

배전급 전류제한 장치 효과 분석 및 도입 방안

이방욱, 박권배, 김호민, 오일성
LS산전(주) 전력연구소

Effects of distribution fault current limiting apparatus and emerging applications

B. W. Lee, K. B. Park, H. M. Kim, I. S. Oh
Electrotechnology R&D Center, LS Industrial Systems

Abstract - For limitation and interruption of short circuit currents from low voltage to extra high voltage applications, the electrical equipment including fuses and circuit breakers, are widely used today. But in order to anticipate increasing needs for effective and competitive device for limiting the growing fault current in electrical power systems, fault current limitation technologies and fault current limitation devices are widely introduced and investigated in these days.

Fault current limiters are emerging electric equipment which is under development using various methods including superconducting fault current limiter, solid state fault current limiter, arc driving fault current limiters. And these various methods have some advantages and disadvantages to take into considerations

In order to commercialize fault current limiters in the electrical networks, a lot of discussions should be given on the point that fault current limiting methods, need for fault current limiters, coordination with existing protective system, and field experience before commercialization. In this paper, recent trends of fault current limiting technologies will be reviewed and the key issues of superconducting fault current limiters will be dealt with. And finally, future applications of superconducting fault current limiters would be discussed.

1. 서 론

최근 전력수요의 폭발적인 증가에 따라 전원설비와 송전전계통의 지속적인 증설이 이루어져 전력계통의 등가임피던스는 점점 작아지고 있다. 이로 인하여 전력계통 사고발생시 고장전류의 크기는 계속 커지고 있는 실정이다.

특히 우리나라의 경우 외국에 비하여 송전선로가 상대적으로 짧고, 변전소간을 연결하는 연계 송전선로가 망상형태(Mesh Network)로 되어 있어 송전계통의 고장전류가 기존 차단기의 차단내력을 상회하는 변전소가 많이 나타나고 있다. 고장전류가 차단기의 차단내력을 상회하게 되면 고장발생시 고장전류를 안정적으로 차단할 수 없게 되어 차단기는 물론 인접 전력설비까지 사고가 파급될 수 있다.

전력계통에서의 한류기(Fault Current Limiters)의 역할은 계통사고로 인한 고장전류 발생시 부스바(busbar), 애자, 차단기 등에 가해지는 기계적, 열적, 전기적 스트레스를 제한시키는 것이다. 하지만 실제적으로 계통에 적용 가능한 한류기술의 개발은 기술적 어려움과 상업화의 난점으로 인해 그 기술적 필요성에도 불구하고 지연되어 왔다.

한류기는, 전력계통에 직렬로 연결되어, 단락사고시에 임피던스를 발생시켜, 고장전류를 제한하는 기기로서, 단락전류증대에 대한 대책으로써 뿐만 아니라 전력계통의 신뢰성 및 전력공급의 연속성 측면에서 봤을 때 주목받고 있는 기기이다. 현재 상용화되어 있는 한류기로서는 저압계통에 적용되어 단락전류 제한 역할을 수행하는 PTC 한류기가 있지만 그 사용빈도는 높지 않은 실정이며, 고압 계통에 적용가능한 한류소자로는 1회성이지만 많이 사용되고 있는 한류퓨즈, 그리고 Is-limiter와 같은 대용량 한류차단기가 있다. 하지만 한류퓨즈는 상시 통전전류가 수백 A에 불과하여 고압 대전류 시스템에 적용이 불가하며, Is-limiter와 같은 대용량 한류기도 개발되어 있지만, 동작후엔 반드시 점접 및 주요부위를 교체해야 된다는 문제 및 기존 차단기에 비해 상당히 비싼 가격으로 인하여 폭넓게 사용되지는 못하고 있다. 또한 위의 기기들은 향후 초고압 계통에서는 사용이 불가능하여, 새로운 한류기술들이 개발되고 있는데, 그것은 전력용 반도체를 이용한 한류기, 고온 초전도 소자를 이용하는 한류기, 전자반발력 및 아크 분리등을 효과적으로 이용하는 한류기, 또는 위의 기술들을 혼합한 복합형 한류기 등이 개발되고 있다. 표 1은 전력계통의 단락전류를 제한하기 위해 사용되는 한류기술의 종류 및 적용 방식을 보여주고 있다. 여기서 주목할 것은 'passive' 방식은 전력계통의 토폴로지를 변형하여 계통에 상시 임피던스를 주어 단락사고시 이 임피던스를 이용하여 단락사고 크기를 제한하는 방식이며, 'active' 방식은 새롭게 개발되고 있는 한류기기술을 이용하는 방식으로서, 정상운전시에는 계통에 임피던스를 부여하지 않고 있다가, 사고시 비선형적으로 임피던스를 계통에 직렬로 부가하는 방식이다.

