

## Domestic Efforts for SFCL Application and Hybrid SFCL

O. B. Hyun<sup>a</sup>, H. R. Kim<sup>a</sup>, Y. S. Yim<sup>a</sup>, J. Sim<sup>b</sup>, K. B. Park<sup>b</sup> and I. S. Oh<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Korea Electric Power Research Institute, KEPCO, Daejeon, Korea

<sup>b</sup> LS Industrial Systems, Cheongju, Korea

Received 4 July 2008

## 국내 초전도 한류기 요구와 하이브리드 초전도 한류기

현옥배<sup>a</sup>, 김혜림<sup>a</sup>, 임성우<sup>a</sup>, 심정욱<sup>b</sup>, 박권배<sup>b</sup>, 오일성<sup>b</sup>

<sup>a</sup> 한전 전력연구원, 대전, <sup>b</sup> LS산전전력연구소, 청주

### Abstract

We present domestic efforts for superconducting fault current limiter (SFCL) application in the Korea Electric Power Corporation (KEPCO) grid and pending points at issue. KEPCO's decision to upgrade the 154 kV/22.9 kV main transformer from 60 MVA to 100 MVA cast a problem of high fault current in the 22.9 kV distribution lines. The grid planners supported adopting an SFCL to control the fault current. This environment friendly to SFCL application must be highly dependent upon the successful development of SFCL having specifications that domestic utility required. The required conditions are (1) small size of not greater than twice of 22.9 kV gas insulated switch-gear (GIS), (2) sustainability of current limitation without the line breaking by circuit breakers (CB) for maximum 1.5 seconds. Also, optionally, recommended is (3) the reclosing capability. Conventional resistive SFCLs do not meet (1) ~ (3) all together. A hybrid SFCL is an excellent solution to meet the conditions. The hybrid SFCL consists of HTS SFCL components for fault detection and line commutation, a fast switch (FS) to break the primary path, and a limiter. This characteristic structure not only enables excellent current limiting performances and the reclosing capability, but also allows drastic reduction of HTS volume and small size of the cryostat, resulting in economic feasibility and compactness of the equipment. External current limiter also enables long term limitation since it is far less sensitive to heat generation than HTS. Semi-active operation is another advantage of the hybrid structure. We will discuss more pending points at issues such as maintenance-free long term operation, small size to accommodate the in-house substation, passive and active control, back-up plans, diagnosis, and so on.

*Keywords* : fault current, superconducting fault current limiter, hybrid SFCL, field test.

### I. 머리말

\*Corresponding author. Fax : +82 42 865 7510

e-mail : hyun@kepri.re.kr

초전도 한류기는 전력선에 고장 발생시 고장전

류를 초기부터 제한하는 성능을 가진 최선의 고장전류 제한기로서 다양한 형태로 개발되어왔다 [1-10]. 가장 많이 연구되고 있는 것으로 초전도체 켄치시 저항 발생을 이용하는 저항형(resistive type, 혹은 S - N 전이형)이 있고 [1-3], 강한 초전도 DC 코일을 사용하여 철심을 포화시키고, 고장전류로 포화를 풀어 리액터를 발생시키는 포화철심형 (saturable reactor type) [6-7], 그 외 같은 S - N 전이형이면서도 리액터로 한류하는 자기차폐형, 전력용 반도체스위치를 사용하고 초전도 코일로 한류하는 electronic inductive형 (혹은 정류형, bridge형) [4-5], 등의 다양한 디자인이 제안되어왔다. 그 중 현재 상업화를 지향하며 연구개발되고 있는 것은 저항형과 포화철심형 정도이다. 나머지 방안들은 그 나름대로의 전류제한 특성을 보임에도 후속 연구개발이 이루어지지 않고 있다.

