

미래 배전계통에서의 자동재폐로 동작을 고려한 초전도한류시스템에 관한 연구

이 승 열 김 종 율 윤 재 영
한국전기연구원

A study on SFCL System for Korean future distribution power system application considering auto reclosing actions of protection system

Seung Ryul Lee Jong Yul Kim Jae Young Yoon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The recovery time of developing SFCL(Superconducting Fault Current Limiter) has an uncertainty. In general, the recovery time is estimated at 1 sec and more, even though the progress of SFCL technology is considered. However, auto reclosing time of circuit breaker is 0.5 sec in Korean distribution power system. It is impossible to apply only one SFCL to power system because the recovery time is over the reclosing time of protection system. This study proposes a new SFCL system for distribution power system application. The proposed systems consider auto reclosing action for the protection in practical power system and consist of tow parallel SFCLs.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가에 따른 발전단과 송배전망의 증강으로 현재 전력계통에서 고장전류가 차단기의 차단용량을 초과하는 등 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 현재 국내계통에서는 고장전류 문제 해소책으로서 345kV 변전소간 154kV 연계선로 분리, 모선분리, 직렬 리액터 설치, 대용량 차단기 도입 등 다양한 방안을 고려하고 있다[1][2]. 그러나, 이러한 대책방안들은 계통신뢰도 및 계통안정도를 저하시키거나 비용이 많이 든다는 단점을 갖고 있으며, 또한 이러한 방안들은 근본적인 고장전류 저감책이라고 할 수는 없다. 이처럼 고장전류 문제가 심화되고 있는 시점에서 대두되고 있는 고장전류 저감책 중의 하나가 초전도한류기이며, 현재 실제통용 이전의 초보단계로서 prototype 초전도한류기가 개발된 상태이다. 이와 함께 국내계통에서의 초전도한류기 적용을 위한 계통해석관점 연구는 기본적인 수준에 불과하다. 특히, 전력계통 보호협조관점에서의 연구는 정성적 검토수준으로서 매우 기초적인 연구만이 수행된 상태이다. 계통보호관점에서 문제점으로 대두되고 있는 사항 중 하나가 초전도한류기의 복귀시간과 자동재폐로 동작 시간과의 상충점이다. 현재 국내에서 개발 중인 초전도한류기의 복귀시간이 1초 이상일 것으로 예상되는 반면 배전계통에서의 자동재폐로 동작시간은 0.5초이다. 따라서, 계통고장발생시 초전도한류기의 복귀시간 이전에 자동재폐로 동작을 하게 되므로 계통운영상 문제점이 발생할 것으로 판단되지만 현재까지 이에 대한 상세연구는 전무한 상태이다. 이에 따라 본 연구에서는 초전도한류기의 기기특성과 실제 계통 보호시스템의 자동재폐로 동작과의 상관관계를 검토하여, 초전도한류기를 병렬로 연결 구성하여 실제 계통 운영을 반영한 현실적인 초전도한류시스템을 제안하였다.

2. 초전도한류기 기본특성

먼저 초전도한류기의 기본 응답특성을 살펴보면 그림 1과 같다. 초전도한류기는 계통고장으로 인해서 고장전류가 퀘칭개시전류(임계전류) I_Q 를 넘는 경우 초전도상태가 파괴되어 퀘칭상태가 되며, 초전도기기의 저항이 R_Q 에 따라서 증가하다가 시정수 t_1 이 지난 후에 최종 저항값인 R_{final} 을 갖게 된다. 또한 계통고장이 제거된 후 고장전류가 감소하여 Recovery 개시전류 I_R 이하가 되면 초전도한류기는 Recovery 상태가 되어 일정 시정수 t_2 (복귀시간-Recovery Time) 후에는 다시 초전도상태로 복귀하게 된다.

