

An Analysis of Recloser Operation According to Recovery Characteristics of Superconducting Fault Current Limiter

이 상 봉[†] · 김 철 환* · 김 규 호** · 김 재 철*** · 현 옥 배[§]
 (Sang-Bong Rhee · Chul-Hwan Kim · Kyu-Ho Kim · Jae-Chul Kim · Ok-Bae Hyun)

Abstract - For proper application and operation of a SFCL(Superconducting Fault Current Limiter) in distribution systems, the prior investigation of fundamental characteristics and its effects analysis to the systems are very important. A point of view in coordination with recloser in distribution systems, characteristic about quenching and recovering of SFCL should be studied. Especially, its detailed study of recovery characteristic is particularly important to avoid conflict between the SFCL and the recloser. In this paper, the resistive type SFCL and recloser, which used in distribution system, were implemented using EMTP/ATPDraw and MODELS language. To analyze the recovery characteristics of SFCL according to recloser operation in distribution systems, case studies have been simulated and investigated.

Key Words : Electro-Magnetic Transients Program(EMTP), Recloser, Superconducting Fault Current Limiter, Recovery characteristics

1. 서 론

초전도 한류기의 고장전류 제한 동작은 한류기에 사용된 초전도체의 초전도 상태에서 상전도체 전이 시 나타나는 퀸칭(quenching) 특성, 상전도 상태에서 초전도 상태로의 복귀 시 회복(recovery) 특성에 의해 결정된다. 이러한 특성의 변화에 따라 고장 시 계통의 제한전류 특성 또한 변하며 초전도 한류기가 적용된 계통에서의 영향도 다르게 나타나게 된다 [1].

초전도 한류기의 퀸칭, 회복에 따른 기존의 연구는 미흡한 상태이며 초전도 한류기의 모델링 및 동작특성에 관한 것이 주로 연구되어져 왔다. 특히, 일반적 초전도 한류기는 초전도체에서 상전도체로 변화되는 퀸칭 시간은 상당히 짧은 특성을 보이지만 상전도체에서 초전도체로의 변화는 냉각요소 기술에 의해 전이 시간이 결정되며 퀸칭 시 보다 상당히 긴 시간을 필요로 한 실정이다.

초전도 한류기의 동작 특성 분석을 위해서는 계통내의 다른 보호기기 및 초전도 한류기의 설치 주 목적인 전류 제한 특성을 면밀히 검토하여야 하며 퀸칭, 회복 시간과 관련한 보호기기 협조를 위해 각각의 영향을 상세히 분석할 필요가

있다. 특히, 초전도 한류기의 회복시간(recovery time)의 경우 배전계통에서 주 보호기기로 사용되는 재폐로 차단기와 재폐로 시간을 반드시 협조해야 할 필요성이 있으며 그 외의 계통내 타 보호기기의 영향에 관한 연구 역시 미흡한 상태이다. 따라서, 배전계통에 초전도 한류기를 적용하기 위한 선행연구로 초전도 한류기의 회복에 따른 계통영향 분석이 필요하다[2].

재폐로 차단기는 배전계통에서의 가장 중요한 보호기기이며 특히, 계통의 사고가 거의 대부분 일시사고인 점을 고려하면 가장 효과적인 보호기기이다. 따라서, 초전도 한류기의 계통 적용시 계통의 보호협조를 위해서는 우선적으로 재폐로 차단기와 보호협조 분석이 우선시 되고 있으며 그리고 두 기기 간의 정확한 동작 분석과 다양한 계통 연구가 필요한 실정이다[3].

본 논문에서는 향후 배전계통에서의 초전도 한류기 적용시 발생할 수 있는 문제점을 확인하고자 배전계통에서의 중요 보호기기인 재폐로 차단기와 상호 영향을 초전도 한류기의 회복특성을 중심으로 모의하고 분석 하였다. 신뢰성 있는 정확한 계통 영향 분석을 위해 과도해석 프로그램인 Electro-Magnetic Transients Program(EMTP)을 사용하였으며 초전도 한류기 그리고 재폐로 차단기의 동작특성을 구현하기 위하여 EMTP내의 프로그래밍 언어인 MODELS를 이용 하였다.

따라서, 본 논문에서는 계통의 초전도 한류기 적용을 위해 비대칭 특성을 갖는 고장전류에 대한 초전도 한류기의 동작특성을 분석하였다. 즉, 다양한 계통 사고에 대해 제한된 임피던스를 갖는 초전도 한류기의 전류제한 능력을 검토 하였으며 이를 위해 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)를 이용해 모의시험하고 검증하였다.