<표 1> 전력계통 단락전류 제한을 위한 한류기술의 분류

<p>Passive Increase of impedance at nominal and fault conditions</p> <ul style="list-style-type: none"> • Splitting of grids • Splitting of busbars • Introduction of higher voltage levels 	<p>Active Small impedance at nominal load and fast increase of impedance at fault</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transformers with increased size • Fault current limiting reactors • High-voltage current limiting fuses • L-Limiters
<p>Topological measures</p>	<p>Apparatus measures</p>

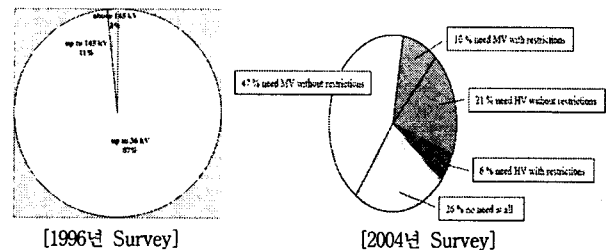
본 논문에서는, 현재 세계적으로 개발이 활발히 진행중인 한류기를 배전급 레벨을 중심으로 살펴보고자 한다. 왜냐하면 현재 개발중인 기술들이 우선적으로 배전급을 목표로 개발되고 있기 때문이다. 그리고 이러한 한류기가 개발 완료되었을 때 상용화 및 계통 적용을 위해 필요한 요소들이 어떤 것이 있는지 분석하고자 한다. 그리고 마지막으로 배전급 한류기들이 개발되면 전력계통 어떤 부분에 우선적으로 적용 가능한지도 검토하고 그 적용 효과에 대해 알아보려고 한다.

2. 배전급 한류기 개발 현황

2.1 배전급 한류기 Needs 분석

일반적으로 전력계통에서 단락전류 억제가 시급히 필요한 분야는 100kV급 이상 초고압 계통으로 여겨지고 있지만, 배전급 계통에서도 한류기에 대한 필요성은 꾸준히 제기되고 있다. 특히 전력계통이 원격지 대규모 송전방식에서 수요자 중심의 전력공급 방식으로 바뀌는 추세로, 분산전원 및 기타 소규모 전원들의 증설이 급격히 이루어지고 있는 시점에서, 배전급 단락전류도 꾸준히 증가하고 있어 그 제한 필요성이 대두되고 있으며, 전력공급의 연속성 및 신뢰성 측면에서 단락사고 지속시간을 최소화해야 할 필요성에 이러한 배전급 한류기가 잘 부합할 수 있다고 사료된다.

그림 1은 국제 대전력 전문 학회인 CIGRE에서 조사한 자료로서, 전력계통 수요자를 대상으로 한류기의 전력계통 적용 전압 class에 관해 설문조사한 자료로서, 1996년 설문 자료와, 2004년 설문 자료를 비교해 놓았다[1].



<그림 1> 전력계통 전압 Class에 따른 한류기 필요성

그림 1에서 보면 1996년 시점에는 80% 이상이 36kV 이하 배전급 한류기의 필요성에 대해 언급했고, 상대적으로 초고압 한류기에 대해서는 필요성이 미미했지만, 2004년 설문조사에서는 21% 정도 초고압 한류기의 필요성에 대해 인정하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 1996년 당시보다 초고압 계통의 단락전류 증가 및 한류기의 개발 가속화에 따른 상용화 가능성 증대로 인한 결과로 사료된다. 또한 배전급 한류기에 대해서는 여전히 47% 정도가 한류기의 필요성에 대해 인식하고 있는 것을 알 수 있다.

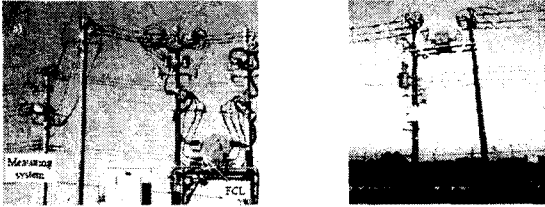
2.2 배전급 한류기 개발 동향

배전급에 적용 가능한 한류기로서는, 아크분할 및 전자반발력을 이용한 한류기, 전력용 반도체를 이용한 한류기, 전력용 퓨즈를 적용한 한류기,

초전도 응용 한류기, 복합형 한류기 등이 있다. 각 한류방식의 주요 특징 및 개발현황에 대해 살펴보고자 한다.

