

## 초전도(신)전력계통 보호시스템에 관한 기본연구

이승렬\*, 윤재영\*, 양병모\*\*  
한국전기연구원\*, 전력연구원\*\*

### Protection system of new superconducting power system

Seung Ryul Lee\*, Jaeyoung Yoon\*, Byeongmo Yang\*\*  
Korea Electrotechnology Research Institute\*, Korea Electric Power Research Institute\*\*

**Abstract** - We proposed a new power system, Superconducting Power System. The SPS consists of superconducting power cables, fault current limiters, and transformers. The basic concept is to replace 154kV conventional cables with 22.9kV superconducting cables and to convert a 154kV substation into a 22.9kV switching station in downtown area. For the application of the SPS to real power system, it is very important to construct the protection system of the SPS. This study presents a protection system for the new Superconducting Power System (SPS).

### 1. 서 론

대도시의 고장전류 문제, 전력기기의 입지문제 등의 계통문제를 해소시킬 수 있는 대안으로서 친환경, 대용량, 저손실의 특성을 갖는 초전도 전력기기가 주목받고 있다. 전 세계적으로 초전도케이블, 초전도한류기, 초전도변압기 등의 초전도전력기기의 개발 및 실계통 적용연구가 활발하게 추진되고 있다[1-2]. 국내에서도 DAPAS(Development of Applied Power system by Applied Superconductivity technologies) 프로그램을 통하여 22.9kV급 초전도케이블 및 초전도한류기를 개발하였으며, 154kV/22.9kV 초전도변압기의 요소기술개발을 완료하였다[3]. 특히, 22.9kV급 초전도케이블과 초전도한류기는 GENI(Green superconducting Electric power Network at Icheon substation) 프로젝트를 통하여 이천 변전소에 시범적용연구를 진행하고 있다[4]. GENI 프로젝트에서 이천 변전소를 대상으로 하여 보호시스템까지 고려한 계통설계 및 기본 기술성 검토를 완료하였으며, 2011년 중으로 실계통 운전을 계획하고 있다[5]. 본 연구에서는 이천변전소 보호시스템 구성경험을 토대로, 향후 개발 예정인 대용량 초전도변압기까지 고려하여 기 제안된 초전도(신)전력계통 [6]에 대한 기본 보호시스템 구성방안을 제안하고자 한다. 즉, 기존에 이루어진 초전도(신)전력계통 보호시스템 기안연구결과와 이천변전소 보호시스템 연구결과를 바탕으로 보다 효율적이며 신뢰성이 높은 보호시스템에 대한 기술검토를 수행하였다.

### 2. 보호시스템 구성 (안)

초전도(신)전력계통은 154kV/22.9kV 초전도변압기, 22.9kV 초전도한류기, 22.9kV 100~200MVA급 초전도케이블, 22.9kV 30~50MVA급 초전도케이블 등으로 구성된다[6]. 본 연구에서는 기 제안된 개념을 바탕으로 초전도(신)전력계통의 보호시스템 구성 (안)을 <그림 1>과 같이 제안하였으며, 이를 표로서 요약하면 <표 1>과 같다.

#### 2.1 보호구간 ①

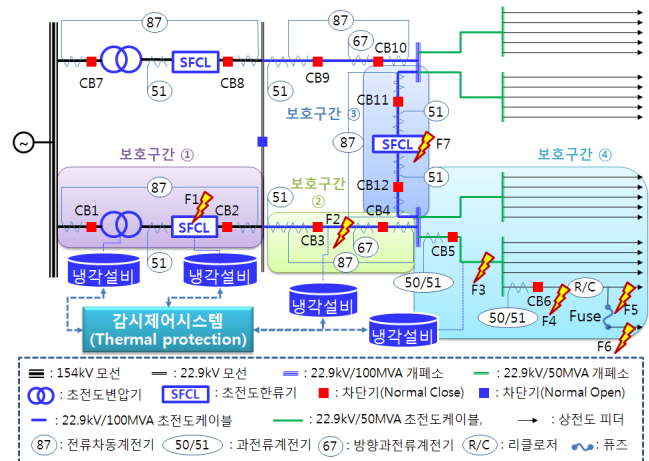
일반적으로 변압기와 같은 대형 전력기기의 보호방식으로 전류차동계전방식을 채택하고 있다. 전류차동계전방식은 피보호기기로 유입되는 전류의 백터합이 정정치 이내로 들어오는지를 확인하여 내외부고장을 판별하는 방식으로서, 자기 보호구간(피보호기기)의 고장을 가장 확실하게 관별할 수 있다.

