. 정격전류 I_N 에 대하여 한류 동작개시전류 I_{LS} 의 비를 k 라하고 시스템운영상의 여유도라 한다.

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

여기서 k 가 1에 가까우면 과부하에 의한 통전전류가 순시적으로 정격전류를 초과하기가 쉬워 SFCL이 과민반응 하고, 한류기가 동작을 개시하게 된다. 반면에 k 가 크게되면 정격치보다도 큰 통전 전류가 시스템에 연속 통전해도 SFCL이 한류동작을 개시하지 않는다. 따라서 k 의 값을 어느 정도 설정할 것인가 앞으로 전체시스템운영에 중요한 문제가 된다.

또한 변압기 여자돌입전류 I_{rush} 에 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 여자돌입전류 낮게 하여 SFCL의 여자돌입전류에 의한 동작을 방지해야 한다. 이와 같은 초전도전력시스템에 있어서는 초전도선의 켄치를 방지하기 위하여 각 기기의 켄치전류레벨에 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 20kA를 동작개시전류치 I_{LS} 로 선정하였다. 이는 변압기의 돌입전류이상이어야 하며 차단기의 정격차단전류의 과고치 50kA이기 때문에 상한 설정치는 50kA이하에서 선정되어야 한다.

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 교류성분 억제) 및 (2) 모선에서의 저압 저하의 개선에 대하여 중점적으로 검토하였다. (1)은 전력기기 및 전선의 내단락용량 저감에 의한 코스트다운에 중요한 역할을 할게되며 (2)는 건전회선에 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. 그림 3은 RTDS/EMTDC로 모의한 주 모니터화면을 나타낸 것으로 고장 후 아날로그 게이지에서도 101(B101)모선과 202(B201)모선의 전압이 각각 282kVrms와 256kVrms로 나타났다.

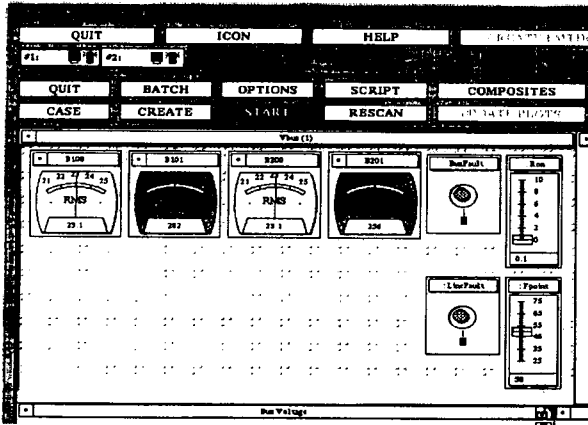


Fig. 3. Main screen of RTDS/EMTDC for fault simulation without SFCL

3.1 고장전류의 교류성분의 억제

그림 4에서 SFCL을 설치하지 않은 경우 고장점 F에 유입되는 고장전류의 파고치를 나타내었다. 이때 100ms에서 고장이 발생 직후 고장전류 50kA까지 상승하였다가 150ms(약 9주기)이후에는 29kA로 안정되는 것을 보여주고 있다.

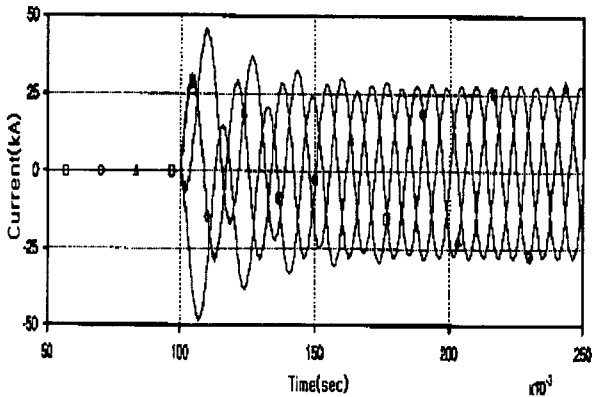
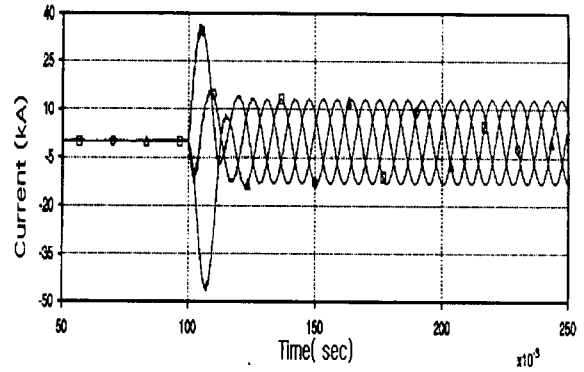
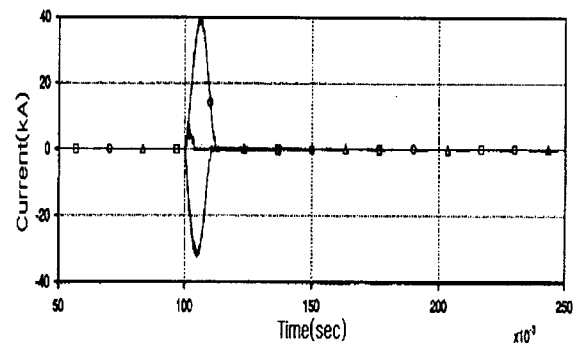