이런 세계적인 추세에 있어 개발방안에 대한 선택은 각각의 방안에 대한 조건과 성능구현 능력 등이 연관되어 있다. 예로서, 어떤 종류의 초전도체를 사용하는지, 그런 초전도체를 원활하게 조달할 수 있는지, 크기와 무게, 열부하, 경비 등 많은 조건을 만족시키는 과정에서 선택이 이루어진다. 그런 의미에서 저항형과 포화철심형은 아직까지 장점이 유지되고 있는 형태이다. 추후 다른 방안이 있을 수 있음은 물론이다.

이 중 국내에서 독창적으로 창안된 하이브리드 방식은 상기 저항형에 기반을 두고 있으면서, 상전도 스위치의 보조를 받고 있고, 상전도 리액터로 한류하는 특징이 있다 [9-10]. 이 방식은 그러나 순수 저항형에 비해 다소 느린 전류제한 특성을 보인다. 그럼에도 스위치를 사용함에 의한 초전도체량 축소, 장시간 한류능력 등 순수 저항형에서는 구현 불가능한 성능을 보이기 때문에 나름대로의 활용 영역을 기대할 수 있다.

국내 전력계통의 고장전류 상황은 미국, 유럽 등 선진국에 비해 심각하며, 특히 154 kV 주변압기 용량증대와 관련하여 한류기의 적용은 현안문제로 부각되고 있다. 그러나 고장전류 제한 과정에서 요구되는 조건은 대단히 엄격하다. 이런 조건을 만족시키면서도 국내 계통에서 한류 역할을 담당할 수 있는 한류기의 형식을 선택하고 개발

을 진행해야 한다.

예로서, 국내 배전선로의 계통은 154 kV/22.9 kV 주변압기 용량증대에 따라 발생하는 고장전류 해소책으로 초전도 한류기를 적용하고자 한다 [11-12]. 여기서 요구되는 조건은 한류기의 개발 방향을 결정하는 중요한 요소가 된다.

본 논문은 국내 전력계통, 특히 한류기의 조기 활용이 기대되는 배전전압 계통에서 초전도 한류기 적용시 요구조건을 분석하고, 그에 적절한 한류기로서 하이브리드 초전도한류기가 현재 개발되고 있는 형식 중에서는 유일한 해법임을 보일 것이다. 그리고 국내 고유기술로서의 하이브리드 초전도 한류기의 개발과, 활용 이전에 해소되어야 할 쟁점을 설명하고자 한다.

## II. 국내 154 kV 주변압기 용량 격상과 초전도 한류기 활용 배경

국내의 전력계통은 우선 선로가 짧고, 좁은 면적으로 인한 높은 전력밀도, 민원에 따른 송전선로와 변전소 설치 및 확장의 어려움, Y - Y 결선에 따른 지락고장의 빈도 등 여러 가지 면에서 미국, 유럽, 일본 등 선진국의 전력계통과 차별된다.

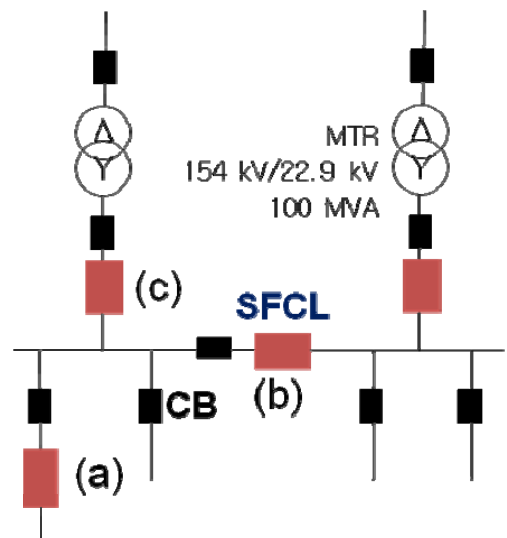


Fig. 1. SFCL application in the 22.9 kV grid. (c) is the recommended installation position.