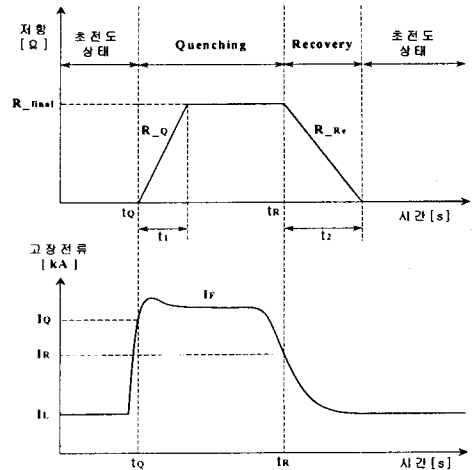


그림 1 초전도한류기 기본특성

3. 미래 신 배전계통용 초전도한류시스템

3.1 미래 신 배전계통 개요 및 기본검토전제

국내계통은 대도시의 부하집중으로 인하여 전력설비용량의 확보가 필수적이다. 대도시의 전력망은 대부분 지중케이블과 GIS 변전소로 구성되어 있다. 제 2차 전력수급계획 및 장기 송변전 설비계획(2004년-2017년)에 따르면 지중선로의 비율 및 변전설비용량이 향후 지속적으로 증가될 것으로 예상된다[1-2]. 그러나 NIMBY 현상에 따른 환경민원 등의 제약으로 인하여 대도시에서의 전력설비용량 증대를 위한 지중선로 및 변전소 입지확보에 어려움이 많은 실정이다. 현재 국내에서 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로서 초전도한류기, 초전도케이블, 초전도변압기를 병행 적용한 미래 신 배전계통에 대한 기본연구가 진행되고 있다[3]. 참고로 현재 구상 중인 미래 신 배전계통 기본 개념을 도시화하면 그림 2와 같다. 본

연구는 이러한 미래 배전계통에서의 초전도한류기 적용 방안에 대한 연구의 일환으로서, 초전도한류기의 기기특성과 실제용 보호시스템의 자동재폐로 동작과의 상관관계를 검토하여, 실제용 운영을 반영한 현실적인 초전도한류시스템 구성방안 및 기본운영방안에 대한 제안을 목적으로 한다.

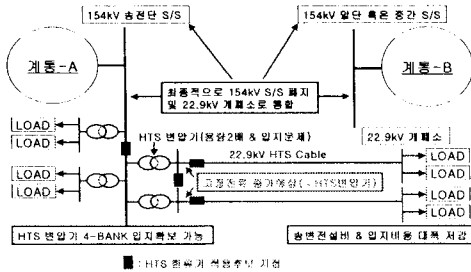


그림 2 미래 신 배전계통 구성 예

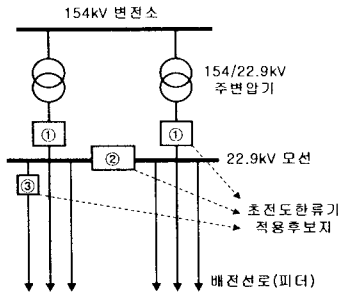


그림 3 배전계통 내 초전도한류기 적용후보지

우선 배전계통에서 초전도한류기의 주요 적용위치로서 그림 3과 같이 ①~③의 3개소를 생각할 수 있는데, 기 수행된 기본연구에 따르면[3] 이 중 주 변압기 2차측에 적용하는 경우(①번 위치)가 고장전류 저감효과 및 경제적 효율성이 가장 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서는 상기 위치 중 ①번을 기준으로 기본검토를 수행하였다.