Fig. 4. Three-phase ground fault current without SFCL

모델계통에서 차단기 후단에 초전도한류기를 적용한 경우 고장전류 제한능력을 파악하기 위하여 먼저 한류임피던스 10[Ω]인 유도형과 저항형 SFCL을 도입한 결과 각각의 SFCL은 고장전류 억제효과가 매우 커서 현재의 차단기의 최대정격 전류 40kA이하에서 한류 시킴을 알 수 있다(그림 5). 그림 6은 한류 임피던스가 10[Ω]인 경우 고장전류의 실효치를 비교한 것으로 유도형 한류기가 한류효과 측면에서는 매우 유리함을 보여주고 있으며 한류임피던스가 증가함에 따라서 고장전류 억제 효과가 커짐을 알 수 있다.

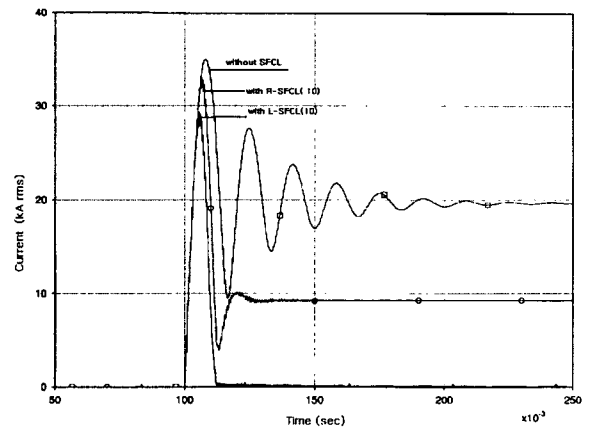


(a) Fault current waveform at the fault point(with R-SFCL)

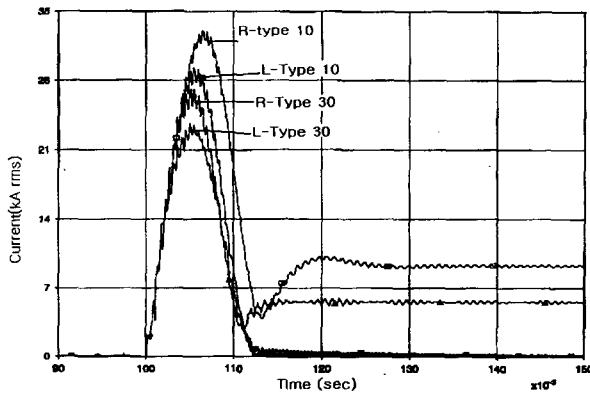


(b) Fault current waveform at the fault point(with L-SFCL)

Fig. 5. An example of fault current waveforms during SFCL operation in case of three line-to-ground fault ($I_{LS}=20kA$, $T_{SC}=1ms$, $Z_{LF}=10\Omega$)



(a) Fault current AC components (with SFCL and without SFCL, $I_{LS}=20kA$, $T_{SC}=1ms$, $Z_{LF}=10\Omega$)



(b) Comparison of fault current AC components (with SFCL and without SFCL) ($I_{LS}=20\text{kA}$, $T_{SC}=1\text{ms}$)
(R-type: $Z_{LF}=10\Omega, 30\Omega$, L-type: $Z_{LF}=10\Omega, 30\Omega$)

Fig. 6. Comparison for AC components of fault current to fault point in case of three line-to-ground fault

3.2 모선전압의 개선 효과

그림 7은 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 0.79pu, 201 부하모선은 0.76pu로 저하하는 것을 보여주고 있다. 반면 저항형 SFCL을 설치한 경우의 101모선은 0.88pu이고 부하모선은 0.98pu로 높은 전압이 유지되었고 또한 유도형 SFCL을 설치한 경우에도 101모선과 부하모선 선간전압을 각각 1.0pu로 나타냈다. 표3은 이 검토 결과를 요약한 것이다.