그 중 특히 중요한 사항은 공간의 제약과 그에 따른 선로 증설의 어려움이다. 이런 제약하에서 수요증대에 대처하는 방안으로 변전소 증설 대신에 154 kV/22.9 kV 주변압기 용량 격상(60 MVA → 100 MVA)이 추진되고 있다 [11-12]. 이 용량 격상은 그러나 고장전류 증대를 야기하였고, 그 해법으로 초전도 한류기의 적용을 요구하게 되었다 (Fig. 1. 참조).

일반적으로 22.9 kV에서 초전도 한류기의 적용은 feeder 보호용, 모선 연계용 및 주변압기 보호용 등이 있으나, 상기 주변압기 용량증대와 관련되어 요구되는 한류기는 주변압기 보호용으로, 정격 전압/전류가 22.9 kV/3 kA이다.

### III. 초전도 한류기 성능 조건 및 관련 쟁점

#### 1. 주변압기 용량 격상에 따른 초전도 한류기 요구조건 및 한류기 형식

주변압기 용량 격상에 따라 고장전류 해소책으로 한류기가 설치되지만, 이 경우 초전도 한류기가 가져야 할 많은 조건이 있으며, 그 중 아래의 사항은 특히 중요하다. 그 중의 하나는, 우선 옥내 변전소 수용을 위해 크기에 제한을 두고 있다. 현재의 공간을 고려하여 25.8 kV C-GIS의 2배 크기로 제한하고 있거니와, 이는 (1) 한류기의 크기를 폭 1.2 m × 길이 2.4 m × 높이 2.5 m 이하로 제한하는 것이다. 더하여, (2) (차단기 1차 차단 실패시 후비보호에 의해 2차 차단이 이루어지기 까지) 한류기는 최소 1.5초 동안 차단기 도움 없이 한류성능을 구현할 수 있어야 한다. 그리고 (3) 가급적 재폐로 요구를 만족시키는 성능 등이다 [11-12].

이러한 요구조건을 현재 개발되고 있는 한류 형식에 비추어 분석해 보면 순수 저항형과 포화철심형 모두 요구조건을 만족시키지 못함을 알 수 있다. 우선, 포화철심형은 그 크기 제한에서 불가하다. 그리고 저항형 또한 대량의 도체를 사용함으로 인해 냉각설비의 대형화를 피할 수 없다. 더욱이, 중요한 사항은 한류 지속시간 조건이다. 저항형 한류기는 초전도체 쿨링 후 열발생을 시작하는데, 약 5 ~ 7주기에 소자온도 300 K 이하 되도록 설계된다 [13-14]. 이 후는 차단기가 전력을 차단하여 한류기를 보호하는 것이 순서이다. 그러므로 차단기 동작 없이 한류시간을 1.5초 이상으로 하면 초전도체의 열발생이 과다하여 손상이 불가피하다. 한편, 저항형 한류소자는 회복에 약 2초 이상이 소요된다 [15]. 그러므로 순수 저항형은 장시간 한류 및 재폐로 모두에 대해 부적절하다. 포화철심형 또한 철심포화 해제시 초전도 코일의 에너지 방출 시간 문제로 재폐로는 어렵다 [7].

#### 2. 저항형 초전도 한류소자 - 차단스위치 결합 : 하이브리드 방식의 장단점

상기 조건을 충족시키면서 저항형을 유지하는 방안이 저항형 초전도 한류소자와 차단 스위치를 연계시키는 것이다. 초기 고장 감지를 초전도체가 담당하고, 차단스위치가 고속으로 전력선을 차단하여 전류를 병렬인 리액터 (혹은 리미터) 회로로 우회시켜 한류하는 방식이다 [6]. 이 방식을 사용하면 초전도체는 고장감지 및 전류 bypass만 담당하므로 도체량이 파격적으로 감소하고, 따라서 기기 크기가 작아진다. 그리고 리액터가 한류하므로 한류시간이 최대 2초까지 가능하게 설계될 수 있는데, 이는 초전도체 온도상승과 무관하다. 그리

Table 1. Major requirements of a SFCL in the domestic 22.9 kV grid and technically possible SFCL types.