본 연구에서는 초전도변압기와 초전도한류기의 주보호로서 기존 변압기의 주보호방식인 전류차동계전방식을 제안한다. 초전도(신)전력계통 구성과 같이 초전도변압기와 초전도한류기를 직렬로 적용하는 경우, 초전도변압기와 초전도한류기를 한 대의 전류차동계전기로 보호가 가능하다. 주보호 동작실패를 대비한 후비보호방식으로는 기존의 변압기 후비보호방식으로 사용하고 있는 과전류계전방식을 그대로 적용할 수 있으며, 이와 함께, 초전도기기 냉각특성을 고려한 Thermal protection 역시 적용해야 한다. 단, 후비보호용 과전류계전기 정정시에는, 계통고장시 초전도변압기/한류기의 임피던스 변화에 따른 고장전류 변화분을 고려해야 한다. 초전도변압기와 초전도한류기 자체의 자동재폐로 동작은 적용하지 않으며, 단지, 하위의 배전선로의 재폐로 동작을 감당할 수 있을

정도의 단락강도를 기준으로 초전도변압기와 초전도한류기를 개발해야 한다.

#### 2.2 보호구간 ②, ③

100MVA 이상의 대용량 초전도케이블의 임피던스 차가 크지 않은 관계로 각 지점별 고장전류 차가 크지 않다. 때문에, 과전류계전방식을 적용하는 경우, 순시고장에 대한 보호기간 보호협조에 다소 어려움이 있을 것으로 예상되며, 특히, 배전선로가 루프화된 경우에는 과전류계전방식으로는 배전선로의 보호가 불가능하다. 또한, 고저항지락고장의 경우, 과전류계전방식에서는 약점이 존재한다. 결국, 22.9kV 100~200MVA 초전도케이블의 순시보호로서 과전류계전방식은 적용이 불가능할 것으로 예상된다.



<그림 1> 초전도(신)전력계통 보호시스템 구성 (안)

<표 1> 초전도(신)전력계통 보호방식

피보호기기	보호방식
(보호구간 ①) 154kV/22.9kV 초전도변압기 + 22.9kV 초전도한류기	○ 주보호 : 전류차동계전방식(87) ○ 후비보호 : 과전류계전방식(51) + Thermal Protection ○ 자동재폐로 : 미적용. 단, 배전선로의 재폐로 동작 감당.
(보호구간 ②, ③) 22.9kV 초전도한류기 + 22.9kV 100~200 MVA 초전도케이블	○ 주보호 : 전류차동계전방식(87) ○ 후비보호 : 과전류계전방식(51) + Thermal Protection + 방향과전류계전방식(67) ○ 자동재폐로 : 미적용. 단, 배전선로의 재폐로 동작 감당.
(보호구간 ④) 22.9kV, 30~50MVA 급 초전도케이블 또는 기존 상전도 배전선로	○ 기존 보호시스템(과전류계전기, R/C 등)을 그대로 적용. ○ 자동재폐로 : 가공선로가 70%이상인 경우 적용. ○ 초전도케이블 후비보호 : Thermal Protection 적용 ○ 한류기 적용에 따른 고장전류 제한을 고려한 보호계전기 정정 필요.

본 연구진의 기본검토 결과, 송전선로 대체용 22.9kV 대용량 초전도 케이블 보호를 위해서 전류차동계전방식이 가장 적합할 것으로 판단된다. 개폐소 연결용 초전도케이블과 초전도한류기를 직렬로 함께 적용하는 경우에는 전류차동계전기 1대로 초전도케이블과 초전도한류기의 순시보호가 가능하다. 배전선로에서는 후비보호라는 개념이 존재하지는 않지만, 주변압기의 후비보호기인 과전류계전기처럼 초전도케이블의 한시보호를 위해서 과전류계전방식이 필요하며, 이와 함께 초전도기기의 냉각(온도)특성 및 켄치특성을 고려한 Thermal protection을 함께 적용할 수 있다. 또한, 후비보호로서 방향과전류계전기를 도입하여, 배전피더(보호구간 ④)와 송전선로 대체용 초전도케이블(보호구간 ③)의 고장을 구분하여 개폐소 연결용 초전도케이블 및 초전도한류기의 보호시퀀스 적용해야 한다.