3.2 배전계통용 초전도한류시스템 도입필요성

초전도한류기를 실제 배전계통에 적용하기 위해서는 배전선로 중 가공선로의 자동재폐로 동작을 고려할 필요성이 있다. 배전선로 중 가공선로의 경우 0.5초에 자동재폐로 동작을 하는 반면, 기기개발자에 따르면 향후 기술의 발달을 고려한다 하더라도 국내에서 개발 중인 저항형 초전도한류기의 복귀시간은 1초 이상이 될 것이라는 예상은 지배적인 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 초전도한류기 복귀시간을 1초 이상으로 가정하였다. 이는 전력계통 내의 보호 중 자동재폐로 동작특성과 상충되는 점이 있다. 즉, 초전도한류기를 단독으로 적용하는 경우 자동재폐로 동작시간 0.5초 이내에 초전도한류기가 완전 복귀가 되지 않으므로 초전도한류기의 정상동작이 어려울 가능성이 존재한다. 결국 초전도한류기를 단독으로 배전계통에 적용하는 것은 불가능할 것으로 판단됨에 따라, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 대안으로서 초전도한류기 2대를 병렬로 구성한 초전도한류시스템을 제안하였다. 참고로, 현재 국내 배전계통에서 적용하고 있는 보호방식을 요약하면 표 1과 같다 [4]. 표 1에서 가공선로의 경우 재폐로가 2회 적용되는데, 두 번째 동작시간은 15초로서 초전도한류기의 복귀시간을 초과하는 값이므로 한류기의 정상동작에 문제가 없을 것으로 판단되므로 두 번째 재폐로 동작은 고려하지 않았다.

표 1 22.9kV 배전선로 보호방식

적용 Relay 방식	재폐로방식
(단) 과전류계전방식 : 배전선 1회선당 OCR 3대	·지중선로 : 0회 ·지중선로 30% 이상 : 3상 1회(0.5초)
(지) 지락과전류계전방식 : 배전선 1회선당 OCRG 1대	·지중선로 30% 미만 및 가공선로 : 3상 2회 (0.5, 15초)

배전계통에 초전도한류기를 적용하는 경우, 초기 고장에 의해 초전도한류기가 정상 동작하여 켜치되고, 계통 보호시스템에 의해서 고장발생 이후 6cycle 이내에 고장선로가 개방하게 된다. 이와 동시에 초전도한류기에는 고장전류가 흐르지 않게 되며 복귀상태가 된다. 또한 고장선로 개방 이후 0.5초가 되는 시점에 전력계통에서 자동재폐로 동작을 하여 고장선로를 재투입하게 된다.

고장선로 재투입시 만약 고장이 지속되고 있으면 고장선로를 다시 6cycle 이내에 개방하며, 복귀상태의 초전도한류기는 고장선로가 재투입된 6cycle동안 다시 고장전류를 통전해야 한다. 현재 개발 중인 초전도한류기의 켜치속가능 시간과 고장전류의 2회 연속통전시 정상동작 가능성 등에 대한 명확한 데이터는 미흡한 실정이다. 기기개발관련 전문가에 의하면 초전도한류기 자체의 열용량 등 기타 관점에 볼 때, 고장전류가 통전하게 되는 12cycle(자동재폐로시 고장이 지속되는 경우, 최초 고장 지속시간 6cycle과 재투입시 고장지속시간 6cycle)동안 초전도한류기의 정상동작 가능성에 대해서 낙관적인 예측을 하고 있다. 그러나 현재 이와 관련하여 불확정적 요소가 존재하므로 명확한 결론을 내리기에는 약간의 어려움이 있으며, 향후 이에 대한 연구는 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

고장선로 재투입시 만약 고장이 제거된 상태의 경우에는 선로개방 없이 정상운전을 하게 된다. 이 경우, 고장선로의 재투입으로 인하여 복귀상태에 있던 초전도한류기에 지속적인 부하전류가 흐르게 되는데, 초전도한류기는 켜치저항을 유지하고 있는 상태이며 이에 따라 수 초(초전도한류기 복귀시간)동안 켜치저항에 의한 열이 발생할 것을 예상된다. 결국, 초전도한류기의 냉각능력 또는 열용량을 초과한 열발생에 의해서 초전도한류기가 파손되거나, 혹은 복귀상태에 있던 초전도한류기가 정상적으로 복귀되지 않을 가능성이 존재한다.

이처럼 현재로서는 초전도한류기 단독으로 적용하는 경우, 자동재폐로시 고장지속여부에 관계없이 문제점이 발생할 여지가 있다. 최악의 경우, 배전계통에 적용된 초전도한류기가 정상동작을 하지 못하고 파손된다면 고장전류가 저감되지 않고 차단기의 정격을 초과하여 차단기가 정상동작을 못하게 될 가능성도 있다.