Table 3. Comparison of bus line-to-line voltage of without SFCL and with SFCL

	부하모선 (201bus)[pu]	101 bus[pu]	비고
without SFCL	0.79	0.76	$I_{LS}=20\text{kAZ}$ $L_F=10\Omega$
with SFCL	R type	0.88	$I_{LS}=20\text{kAZ}$ $L_F=10\Omega$
	L type	1.0	$I_{LS}=20\text{kAZ}$ $L_F=10\Omega$

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

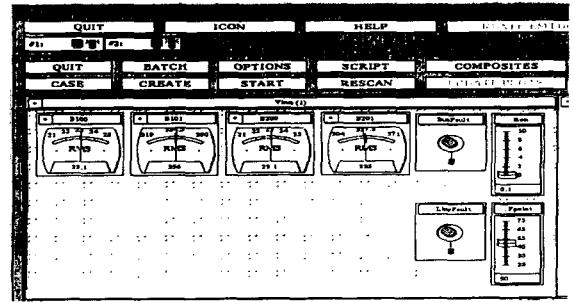


Fig. 7. Line-to-line voltage(RMS value) of load bus 201 & 101 bus in case of three line-to-ground fault(L-type SFCL) ($I_{LS}=20\text{kA}$, $T_{SC}=1\text{ms}$)

4. 동작개시전류의 설정방법에 대한 검토

동작개시전류를 설정하는 데 있어서 SFCL의 동작책무와 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 8은 고장점에서 3선지락사고가 발생한 후 건전회선측전류의 파고치가 5.0[kA]까지 흐르는 것을 보여주고 있다. 그림 9는 그림 8에서 구한 건전상의 최대전류를 토대로 동작개시전류 설정가능범위를 나타낸 것이다. 즉 동작개시전류 하한치는 과도직류분전류를 고려한 건전회선에 흐르는 전류 순시치의 최대치로 하였으며 설정 상한치는 차단기의 차단용량이하로 하였다. 이때 SFCL은 전류의 순시치에서 동작하는 것을 고려해야 하기 때문에 전류분포는 사고 종류 및 사고발생 위상을 변화 시켜 구할 필요가 있지만 여기서는 3선지락사고를 대상으로 구하였다.

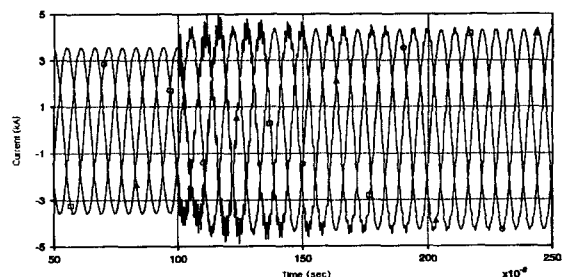


Fig. 8. Current waveforms of the sound line in case of three line-to-line ground fault

[참 고 문 헌]

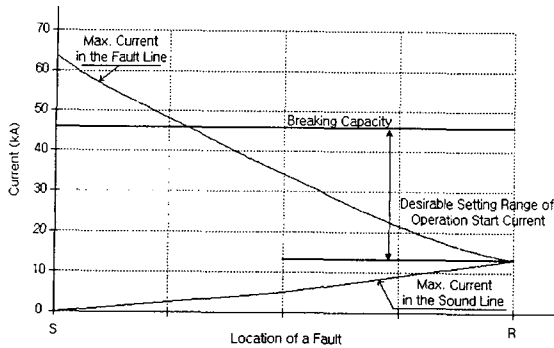


Fig. 9. Setting method of operation start current of SFCL

5. 결 론

본 연구에서 345kV 송전계통에서 발생하는 3선지락사고를 상정하여 저항형과 유도형 SFCL의 도입에 따른 고장전류 억제효과 모션전압저하 억제 및 SFCL의 파라미터 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 억제 효과가 현저했으며 유도형 SFCL이 저항형 SFCL보다 한류효과가 더 큰 것(본 모델계통 : 약 12%)을 확인하였다. 이 경우 한류 임피던스가 크면 고장전류억제효과도 우수하였다.

(2) 부하모선 및 송전모선에서의 2종류의 SFCL이 3선지락 고장시 전압회복 능력이 우수했으며 유도형 SFCL(한류임피던스 : 10Ω)은 사고발생 후 반주기후 정상전압이 회복되는 것을 확인하였으며 저항형SFCL도 부하모선에서 반주기후 부하모선이 0.88pu로 회복되었다. 또한 한류 임피던스가 클수록 모션전압 회복 능력이 우수하였다.

(3) 동작개시전류 하한 설정범위는 건전상의 1회선 최대전류의 순시값의 (13kA)이상(여유고려), 상한 설정치는 차단기의 차단능력이하에서 설정하는 것이 바람직하며 이는 SFCL의 종류, 파라미터의 특성 및 계통과의 관련성 등을 심도 있게 검토해야 한다.

또한 본 연구에서는 전이형SFCL을 간략화 하여 3선지락사고에 대하여 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.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

- [1] 김영선, 이강완, " 고장전류저감을 위한 345kV 직렬리액터 설치검토", pp.37-45, 2000, 9월.
- [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, " 超電導電力應用技術開發Total System 等の研究", 1994年 New Sunshine計劃 報告書, 1995.
- [5] E.Lung 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] E.M 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 Teans. 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 Tans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.1377-1380, 1999.