### 2.3 보호구간 ④

22.9kV 30~50MVA 초전도케이블과 상전도 배전선로의 보호는 기존 보호시스템을 그대로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 초전도한류기의 초전도케이블 적용으로 인한 고장전류 변화분을 고려한 보호계전기의 정정이 필요하며, 50MVA 초전도케이블의 경우는 기존 배전선로의 정정지침을 유연하게 적용할 필요성이 있다.

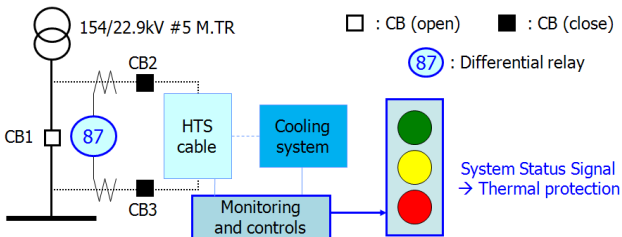
## 3. 보호시스템 운용 및 보호협조시 고려사항

상기의 초전도(신)전력계통 보호시스템 운용 및 보호기간 보호협조시 고찰사항과 보호계전기 정정시 고려사항을 정리하면 다음과 같다.

### 3.1 Thermal protection 적용

초전도기기는 기존 전력설비와 달리 초전도체의 냉각(온도)특성 및 켄치특성으로 인하여 에너지 개념의 Thermal protection의 적용이 필수적이다. 국외사례를 살펴보면, AEP 프로젝트와 LIPA 프로젝트에서 온도 변화와 에너지마진의 개념을 도입하여 단계별 Thermal protection을 채택하고 있다. 국내 실계통에 초전도기기를 적용할 경우 현재 구축되어 있는 초전도설비의 감시제어시스템에, 국내계통 고장특성과 초전도기기 자체의 특성을 고려하여, 단계별 Thermal protection 시스템을 구현하는 것이 바람직할 것이다. 그 예를 나타내면 다음과 같다.

- 1단계 : 정상상태
- 2단계 : 주의단계(초전도기기 온도상승 또는 에너지 마진 1차 기준 초과)
- 3단계 : 비상상태(한계온도(에너지 마진한계) 초과 → 초전도기기 계통분리)



〈그림 2〉 초전도케이블 Thermal protection 예

### 3.2 보호시스템 동작시퀀스

상기의 초전도(신)전력계통의 보호구간 ②와 ③의 한시보호의 경우, 고장위치에 따른 보호시스템 동작시퀀스를 달리해야 한다. 고장위치별 보호시스템 동작시퀀스 예를 나타내면 아래와 같다(〈그림 1〉 참조). 본 검토내용은 기본검토 결과 예이며, 향후 초전도(신)전력계통의 성공적인 운영을 위해서는 특정 개소에 대한 보호계전기 정정 및 상세 보호협조 검토를 수행해야 할 것으로 판단된다.

- 송전선로 대체용 대용량(100~200MVA) 초전도케이블(F2) 고장시
  - (시퀀스-1) 초전도케이블용 전류차동계전기(87) 순시동작 → CB3 및 CB4 개방
  - (시퀀스-2) 시퀀스-1 동작 실패시 : CB4 방향과전류계전기(67) 및 CB12 한시과전류계전기(51) 고장위치 판별 → CB4 개방 → CB3 한시과전류계전기(51) 동작 → CB3 개방
  - (시퀀스-3) 시퀀스-2 동작 실패시 : CB9 한시과전류계전기(51) 동작 → CB9 개방 → CB1 및 CB2 한시과전류계전기(51) 동작 → CB1 및 CB2 개방
- 배전피더용 30~50MVA 초전도케이블(F3) 고장시
  - (시퀀스-1) 초전도케이블 과전류계전기 순시동작(50) → CB5 개방