[†] 교신저자, 정회원 : 성균관대 정보통신공학부 전력IT센터
 선임연구원 공박

E-mail : rrsd@naver.com

* 펠로우회원 : 성균관대 정보통신공학부 교수 · 공박

** 정 회원 : 한경대학교 전기공학과 조교수 · 공박

*** 펠로우회원 : 숭실대 공대 전기공학부 교수 · 공박

§ 정 회원 : 한전 전력연구원 수석연구원 · 공박

접수일자 : 2008년 12월 30일

최종완료 : 2009년 4월 11일

2. 초전도 한류기 동작 특성

2.1 초전도 한류기

본 논문에서는 초전도 한류기중 저항형 (resistive type SFCL)을 고려하였다. 저항형 초전도 한류기는 계통의 사고 발생시 사고전류의 증가로 인한 초전도체의 온도 상승으로 저항값을 갖게 되어 상전도체로의 전이를 시작한다. 초전도체가 상전도체화 되는 특성을 켄칭 특성이라 하고 반대의 경우를 회복특성이라 한다. 일반적으로 초전도 한류기는 켄칭 완료 시간이 회복 완료시간 보다 상당히 짧은 특성을 가지므로 계통내의 타 보호기기와의 협조에 있어서는 회복시간의 영향이 중요한 고려 사항으로 인식되고 있다. 따라서 본 연구에서는 회복특성과 재폐로 차단기의 재폐로 시간과의 영향을 분석하였다.

2.2 초전도 한류기의 회복특성

초전도 한류기의 회복 특성을 결정하는 중요 요소는 상도체화 되어 있는 도체를 다시 초전도체로 변화시키기 위한 냉각 요소에 관한 제특성이며 일반적으로 켄칭시간 보다 상당히 길다고 알려져 있다. 초전도 한류기의 배전 계통 적용에 있어서 회복 특성의 영향 분석이 중요하며 이는 기존 보호기기인 재폐로 차단기등의 재폐로시간과 같은 동작특성까지 고려해야 하기 때문이다. 즉, 회복시간이 재폐로시간 보다 늦어질 경우 초전도체로 완전히 전이하지 못해 초전도 한류기가 임피던스를 갖고 있는 경우 정상 전류까지 제한하게 됨을 예상 할 수 있다.

본 논문에서의 초전도 한류기 회복 특성은 그림 1과 같이 단계별 회복 특성을 갖도록 모델링 하였다[4].

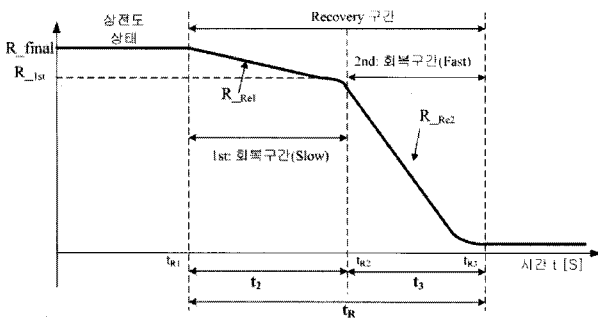


그림 1 초전도 한류기의 회복특성

Fig. 1 A Recovery Characteristic of SFCL

따라서, 초전도 한류기의 전체 회복특성 저항식 $R(t)$ 는 켄칭 특성에서의 수식화와 같이 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$R(t) ; \begin{cases} R_{final} & : t < t_{R1} \\ R_{-Re1} = R_{final} e^{-Bt} & : t_{R1} \leq t \leq t_{R2} \\ R_{-Re2} = R_{1st} e^{-Ct} & : t_{R2} \leq t \leq t_{R3} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, B, C, R_{-Re1} , 그리고 R_{-Re2} 는 회복구간 중 각각 1st, 2nd 구간의 시간을 결정하는 상수, 그리고 초전도체의

저항이다. 이때, 초전도체의 전체 회복 시간은 $t_R(t_2 + t_3)$ 이다.