항목	국내 배전 계통의 요구 조건/권장 사항	가능한 초전도 한류기 형식
한류 지속성	1.5초 이상	하이브리드방식/포화철심형
크기	최대 22.9 kV C-GIS 2배 크기	하이브리드방식
재폐로	0.3 s 재폐로	하이브리드방식
순간 고장 대처	아직 없음 (능동 동작 기능 권장)	포화철심형/하이브리드 방식

Table 2. Summary of performance and restriction comparison for 3 SFCL types.

방식	특징	사용시 제약	비고
순수 저항형	초고속 한류 (반주기내한류)	고장 후 0.1 s 이내 CB 동작 필수	0.1 s 이상의 한류 곤란
하이브리드 방식	자체 차단스위치, 리액터 한류	고장 후 첫 1/2 주기 불완전 한류	반주기후한류형에 적절
포화철심형	즉시 한류, 즉시 회복	포화 방지를 위해 거대 철심 소요	소형화 곤란

고 초전도체에 입력되는 에너지가 작아 온도상승이 작으므로 회복이 빨라 재폐로 성능을 구현할 수 있다.

이런 장점에 더하여 단점도 있다. 하이브리드 한류기 중 가장 가능성이 높은 형식이 반주기후 한류형인데 [9, 10], 이 경우 고장 직후 첫 1/2 주기 동안 한류가 불완전하다는 것이다. 초전도체 쿨링 후 즉시 차단스위치가 열리지만, 스위치의 아크 소호가 전류 0점에서 이루어지므로 그 때까지 한류가 지연된다. 그러므로 고장 후 1/2주기 동안 해당 전력선 및 전력기기들은 열 및 전자기력에 의한 충격을 감내해야 한다.

그러므로 이러한 장점 및 단점을 현장이 여하히 받아들이는가가 활용 여부를 결정하게 될 것이다. 실제 현장의 판단에 의하면, 국내 계통은 고장 후 첫 1/2주기동안의 불완전한 한류를 수용할 수 있을 정도로 튼튼하게 구성되어 있다. 예상되는 최대 고장전류가 기존에 허용되던 최대 고장전류의 약 130% 이내이므로 현재 선로 및 기기의 안전 마진 하에서 초기 1/2주기 정도의 열 및 전자기적 충격으로 허용할 수 있다는 판단이다. 그러므로 반주기후한류형으로 작고, 장시간 한류 성능을 유지하며 재폐로 가능한 한류기로 유일하게 하이브리드 초전도 한류기 방식이 채택된다.

#### IV. 국내의 대응 방안 : 하이브리드 초전도 한류기 개발

하이브리드 초전도 한류기는 반주기후한류형일 경우 상기 국내 전력계통이 요구하는 크기 문제,

한류 지속시간 문제, 그리고 재폐로 문제를 일시에 해결한다. 그리고 반능동 동작(semi-active control)까지 제공한다. 단점으로, 자체 차단스위치를 사용함에 의해 고장 후 첫 1/2주기 동안 한류가 불완전하다는 점이 지적된다. 해당 계통이 이러한 첫 1/2주기 불완전 한류를 감내할 수 있다면 가장 이상적인 선택이 될 것이다.