- (시퀀스-2) 시퀀스-1 동작 실패시 : 과전류계전기 한시동작(51) → CB5 개방
- (시퀀스-3) 시퀀스-2 동작 실패시 : CB4 방향과전류계전기(67) 및 CB12 한시과전류계전기(51) 고장위치 판별 → CB12 개방 → CB3 한시과전류계전기(51) 동작 → CB3 개방
- (시퀀스-4) 시퀀스-3 동작 실패시 : CB9 및 CB3 한시과전류계전기(51) 동작 → CB9 및 CB3 개방
- (시퀀스-5) 시퀀스-4 동작 실패시 : CB1, CB2, CB7, CB8 한시과전류계전기(51) 동작 → CB1, CB2, CB7, CB8 개방

### 3.3 22.9kV 30~50MVA 초전도케이블 보호용 과전류계전기 정정

현재 배전선로 보호방식인 과전류계전방식을 적용한다면, 기존 배전부하(10MVA~15MVA)를 공급하는 경우, 초전도케이블의 임피던스가 기존 배전선로보다 작기아서 고장전류 크기만 조금 차이가 생기는 것이므로 과전류계전기의 정정에는 큰 문제는 없다. 그러나, 50MVA의 부하를 공급하는 경우는 변전소 내 (지락)과전류계전기의 순시 Tap 정정지침(〈표 2〉 참조)을 계통조건에 맞게 아래와 같이 조금 더 유연하게 적용할 필요성이 있다.

- 전위보호장치가 있는 경우, OCR/OCGR 순시 Tap 정정은 계통조건에 따라서 1.1~1.5배로 차별 적용.
- 전위보호장치가 없는 경우, OCR/OCGR 순시 Tap 정정은 최대부하전류의 2~6배로 차별 적용

〈표 2〉 변전소 (지락)과전류계전기 순시 Tap 정정기준

구 분	정정지침
과전류계전기 (OCR)	○ 전위보호장치 순시요소 有 → 최대 3상 단락전류 × 1.5 이상 ○ 전위보호장치 순시요소 無 → 최소단락전류(2상단락전류)에 동작 ○ 전위보호장치 無 → 최소 Tap에 정정 > 최대부하전류×6
지락과전류계전기 (OCGR)	○ 전위보호장치 순시요소 有 → 최대 1선 지락고장전류(지락저항 0Ω) × 1.4 이상 ○ 전위보호장치 순시요소 無 → 최소 1선 지락고장전류(지락저항 30Ω)에 동작 ○ 전위보호장치 無 → 최소 Tap에 정정 > 최대부하전류×6

## 4. 결 론

본 연구에서는 기 제안된 초전도(신)전력계통을 대상으로 보호시스템 기본 구성(안)을 제안하였다. 또한, 제안된 보호시스템의 운용 및 보호협조시의 고려사항에 대하여 고찰하였다. 본 검토결과와 향후, 초전도(신)전력계통의 실계통 적용시에, 보호시스템 구축을 위한 참고자료로 활용할 수 있다. 성공적인 실계통 운영을 위해서는 대상계통에 대한 보호협조 등의 상세 계통검토가 필수적이다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S. Echroad, "Superconducting Power Cables(Technical Watch)", EPRI report 1017792, 2009
- [2] S. Echroad, "Superconducting Fault Current Limiters(Technical Watch)", EPRI report 1017793, 2009
- [3] DAPAS 프로젝트 3단계 연구보고서, 한국전기연구원, 2011년
- [4] B. Yang, Y. Won, J. Kim, C. Jung, S. Lee, and J. Yoon, "The first demonstration project for the application of HTS cable and SFCK to real grid in South Korea", ASC2010 3LP3G-06, 2010
- [5] 이승렬, 윤재영, 양병모, "국내 실계통에서의 22.9kV 초전도케이블/한류기 시범적용을 위한 보호시스템 설계", 한국초전도저온공학회는 논문지, 12권, 3호, 2010년
- [6] 이승렬, 김종욱, 윤재영, 이병준, "대도심 분산형 배전개폐소를 적용한 초전도 전력시스템 개념설계", 대한전기학회논문지, 제55A권, 제12호, 2006