그림 2는 임의의 사고에 대한 초전도 한류기 동작 시 EMTP로 모델링 된 초전도체의 한류 임피던스인 저항 출력 결과이다. 고장전류 관별 후 초전도 한류기에 설정된 값은 켄칭 시간 10[ms], 회복 시간 0.3[s] 이며, 2단계 회복 특성의 각 회복 단계별 시간은 전체 회복시간을 동일하게 분배해 설정 하였고 한류 저항은 5[Ω]이다. 회복특성 모델링 결과 초전도 한류기가 식 (1)에 따라 정확히 동작함을 확인할 수 있다.

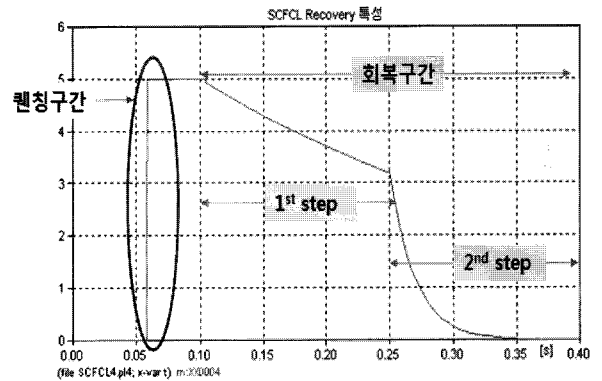


그림 2 초전도 한류기 저항 특성

Fig. 2 A resistive characteristic of SFCL

3. 초전도 한류기 및 재폐로 차단기 동작 특성

재폐로 차단기는 계통의 일시 고장을 제거하고자 하는 목적으로 사용되며 이를 위해 일정 시퀀스 동작에 따른 재폐로 시간을 갖는다. 이때, 재폐로 시간은 계통의 상황과 조건에 의해 결정되는데 한국전력공사의 배전운용 규칙에 의하면 1차 재폐로 시간은 0.5초, 2차는 15초로 되어 있다. 따라서 계통의 고장 검출시 재폐로 차단기는 1차 순시 트립되고 0.5초 지연 후 자동 투입된다. 이때, 고장의 지속 여부를 판단하여 2차 트립 여부를 결정하며 이러한 재폐로 횟수는 지중선로 포함 여부에 따라 결정되고 배전계통의 경우 2회 재폐로를 수행한다[5].

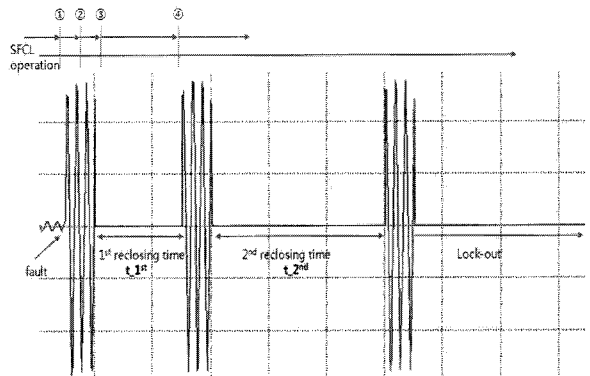


그림 3 재폐로 차단기 및 초전도 한류기 동작

Fig. 3 A SFCL and Recloser Operation

그림 3은 재폐로 임의의 사고시간(t_{fault})에서 발생한 고장 전류에 대한 재폐로 차단기와 초전도 한류기의 동작을 나타낸 그림이다. 여기서 재폐로 차단기와 초전도 한류기의 동작 순서는 표 1과 같다.

표 1 그림 3에서의 구간별 동작 내용
Table 1 Time period and operation in Fig. 3

구간	동작상태	시간
①	고장발생	t_F
①-②	SFCL 켜짐타임	t_Q
②-③	상전도 상태	$t_{N.S}$
③	재폐로에 의한 고장제거	t_C
③-④	회복타임	t_R

초전도 한류기와 재폐로 차단기의 보호협조에서 중요한 문제점은 1차 재폐로 시간 t_{1st} [s]이며 그림 3에서와 같이 이 시간보다 초전도 한류기의 회복시간(t_R)이 긴 경우 계통에 문제점을 야기하게 된다. 즉, 재폐로 동작에 의한 고장제거 순간(t_C)에서부터 초전도 한류기는 냉각 능력에 따라 결정된 자체 회복시간 동안 초전도체로의 전이를 시작하며 이때 상전도체로서 갖고 있던 저항 값은 점점 감소하고 회복이 종료되는 시점에서 저항은 완전히 소멸되어 영의 값을 갖게 된다. 결국, 재폐로 시간보다 초전도 한류기의 회복시간이 긴 경우 ($t_R > t_{1st}$)에서는 완전히 회복되지 못한 초전도체의 저항으로 인해 계통의 영구고장 시 재폐로 차단기가 투입되는 경우 전류를 제한하는 상황이 발생하게 된다.