본 연구에서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 초전도한류기의 기본특성과 동작 시퀀스 및 전력계통의 자동재폐로 동작과의 상호작용 등을 동시에 고려한 배전계통용 병렬 초전도한류시스템을 제안하였다.

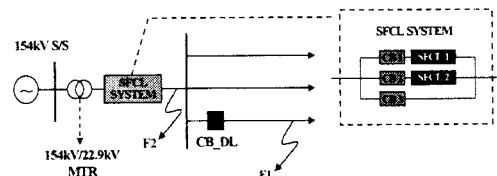


그림 4 배전계통용 초전도한류시스템 (주변압기 2차측 SFCL SYSTEM 투입)

3.3 제안 시스템 구성 및 동작시퀀스

3.2절에서 설명한 바와 같이 초전도한류기를 송배전선

로에 단독으로 적용하기에는 여러 가지 문제점이 있으므로 이러한 기술적 문제점을 해결하기 위해서 그림 4와 같은 배전계통용 초전도한류시스템을 고안하였다. 본 시스템은 초전도한류기와 직렬 연결된 차단기 SET 2대 및 차단기 1대를 병렬로 구성한 초전도한류시스템으로서, 각각의 초전도한류기에 연결되어 있는 차단기 중 하나는 상시투입, 나머지 하나는 상시개방 운전한다. 실 전력계통에서 본 초전도한류시스템이 송배전선로에 연결되어 있을 경우, 고장이 발생하면 상시투입 되어있는 초전도한류기(SFCL1)이 동작(Quench)하여 고장전류가 차단용량 이하로 감소되고 차단기1(CB1)은 성공적으로 개방됨으로써 초전도한류기1은 복귀과정을 거치게 된다. 이후 상시개방 되어있는 차단기가 투입되고 재투입시간이 경과한 이후 고장지속여부에 따라서 초전도한류기 2(SFCL 2)의 상태가 초전도상태 지속되어 정상운전하거나 고장전류에 의해 다시 동작하게 된다. 이는 실 전력계통의 송배전선로에 초전도한류기를 적용하기 위해서 반드시 해결해야 하는 초전도한류기의 복귀시간 지연에 따른 문제점을 해결한 초전도한류시스템으로서, 실 전력계통의 고장상태와 재투입상태를 고려한 현실적인 적용 방안이다. 본 초전도한류시스템의 동작시퀀스는 아래와 같다.

- 0 동작시퀀스 1 (고장위치 : F1, 고장선로 재투입시 고장 지속상태인 경우)
 - t = 0 ~ 0.2 초 정상상태
 - : CB 1 Close, CB 2 및 3 Open
 - t = 0.2 초 고장발생 : SFCL 1 동작(Quench)
 - t = 0.3 초 : CB 1 Open → SFCL 1 복귀, CB 2 Close, CB_DL Open
 - t = 0.8 초 고장선로 재투입 (고장 지속시)
 - : CB_DL Close, SFCL 2 동작(Quench)
 - t = 0.9 초 (고장 지속시)
 - : CB_DL Open(고장선로 영구고장) → SFCL 2 복귀, CB 3 Close
 - t = 1.3 초 이후 (SFCL 1 완전복귀 후)
 - : CB 3 Open, CB 1 Close → 정상운전
- 0 동작시퀀스 2 (고장위치 : F1, 고장선로 재투입시 고장 제거상태인 경우)
 - t = 0 ~ 0.2 초 정상상태
 - : CB 1 Close, CB 2 및 3 Open
 - t = 0.2 초 고장발생 : SFCL 1 동작(Quench)
 - t = 0.3 초 : CB 1 Open → SFCL 1 복귀, CB 2 Close, CB_DL Open
 - t = 0.8 초 고장선로 재투입 (고장 제거상태시)
 - : CB_DL Close, SFCL 2 정상운전(초전도상태)

4. 결 론

본 연구에서는 초전도한류기 기본특성과 실계통 운영을 모두 고려한 초전도한류시스템 및 운용방안을 제안하였다.