2.2.1 아크 저항방식 한류기

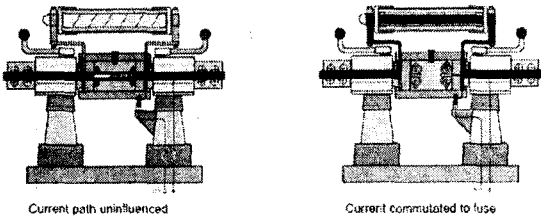
단락사고시 발생하는 아크를 효과적으로 분할하여 아크 전압을 급격히 상승시켜 단락전류 상승을 제한하는 한류기는 일본 전력중앙연구소와 Tohoku Electric에서 개발하였으며, 1998년부터 2년여의 실증 시험을 완료한 상태이다. 이 한류기는 7.2kV/400A급으로서 15kA이하의 단락전류를 2.5kA정도로 3ms 이내 한류하는 성능을 갖고 있다[2]. 하지만 단락전류 제한 용량이 상대적으로 작고, 인가전압이 더 커질 경우에는 한류성능이 급격히 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 Kyushu Electric에서는 진공아크 전류방식을 적용한 한류기를 2002년 개발완료하였다. 본 한류기는 24kV/400A 용량이며 삼상으로 구성되고 배전선 전주에 설치가능하게끔 제작되어 있다. 이 한류기는 12.5kA의 단락사고를 20ms이내에 2kA 정도로 한류하는 성능을 가지고 있다. 이 진공아크 전류방식 한류기 또한 단락전류 제한 용량이 크지 않아 실용화에는 걸림돌이 될 수 있다.



[6.6kV 아크 구동방식 한류기] [24kV 진공아크 전류방식 한류기]
<그림 2> 아크 저항방식 한류기 실증시험

2.2.2 퓨즈 방식 한류기

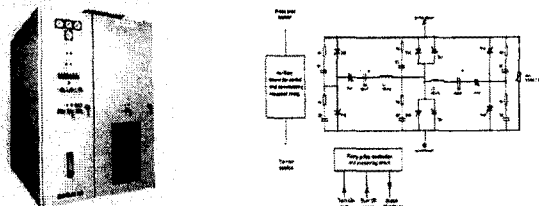
고압 퓨즈는 통전 용량이 300A 미만이므로 배전 전류가 큰 계통에서는 사용할 수가 없다는 단점이 있다. ABB에서는 Is-limiter라는 제품을 개발하였으며, 통전전류는 수천 A, 전압용량은 0.75kV에서 40kV, 단락전류제한 용량은 150kA까지 가능하다. 본 한류기는 사고전류를 생성하는 감지부, 주회로 통전부, 한류작용을 하는 병렬 퓨즈로 구성되어 있다. 본 한류기는 매우 우수한 성능을 가지고 있지만, 가격이 상당히 비싸고, 단락전류 센싱 및 처리의 민감성, 사고처리 후 퓨즈 및 주점점의 교환이 필요하다는 단점을 가지고 있지만, 발전기 보호용이나 분산전원 연계용으로 전세계적으로 3,000대 이상의 판매 실적을 가지고 있다[3].



<그림 3> ABB Is-Limiter

2.2.3 전력용 반도체 응용 한류기

반도체 기술이 발전함에 따라, 전력용 반도체를 이용한 단락전류한류기 차단 기술에 대한 관심이 커지고 있다. 전력계통에 적용가능한 반도체로서는, Thyristor, GTO, IGBT, IGCT 등이 있으며, Siemens, EPRI, Nissin Electric 등에서 전력용 반도체를 이용한 한류기기술의 실용화에 앞장서고 있다. 전력용 반도체를 이용한 한류기는 단락사고를 수백 μs 이내에 제한 가능하며, 단락전류 한류 및 차단시 무소음, 무아크 유지 보수의 간편성 등으로, 향후 기존 차단기에 비해 가격 경쟁력을 갖춘다면 그 시장이 크게 확대 될 것으로 예상된다[4].



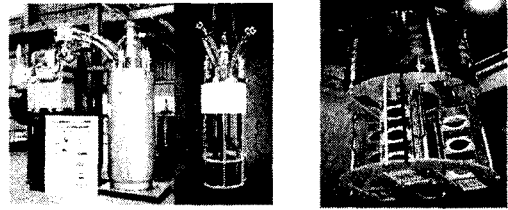
[6.6kV급 FC (Nissin)] [배전급 Thyristor FCL (EPRI)]

<그림 4> 전력용 반도체 적용 한류기

2.2.4 고온 초전도 응용 한류기

초전도체는 전력손실 없이 전류통전이 가능할 뿐만 아니라, 일정 전류 이상에서는 켄치되어 상전도 상태로 전이하여 저항을 발생하는 이상적인

비선형 소자이다. 이 초전도를 이용한 한류기 제작은 세계 각국에서 활발히 연구되고 있는데, 현재 10kV/800A급 초전도 한류기가 독일에서 개발되어 실증시험을 2004년 마친 상태이다. 초전도 한류기는 이상적인 한류기로서의 특징을 가지고 있지만, 초전도체의 가격, 냉각 비용, 극저온/고전압 기술 등의 해결 과제를 가지고 있다. 또한 전력계통 적용시의 제로로 조건을 만족 하기는 상당히 난해하여, 기술적 해결방안이 요구되고 있다.