이때 초전도 한류기의 회복과정이 거의 끝단계라고 하면 소멸되는 작은 저항 값으로 계통에 큰 영향이 없을 것으로 판단되나 회복과정 중 중간 부분에서 재폐로 차단기가 투입된 경우 원치 않는 전류 제한과 심지어 재폐로 차단기의 2차 동작에서의 오픈 상태에서 초전도 한류기가 제대로 켜짐하지 못해 전류제한 특성을 상실하는 최악의 경우도 예상할 수 있다.

본 논문에서는 이와 같이 재폐로 차단기의 1차 재폐로 시간과 초전도 한류기의 회복시간에 관한 상관관계를 통해 계통의 영향을 사례연구를 통해 분석하였다.

4. 사례 연구

4.1 초전도 한류기 및 재폐로 차단기 모델링

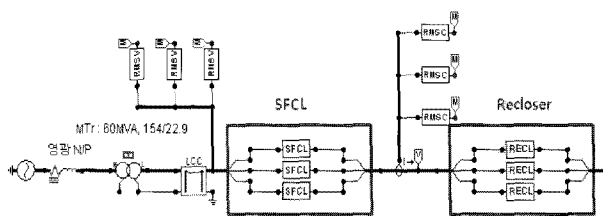


그림 4 초전도 한류기 및 재폐로 차단기 구현
Fig. 4 Implementation of SFCL and Recloser

초전도 한류기의 회복특성에 따른 재폐로 동작 분석

사례연구를 위해 그림 4에서와 같이 초전도 한류기 및 재폐로 차단기를 EMTP/ ATPDraw와 MODELS를 이용하여 sub network로 구현하였다.

초전도 한류기는 식 (1)과 참고문헌 [6]을 이용해 켜짐, 회복 특성을 갖도록 구현하였고 재폐로 차단기는 배전용인 2회 재폐로 동작을 갖도록 구현하였다. 고장이 발생한 경우 순시동작으로 차단시간을 결정하여 트립하고 0.5[s]후에 1차 재폐로 동작, 15[s]후에 2차 재폐로 동작을 하도록 하였다. 그림 5는 현재 우리나라 배전계통에 운용중인 재폐로 차단기의 동작 특성을 나타낸다[5].

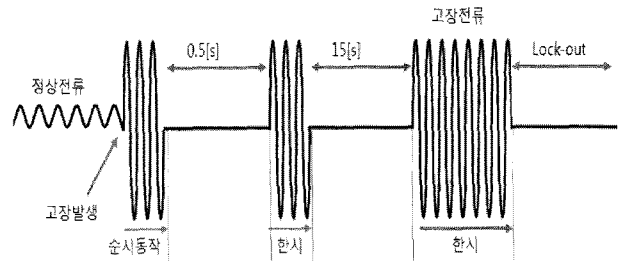


그림 5 재폐로 차단기 동작
Fig. 5 Operation scheme of Recloser

그림 6은 EMTP/ ATPDraw로 구현된 초전도 한류기와 재폐로 차단기의 입력부분을 나타낸다.

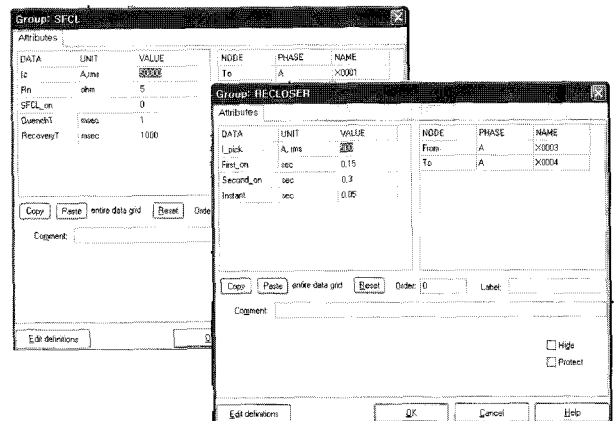


그림 6 구현된 초전도 한류기 및 재폐로 차단기 입력창
Fig. 6 Input window of Implemented SFCL and Recloser

4.2 모의 계통

초전도 한류기를 적용하기 위한 배전계통은 그림 7과 같이 사용된 데이터는 다음과 같다.