- 0 제안된 시스템을 실계통에 적용하는 경우, 고장전류를 차단용량 이하로 감소시킴으로서 고장발생시에 전력계통의 안정성을 확보하여, 복미정전과 같은 전체 전력계통의 대정전 사고를 미연에 방지할 수 있다. 이는 현재 고장전류를 저감시키기 위하여 적용하고 있는 시설선로 분리운전, 모선분리 등의 경제적인 비효율성을 회피함은 물론이고 대정전을 예방함으로써 천문학적인 경제, 사회적 비용을 저감하는 효과를 나타낸다.
- 0 본 연구에서는 초전도한류기의 기본특성과 동작 시퀀스 및 전력계통의 자동재폐로 동작과의 상호작용 등을

동시에 고려하여 복수의 초전도한류기를 병렬로 연결하여 구성한 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 초전도한류기를 실계통에 적용하는 경우 자동재폐로 관점에서 발생할 수 있는 문제점을 해결한 초전도한류시스템이다. 즉, 초전도한류기 1대를 단독으로 계통에 적용하는 경우는 자동재폐로에 의한 한류기 파손 또는 계통보호/운영 관점의 문제발생 소지가 있으나, 본 시스템은 한류기의 파손 없이 지속적으로 정상적인 계통운영이 가능하다는 장점이 있다.

- 0 본 연구는 계통보호시스템을 고려한 초기단계의 연구로서, 향후 본 시스템을 실계통에 적용하는 경우, 기타 보호방식과의 상충점을 고려한 상세검토를 통한 시스템의 수정보완이 지속적으로 요구된다. 또한, 초전도한류기 개발과 함께 켈칭지속가능시간 등과 같은 상세 계통검토를 위한 관련 데이터에 대한 심도깊은 논의가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, 한국전력거래소, “제2차 전력수급기본계획(2004년-2017년)”, 2004. 12
- [2] 한국전력공사, 송변전사업본부, 계통계획실, “장기 송변전설비계획(2004년-2017년)”, 2005. 3
- [3] 윤재영, 이승렬, 김종욱, 김호용, “저항형 초전도한류기의 미래 배전계통 적용방안”, 전기학회논문지, 54A권 5호, 2005. 5.
- [4] 한국전력공사, 배전처, “배전보호기술서”, 1995
- [5] 이승렬, 김종욱, 최홍관, 윤재영, “국내 실계통에서의 154kV 초전도한류기 계통적용 가능성 검토”, 전기학회논문지, 53A권 12호, pp661-669, 2004. 12.
- [6] 이승렬, 김종욱, 윤재영, “실계통에서의 154kV IITS-FCL Bus-Tie 최적 적용방안에 관한 연구”, 전기학회논문지, 54A권, 5호, 2005. 5
- [7] Jong-Yul Kim, Heung-Kwan Choi, Jae-Young Yoon, “A Study on the Application Impacts on Korean Power System by Introducing SFCL”, KIEE International Transactions on PE, Vol. 3-A, No. 1, pp. 1-6, 2003
- [8] Jae-Young Yoon, Jong-Yul Kim, Seung-Ryul Lee, “Resistive IITS-FCL EMTDC Modeling by Using Probabilistic Design Methodology”, KIEE International Transactions on PE, Vol. 4-A No.2, pp. 69-72, 2004
- [9] Jong-Yul Kim, Seung Ryul Lee, Jae-Young Yoon, “Evaluation of the Application Scheme of SFCL in Power Systems”, KIEE International Transactions on PE, Vol. 4-A, No. 4, pp. 221-226, 2004[5] M. Noc, B. R. Oswald, “Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems,” IEEE Transactions on applied superconductivity, 1999.6
- [10] M. Sjoström, D. Politano, “Technical and Economic Impacts on a Power System by Introducing an IITS FCL”, IEEE Trans on Applied Superconductivity Conference, Sept. 2000