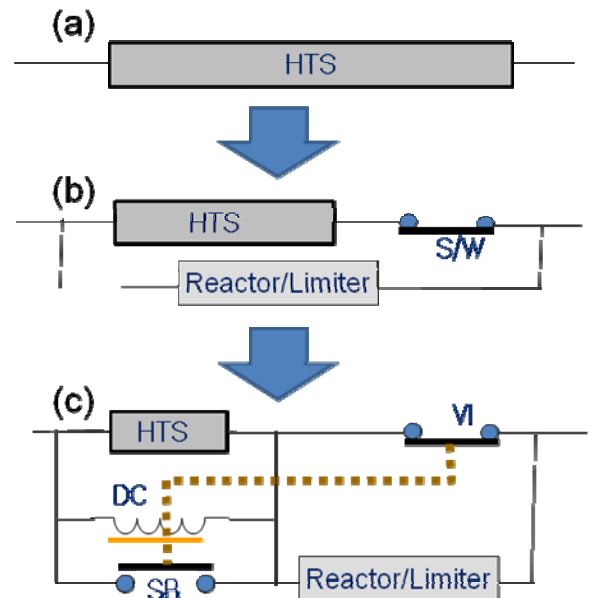


Fig. 2. Design innovation of resistive SFCLs. (a) conventional resistive type, (b) hybrid type with a conventional breaker, (c) hybrid type with a fast switch

하이브리드 초전도 한류기의 열개가 그림 2에 있다. 그림에서 HTS는 고온초전도체 한류소자를 뜻한다. 그림 2(a)는 기존 저항형 한류기로서 초

Table 3. Comparison of parameters between conventional and hybrid SFCLs (The estimation is for an SFCL with ratings of 22.9 kV/630 A 3 phase. HTSs are YBCO stripes having 60 V/120 A ratings per stripes.)

Item	Conventional resistive SFCL	Hybrid SFCL (1 <sup>st</sup> peak NON-limiting)
Limiting speed	Fastest	Delayed by about ½ cycle
YBCO stripes	6 parallel × 240 series × 3 φ = 4320	6 parallel × 6 series × 3 φ = 108 stripes
Cryostat	Large	Small
Recovery time Reclosing?	≥ 2 s NOT available	≤ 0.3 s Available
Reactor/breaker	(None)	Reactor (limiter) + FS
Endurance time	50 ~ 110 msec	1.5 ~ 2 sec
Active control	Passive only	Semi-active possible
Size/Cost	Large/High	Small/Low
Problems	Large HTS, size, cost,...	1 <sup>st</sup> peak fault energy

전도체만으로 고장감지 및 한류를 모두 담당한다. 그러면 대량의 초전도체가 소요되므로, 이를 변경한 것이 그림 2(b), 즉 초전도체 - 차단스위치를 직렬하고 한류리액터를 병렬연결한 구조이다. 초전도체가 켜치되면 일정 시간 이후 차단기가 선로를 차단하므로 초전도체에 열유입이 줄고 온도 상승이 억제된다. 그리고 한류는 리액터가 담당하는 구도이다. 이 방안은 그러나 초고속 차단스위치 개발을 전제로 하는 바, 일반 3주기 차단스위치 사용시는 그 장점을 충분히 보이기 어렵다.

그림 2(b)의 구도에서 차단스위치 문제를 해소한 것이 국내에서 착안된 하이브리드 방식의 고속스위치(Fast Switch, FS)이고, 그림 2(c)는 그 열개이다. 구조를 보면, 진공차단기 (vacuum interrupter, VI), 구동코일 (Driving coil, DC)과 단락접점 (short bar, SB)이 기계적으로 연결되어 있어 동시에 움직인다. 이 고속스위치는 고장전류 그 자체의 에너지를 사용하여 차단스위치를 개방하며, 고장 후 2 ms 이내에 개방을 완료한다. 그러나 전극간 아크 소호 때문에 실제 선로변경은 전류 0점에서 이루어지므로 이 방식이 반주기후 한류형에 적합하다는 것이다.