- 주변압기 : 154/22.9[kV-Y], 40/60[MVA], %Z=20, Delta-Wye
- 선로(Z_{L1}) : 4[km], $Z_{L1} = 0.217 + j0.447[\Omega/km]$

- 선로(Z_{L2}) : 4[km], $Z_{L2} = 0.294 + j0.513[\Omega/km]$
- 부하 : Load 1 ($18 + j8.9$ [MVA])
Load 2 ($9 + j4.7$ [MVA])

일반적 배전계통인 방사상 계통에서, 초전도 한류기는 주 변압기 2차측에 설치하여 사고 발생시 고장 전류를 제한하도록 하였으며 저항형으로 모델링하였고 재폐로 차단기는 초전도 한류기 다음에 설치하였다. 계통사고는 feeder 2 부하측에서 1선지락의 일시고장을 모의하였고 재폐로 차단기의 1차 트립시간 중에 고장을 제거하였다. 고장점에서의 고장저항은 $0[\Omega]$ 으로 가정하였다.

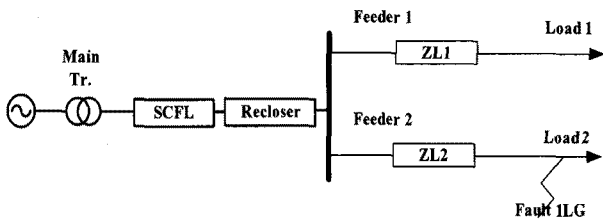


그림 7 모의시험 배전계통
Fig. 7 Test Distribution System

4.3 모의 결과

초전도 한류기 및 재폐로 차단기의 상호 동작을 확인하고자 다음과 같은 경우에 대하여 모의 하였다. 계통의 일시고장에 대하여, 초전도 한류기의 회복시간 설정에 따른 재폐로 차단기동작에 의한 계통 영향과 계통의 영구고장 시 재폐로 차단기의 한시동작 영향을 분석하였다.

일시고장

Case A : 1차 재폐로 시간(0.5[s])이 초전도 한류기의 회복시간(0.3[s]) 보다 긴 경우 (일시고장 : 1차재폐로시간 내 고장제거)

$$t_{1st}(0.5[s]) > t_R(0.3[s])$$

Case B : 1차 재폐로 시간(0.5[s])이 초전도 한류기의 회복시간(1.0[s]) 보다 짧은 경우 (일시고장 : 1차재폐로시간 내 고장제거)

$$t_{1st}(0.5[s]) > t_R(1.0[s])$$

영구고장

Case C : 1차 재폐로 시간(0.5[s])이 초전도 한류기의 회복시간(0.3[s]) 보다 긴 경우 (영구고장)

$$t_{1st}(0.5[s]) > t_R(0.3[s])$$

Case D : 1차 재폐로 시간(0.5[s])이 초전도 한류기의 회복시간(0.6[s]) 보다 짧은 경우 (영구고장)

$$t_{1st}(0.5[s]) > t_R(0.6[s])$$

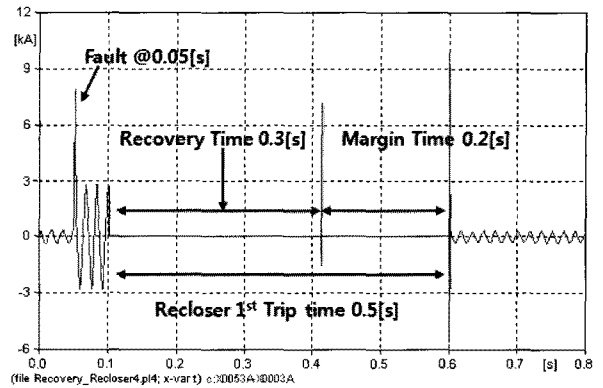


그림 8 Case A 결과
Fig. 8 Result of Case A

그림 8은 case A의 사례연구 결과이며 경우이며 초전도 한류기의 회복 완료 후 재폐로 차단기가 동작하므로 (margin time : 0.2[s] = 0.5 - 0.3) 재폐로 차단기의 재투입 후 정상 전류의 영향은 없게 된다. 그러나 그림 9에서와 같이 case B의 경우에 있어서는 초전도 한류기의 회복시간이 길어(1.0[s]) 초전도체로 회복되기 이전에 재폐로 차단기가 동작하여 고장이 제거되므로 정상운전 상태임에도 초전도 한류기의 저항값이 계통에 투입되는 결과를 확인할 수 있었다. 이때 잔존하는 초전도 한류기의 저항값에 의해 계통의 정상전류의 크기를 감소시키게 되며 이러한 문제는 초전도 한류기의 설계시 회복시간에 대한 신뢰성있는 결정 및 가능한 짧은 회복동작에 관한 보장이 필요함을 나타내고 있는 것이다.