[10kV급 초전도한류기(Nexans)] [6.6kV급 초전도한류기(LS산전)]
<그림 5> 아크 저항방식 한류기 실증시험

2.2.5 복합형 한류기

한류기기술의 상용화의 가장 큰 걸림돌은 신뢰성 및 가격, 기존 전력기기와의 보호협조 문제이다. 이를 해결하기 위해서는 기존에 검증된 전력기기와의 융합을 통해 이질성을 최소화하는 것이 중요하다. 복합형 한류기는 이런 문제를 해결하기 위한 방안으로, 초전도체, 반도체 소자, 기존 전력용 차단기, 퓨즈와의 융합 기술을 추구하는 것이다. 이러한 방식은 Swiss 공대, 일본 전기 대학, ABB 등에서 시도되고 있으며, 국내에서는 LS산전이 연구 개발을 진행하고 있으며, 조만간 배전급 시제품이 개발될 것으로 예상된다. 본 복합형 한류기의 특징은 신기술을 적용한 한류기, 즉 초전도체나 반도체만을 사용하는 한류기에 비해 굉장히싼 가격으로 제작이 가능하며, 신뢰성을 갖추고 있으며 계통 제로로 문제 해결도 가능할 것이다.

3. 배전급 한류기 적용성

배전급 한류기의 적용 개소로서는 Is-limiter의 적용 사례가 참조될 수 있다. Is-limiter의 주요 적용 개소는 크게 세가지이다. 첫째는 배전급 계통의 Bus-tie 연계용이다. 둘째는, 발전기 보호용으로 사용이 가능하며 중요 변압기 보호용으로도 사용할 수 있다. 셋째는, 분산전원발전시스템 또는 신재생에너지 계통 연계용으로 사용 가능하다. 현재 개발중인 한류기들도 배전급에서는 위와 같은 적용 개소가 우선시 되어야 할 것이다.

또한 배전급 한류기의 적용 개소로서는, 고압 대전류 시스템이 대상이 될 수 있다. 즉 정유공장, 제지공장, 반도체 공장 등 대규모 전력을 소모하는 공장 부하 보호용으로 적용이 가능할 것이다. 향후 초전도 케이블, 초전도 변압기 계통 적용시 단락전류 억제용으로도 적용 가능하다. 향후 DC를 적용한 micro-grid 등 배전 계통 등장시 DC 전류 제한용으로 적용 가능하며, 선락용 발전기 보호 및 단락전류 제한용으로도 적용 분야가 등장하리라 예상된다.

배전급 한류기가 전력계통에 투입되기 위해서 필요한 세가지 요소를 들면 다음과 같다. 첫째, 가격 문제이다. 배전급 한류기는 최소 차단기 가격의 5배 이하로 억제되어야 한다. 둘째, 신뢰성 문제이다. 배전급 한류기는 기존 차단기와 마찬가지로 장수명 운전 및 유지 보수의 간편성이 확보되어야 한다. 셋째, 계통 보호협조 측면이다. 기존 전력계통 보호기와 협조운전이 이루어져야 하며, 적용 요소에 따라서는 제로로도 가능해야 한다. 위와 같은 조건을 만족하는 혁신적인 한류기가 등장될 때에만 비로소 배전급 한류기의 적용은 시작될 수 있을 것이다.

4. 결 론

전력계통 고장전류 대책으로 새로운 패러다임을 제공할 한류기는 여러 가지 방식으로 개발이 진행되고 있다. 하지만 상용화에 이르기까지는 넘어야 할 장벽 또한 남아있다. 한류기가 기존 전력기기 수준의 가격과 신뢰성을 가지고 개발된다면 그 시장 또한 엄청날 것으로 사료된다. 배전급 한류기의 상용화 및 전력계통 적용이 선행될 때 향후 초고압 시장의 한류기도 주목 받을 수 있을 것이다. 따라서 우선적으로 배전급 한류기의 개발 및 상용화, 실증시험을 통한 신뢰성 확보에 매진해야만이 향후 국내 뿐만 아니라 세계 전력시장을 선도할 신제품이 개발될 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] H. Schmitt et al. "Fault current limiters - applications, principles and experience", CIGRE SC A3&B3 joint colloquium, 2005
 [2] Hirota et al. "Current state and trends of fault current limiting technology", 일본 電學論 125卷 1號, 2005年
 [3] ABB catalogue, "Is limiter"
 [4] Jacek et al., "Hybrid Arcless Low-Voltage AC/DC Current Limiting interrupting Device", IEEE Trans. on PD, vol 15, No.4 2000