그림 2(c)의 방식은 반주기후한류형으로 국내 초전도 한류기의 최초 활용을 위한 방식으로 적합하다. 이 방식은 초전도체의 파격적인 축소에

의해 제작비 절감 및 크기 축소를 가능케 하였다. 또한 초전도체 켜치 후 전류가 보조회로로 분류되어 VI를 동작시키면 즉시 SB가 닫혀 초전도체를 고립시키는데, 그 시간이 1 ~ 2 ms에 불과하여 초전도체에서 발생하는 열 에너지를 극소화시킨다. 그러므로 초전도체의 온도 상승이 100 K 이하로 유지되고, 회복시간이 300 ms 이하, 과냉각 액체질소에서는 50 ms 정도로서 충분히 재페로 동작을 가능케 한다 [16-17]. 더하여, VI를 능동적으로 close할 수 있으므로 반응동기능을 추가할 수 있다.

## V. 추가 쟁점 및 활용 계획

이상과 같이 국내 배전계통에서 발생한 한류기 수요에 있어 한류기 성능 관련 가장 중요한 요소를 분석하고 그에 맞는 하이브리드 한류기를 제안하였다. 그러나 실제 활용시까지 준비해야 하는 더 많은 쟁점이 있다. 여기서는 그 중 초기에 풀어야만 하는 사항들에 대해 논의할 것이다.

### 1. 보호협조 문제

우선 다른 보호기기와의 보호협조 문제가 해소되어야 한다. 이를 위해 한류기의 한류저항의 크

기도 제한 받는다. 또한, 다른 차단기 등과 협조를 위해서는 실시간 통신이 바람직하지만, 이는 특히 meshed network된 계통에서는 막대한 투자비를 요구하는 사항이다. 한류기 활용 관련 새로운 보호체계를 확립하기 위해 현재 가장 중점적으로 연구되고 있는 부분이다.

## 2. 부분 능동 동작

초전도 한류기는 고장전류에 대해 자동적으로 반응하는 수동소자이다. 이런 성능은 일견 오동작의 위험이 없어 바람직하지만, 한편으로는 불필요한 반응에 대해 보완 방안을 불가능하게 한다. 문제는 초전도체의 켄치가 고장전류에 대해 무척이나 민감하여 아주 짧은 일시적 고장에 대해서도 불필요하게 한류기를 동작시킬 수 있다는 점이다 [18]. 이에 대비하여 부분 능동 동작이 바람직하거나, 하이브리드 초전도 한류기의 또 하나의 장점이 된다. 지속적이지 못한 고장전류, 예로서 1/2주기 정도의 짧은 고장의 경우 초전도 한류기가 동작하겠지만, FS를 제어함으로써 조기에 원상태로 복귀시킬 수 있다.

## 3. 장기운전 신뢰성, 교육 및 훈련

초전도 전력기기의 신뢰성을 결정하는 가장 중요한 요소는 저온장치의 운전이다. 전력기기는 대략 30년, 적어도 20년의 수명을 가져야 하는데, 저온장치를 이정도 장시간 정지 없이 운전한 경험이 없다. 주기적, 예로서 3년 주기로 정비 기회가 있을 것이지만, 예방정비만으로 어느 정도의 수명을 가질지, 3년 정도의 무정지 운전이 보장될지에 대한 확실한 경험이 축적되어야 한다. 또한, 현장 운전원들에게 극저온 냉동기에 대한 경험의 거의 전무하므로 이에 대한 교육과 훈련이 필요하다.

## 4. 정비 계획

상기 장기 운전과 관련하여 어떠한 정비 계획이 있어야 하는지, 정비 지침은 어떠한지에 대한 대책이 선결되어야 한다. 정비는 주로 극저온장치와 관련 되겠지만, 초전도체의 보관, 교체 및 정비도 중요한 연구 분야이다.

## 5. 진단

정비와 관련된 또 하나의 중요한 연구분야는 진단(diagnosis)이다. 초전도체의 열화 여부를 판정하는 방안, 극저온장치의 수명을 예측하는 방안, 각 부품의 열화 문제 파악 등 지속적으로 연구되어야 할 대상이다.

## 6. 오동작시의 후속 조치 방안

초전도 한류기가 보호기기이면서 선로에 직렬로 연결되므로 절대 안전해야 하지만 기계이므로 오동작의 가능성이 있다. 그러므로 불가피하게 오동작이 발생할 경우에 대한 대비책이 준비되어 있어야 한다.