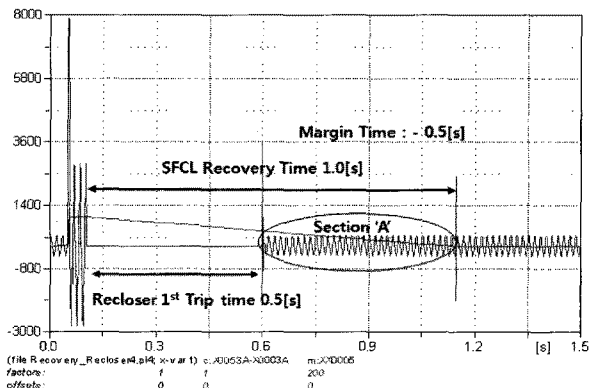


그림 9 Case B 결과
Fig. 9 Result of Case B

그림 10은 그림 9의 section A부분의 확대 그림이며 초전도 한류기의 회복 지연으로 정상전류의 제한이 발생함을 알 수 있다. 제한되는 전류의 값은 정상전류 대비 약 5% 미만이지만 초전도 한류기의 상전도시 최종 저항값이 커지면 제한값도 증가하게 됨을 예상 할 수 있고 또한, 초전도 한류기의 동작에 있어서 회복과정 중에 다시 켜짐모드로 진입이 어려운 경우 재폐로 차단기의 연속 동작이 초전도 한류기에 의해 오동작을 야기하게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 초전도 한류기의 회복시간과 관계된 재폐로 차단기의 상호 동작 영향을 확인하고 분석 하였다. 사례 연구 결과, 초전도 한류기의 회복시간은 재폐로 차단기의 1차 재폐로 시간보다 짧아야 정상적인 초전도 한류기의 동작이 가능함을 확인할 수 있었으며 그렇지 않은 경우 초전도 한류기의 계통에서 제거가 늦어져 정상전류도 제한됨을 알 수 있었다. 또한, 초전도 한류기의 물리적 특성으로 회복과정 도중에 다시 켜칭이 불가능할 경우에는 초전도 한류기 및 재폐로 차단기의 오동작이 가능함을 예상 할 수 있었다. 이러한 초전도 한류기의 오동작을 방지하기 위해서는 초전도체의 설계 시 재폐로 차단기와와의 협조를 위해 회복시간 결정에 신중할 필요가 있으며 특정 이유로 재폐로 시간 변화나 회복시간 변화가 발생할 경우 회복시간을 재폐로 시간보다 작게 재 설정하는 인터록회로나 보안 알고리즘이 필요 할 것으로 판단된다.

향후연구로는 재폐로 차단기 뿐만 아니라 과전류 차단기 등을 포함한 배전계통의 기타 중요 보호기기와의 자세한 보호 협조 그리고 초전도 한류기의 고장전류에 대한 세밀한 응답 특성등에 관한 검토와 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Lj. Kojovic, S. Hassler, "Application of Current Limiting Fuses in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997.
- [2] Alex Y. Wh, Yuexin Yin, "Fault-Current Limiter Applications in Medium- and High-Voltage Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 34, No. 1, Jan./Feb.,1998.
- [3] Michael Steurer, Klaus Frohlich, "CURRENT LIMITERS - STATE OF THE ART", Fourth Workshop & Conference on EHV Technology, July 1998.
- [4] H.-R. Kim, S.-W. Yim, S.-Y. Oh, O.-B. Hyun, "Analysis on recovery inAu/YBCO thin film meander lines", Progress in Superconductivity, Vol. 9, No.1, pp.119-125, 2007.
- [5] 한국전력공사, "변전설비 현장 가이드북", 2000
- [6] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배 "배전계통 초전도 한류기 동작특성에 따른 계통영향 분석", 대한전기학회 논문지, 제57권 7호, pp 1135-1140, 2008