우선은 상시 운전시 한류기가 이상 동작을 보이는 경우이다. 이는 주로 냉동기의 고장에 있으며, 가능성은 적으나 초전도 소자의 열화도 오동작할 수 있다. 이 경우 상시 개방되어 있는 스위치를 병렬로 설치할 수 있으나, 그 동안 한류기능이 없어지는 문제가 있다.

한편, 초전도 한류기가 고장시 오동작할 수도 있다. 예로서 차단스위치가 개방에 실패할 경우, 초전도체가 파손될 경우 등 이론적으로 가능한 오동작에 대해 대안이 제시되어야 한다.

## 7. 기타

이렇게 여러 가지 가능한 시나리오는 일시에 풀리기에는 너무 어려울 수 있으므로 필경 장시간의 사용과 경험, 그리고 시행착오를 거치면서 문제가 해결될 가능성이 높다.

이상과 같이 분석된 자료를 바탕으로 22.9 kV, 630 A를 정격으로 하는 초전도 한류기가 제작되었고, 이어 한전의 고창시험장에 설치 및 장기 운영에 들어갈 예정이다. 이 시험에서 장기운전의 노하우를 축적하고, 보호협조 방안을 확보하기를 기대하고 있다. 이 시험이 종료에 맞추어 22.9 kV, 3 kA급 초전도 한류기를 개발하여 실선로 시험을 수행할 예정이다. 이 시험이 성공리에 종결되면 실제 상업화 운전용으로 초전도 한류기 활용이 시작될 것으로 보인다.

## V. 요약

초전도 한류기는 가장 우수한 한류성능을 갖고 있음이 확실하나, 해당 사용처의 요구에 따라 그 사양이 변경된다. 주요 관심사항은 초전도체의 부피, 한류기의 크기, 한류성능과 회복시간, 한류지속가능시간 등이 있다.

국내에서는 주변압기 용량격상에 따른 고장전류 해소책으로 한류기의 요구가 발생하였다. 이 경우 주요 한류기 요구조건으로서 크기, 차단기 도움 없이 한류 지속가능 시간, 재폐로 성능, 능동동작 요구 등이 있다. 이를 충족시키는 한류기는 기존 순수 저항형으로는 불가하다. 국내에서 개발된 하이브리드 초전도 한류기 방식, 기계적 스위치를 사용하는 선로변경식 하이브리드 초전도 한류기가 현재 가장 유용한 디자인으로 사료된다.

그럼에도 실제 활용시까지 많은 문제가 해결되어야 하는 바, 보호협조 문제, 부분 능동소자로의 보완, 장기운전시의 신뢰성, 정비계획, 진단 방안, 오동작시 대처 방안 등에 대해 적절한 대책이 확보되어야 할 것이다.

현재 상기 하이브리드 방식으로 22.9 kV, 630 A 급을 제작하고 운용시험을 시작할 즈음이며, 추후 22.9 kV, 3 kA급을 개발 및 시험을 거쳐 실제 상업운전으로 진행될 것이 예상된다.