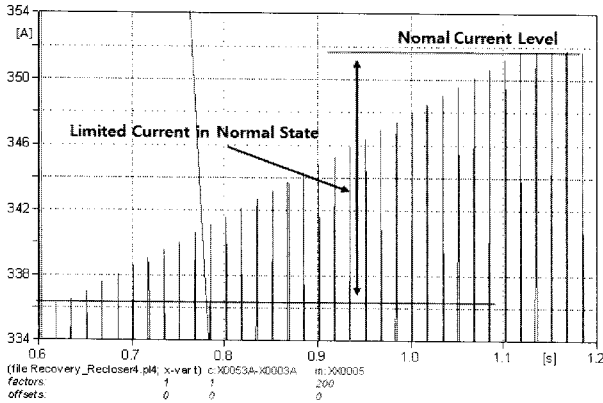


그림 10 'A'부분 확대(그림 9)
Fig. 10 Magnification of Section 'A' in Fig. 9

영구고장 시 (Case C, D) 초전도 한류기는 재폐로 차단기의 동작 시퀀스를 만족하도록 동작해야 한다. 재폐로 차단기의 1차 재폐로 동작의 경우에는 그림 5에서와 같이 고장전류 크기에 따른 한시 동작을 하여야 하는데 만약 초전도 한류기가 완전히 회복되지 못한 상태에서 재폐로가 수행된 경우 고장전류는 우선 크기가 작지만 잔존하고 있는 한류저항에 의해 제한되고 이어 완전 회복 후 정상 한류저항이 투입되어 고장전류를 제한하게 된다.

이때, 재폐로 차단기의 투입에 의한 고장전류를 초전도 한류기가 완전히 제한하지 못한 상태에서 재폐로 차단기의 트립시간을 결정하게 되어 정상적인 초전도 한류기 동작에 따른 트립시간 (그림 11의 ①) 과 비교할 때 상대적으로 빠른 트립시간 (그림 11의 ②)을 갖게 된다. 실제 재폐로 차단기의 운용에 있어서는 차단기의 1차 1폐로후 개방에서는 순시요소를 제한하여 한시 동작토록 하고 있으며 이때 한시의 트립시간은 Case D에서와 같이 오동작 하는 경우도 생길 수 있다.

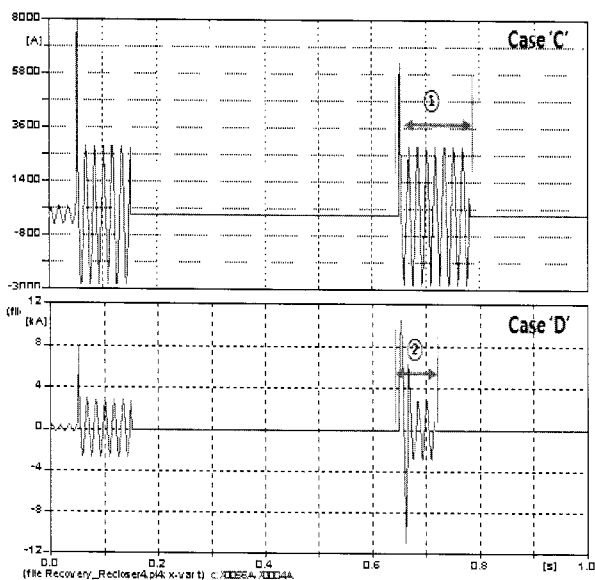


그림 11 재폐로 차단기에서의 한시 트립시간 변화(Case C,D)
Fig. 11 Variation of delay trip time in recloser

저 자 소 개



이 상 봉 (李 相 奉)

1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대학교 전력IT 인력양성센터 선임연구원



김 철 환 (金 喆 換)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장

Tel : 031-290-7124

Fax : 031-290-7179

E-mail : hmwkim@hanmail.net



김 규 호 (金 圭 浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년 안산공과대학 전기과 교수. 현재 한경대학교 전기공학과 교수



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 22일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학과 교수

Tel : (02) 817-0647

Fax : (02) 817-0870

E-mail : jckim@ssu.ac.kr



현 옥 배 (玄 鉦 培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이학박사), Ames Lab., NIST, ISTEAC 연구원 역임, 현재 한전 전력연구원 수석연구원

Tel : (042) 865-7510

Fax : (042) 865-5206

E-mail : hyun@kepri.re.kr