## Acknowledgments

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

## References

- [1] M. Chen, W. Paul, M. Lakner, L. Donzel, M. Hoidis, P. Unternahrer, R. Weder, M. Mendik, "6.4 MVA Resistive Fault Current Limiter Based on Bi - 2212 Superconductor", *Physica C* 372 - 376, 1657 - 1633 (2002).
- [2] Ok-Bae Hyun, Hye-Rim Kim, Jungwook Sim, Young-Ho Jung, Kwon-Bae Park, Jong-Sung Kang, B. W. Lee, Il-Sung Oh, "6.6 kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Based on YBCO Films", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, No. 2, 2027-2030 (2005).
- [3] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz, M. Noe, "CURL 10: Development and Field-Test of a 10 kV/10 MVA Resistive Current Limiter Based on Bulk MCP-BSCCO 2212", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, No. 2, 1955 - 1960 (June 2005).
- [4] T. Yazawa, Y. Ootani, M. Sakai, T. Kuriyama, S. Nomura, T. Ohkuma, N. Hobara, Y. Takahashi, K. Inoue, "Development of a 66 kV / 750 A High - Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, Vol. 14, No. 2, 786-790 (2004).
- [5] L. F. Li, *et al.*, "Field Test and Demonstrated Operation of 10.5 kV/1.5 kA HTS Fault Current Limiter", *IEEE Trans. Applied Supercond.* Vol 17, No. 2, 2055-2058 (June 2007).
- [6] Ying Xi, *et al.*, "Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters", *IEEE Trans. Applied Supercond.* Vol. 17, No. 2, 1760 - 1763 (June 2007).
- [7] Y. Xin, W. Z. Gong, X. Y. Niu, Y. Q. Gao, Q. Q. Guo, L. X. Xiao, Z. J. Cao, H. Hong, A.G. Wu, Z. H. Li, X. M. Hu, B. Tian, J. Y. Zhang, Y. He, Y. Wang, J. Cui, S. Z. Ding, J. Z. Wang, A. L. Ren, and F. Ye, "Introduction of 35kV/90MVA live-grid operated superconductive fault current limiter", (preprint, submitted to Applied Superconductivity Conference 2008).
- [8] M. Noe and M. Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status", *Supercond. Sci. Technol.* 20, R15 - R29 (2007).
- [9] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G. Lee, H. R. Kim, and O. B. Hyun, "Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters", *IEEE Trans. Applied Supercond.* Vol. 18, No. 2, 624-627 (June 2008).

- [10] 심정욱, 현옥배, 박권배, 임성우, 김혜림, 이방욱, 오일성, "전력용 반도체 소자를 적용한 하이브리드 초전도 한류기 동작 신뢰도 향상 방안", 한국초전도-저온공학회논문지 9권(3), 57 - 61 (2007. 9).
- [11] "154 kV 주변압기 용량 증대 추진 방안", 한국전력공사 송변전건설처 (2006. 9).
- [12] "22.9 kV 초전도 한류기 현장적용을 위한 TFT 구성", 한국전력공사 송변전처 (2007. 3).
- [13] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim, Ok-Bae Hyun, "Resistance of superconducting fault current limiters based on  $YBa_2Cu_3O_7$  thin films after quench completion", Physica C 372-376, 1606 - 1609 (2002).
- [14] Seong Eun Yang, *et al.*, "Manufacture and Test of the Bifilar Wound Coil Using Coated Conductor with Stainless Steel Stabilizer", IEEE. Trans. Applied Supercond. Vol. 17, No. 2, 1867 - 1870 (June 2007).
- [15] H.-R. Kim, S.-W. Yim, S.-Y. Oh, and O.-B. Hyun, "Analysis on Recovery in Au/YBCO Thin Film Meander Lines", Prog. Supercond., Vol. 9. No. 1, pp. 119 - 125 (31 October 2007).
- [16] S.-W. Yim, H.-R. Kim, O. -B. Hyun, J. Sim, "Quench and recovery characteristic of Au/YBCO thin film type SFCL", Physica C 463-465, 1172 - 1175 (2007).
- [17] Hye-Rim Kim, Seong-Woo Yim, Sung-Yong Oh, and Ok-Bae Hyun, "Recovery in Superconducting Fault Current Limiters at Low Applied Voltages", IEEE. Trans. Applied Supercond. Vol. 18, No. 2, 656 - 659 (June 2008).
- [18] S. Nishimiya, T. Ishigohka, and A. Ninomiya, "Quench Characteristics of Superconducting Transformer by Inrush Current", IEEE. Trans. Applied Supercond. Vol. 17, No. 2, 1931 - 1934 (June 2007).