

전력계통 고장전류 문제와 초전도 한류기

이강완  
 대화기술단 대표 기술사

1. 서론

전력수요는 지속적으로 증가되고 있으며 이에 따라 전원설비 규모가 커져서 전력계통의 고장전류가 계속 증대되고 있다. 증대되는 고장전류를 안전하게 개폐하기 위해서는 차단기 차단내력을 크게 하거나 또는 고장전류를 기존의 차단기 차단내력 이하로 억제해야 한다. 우리나라 전력계통의 규모 확대에 따른 고장전류 현황을 파악하고 배전 전압의 초전도 한류기 개발 필요성을 알아본다. 송·배전 계통에서의 다양한 단락고장전류 억제 대책을 검토하고 단락고장전류 제한의 기준이 되는 차단기의 기본 기능을 살펴보고 고장전류 문제를 보다 효과적으로 처리할 수 있다고 기대되는 한류기의 개발과 실용에 기대를 건다.

2. 전력수급 전망과 고장전류

전력수요는 국가 경제의 발전과 국민 생활여건 향상에 따라 지속적으로 증가되고 있으며 전력수요 증가에 대응하도록 전원설비가 증대되고 여기서 발전된 전력을 수요 지점까지 보내는 송·변전 설비가 이에 부응하여 계속 확충되고 있다. 표 1은 1999년도에 수립된 장기전력 수급계획을 발췌한 것으로 이의

표 1. 장기 전력수급 계획

년도	전원설비용량 (천kW)	최대수요 (천kW)	설비예비율 (%)	수요증가율 (%)
2000	47,977	39,509	21.4	5.9
2005	60,394	51,658	16.9	4.3
2010	71,413	60,718	17.6	2.8

시설용량은 일반적으로 연중 최대수요가 나타나는 여름철 피크를 기준한 것이다.

전력계통에서 전력수요 증가로 전원설비가 증가되고 전력계통이 확충되면 계통 임피던스가 낮아져 고장전류가 증가하게 된다. 고장전류 증대에 직접 영향을 미치는 전원설비용량은 2000년을 기준하여 2005년까지 126%가 되고 2010년까지 149%로 증가될 전망이다. 반면에 오늘날 사회문제로 심각하게 받아들여지고 있는 공해 및 환경 오염의 우려로 인하여 발전소 입지 선정이 점점 어렵게 되어 현재 운전중에 있는 발전소 부지나 또는 이미 확보되어 있는 발전소 입지에 대단위 전원단지가 형성될 전망이다. 이와 같이 전원이 주어진 한정된 지역에 밀집됨에 따라 전원 지역에서 수요 지역까지 또는 지역간 대전력을 수송하기 위하여 송·변전설비를 확충하게 된다. 이로서 전원 밀집지역과 여기에 인접한 계통 변전소 등가임피던스가 작아져 고장전류 증대가 심화되고 있는 실정이다.

국내 송전전압은 765kV, 345kV 및 154kV가 3종류가 있으며 이 중에서 765kV 송전계통은 2002년을 운전 목표로 건설중에 있어 고장전류에 관련한 문제는 없는 실정이다. 반면에 전력수송의 중추 역할을 담당하고 있는 345kV 전력계통의 경우 앞으로 고장전류가 차단기 차단내력을 넘어설 것으로 전망되고 있어 체계적이고 효과적인 고장전류 저감대책 수립이 요망되고 있다. 154kV 전력계통의 경우는 일찍부터 고장전류가 차단기 차단내력을 넘어서고 있어 기존의 차단내력이 작은 차단기(31.5kA)들을 차단내력이 큰 차단기(50kA)들로 점진적으로 교체하고 있으며 아울러 이제까지 대부분 망상(Mesh)으로 구성되어있는 계통구조를 방사상(Radial) 형태로 분리하여 운전하고 있는 실정이다.

다음 표 2는 장기 송·변전설비 계획을 요약한 것이다.

표 2. 장기 송·변전 설비계획

년도	765kV			345kV			154kV		
	송전설비 (C-km)	변전소수	변전설비용량 (MVA)	송전설비 (C-km)	변전소수	변전설비용량 (MVA)	송전설비 (C-km)	변전소수	변전설비용량 (MVA)
2000	668	-	-	7,305	44	53,010	17,241	406	70,735
2005	796	4	20,000	8,256	53	65,010	20,684	532	86,440
2010	1,195	6	30,000	8,881	61	75,510	22,825	616	98,474

### 3. 송·배전계통 고장전류 현황

현재 우리나라 송전계통의 중심인 345kV 전력계통 차단기 정격차단내력은 40[kA]이다. 그러나 전원 밀집지역과 같이 전력계통 등가 임피던스가 낮은 지역에서는 고장전류가 차단기 차단내력을 초과하고 있어 대단위 전원단지를 중심으로 이미 모선분리 고장전류 억제 대책이 적용되고있으며 앞으로 증대되는 고장전류에 대응하여 고가인 차단내력 63[kA] 차단기를 적용할 예정이다. 그러나 차단기의 차단내력을 증가시키는 것은 기술적인 면 및 경제적인 면을 고려할 때 많은 제약이 따르게 되고, 상위전압 계통 차단내력을 상승시키면 하위전압 계통 차단내력도 동시에 상승되어 이에 대한 대책이 필요하게 되는 악순환이 뒤따르게 되므로 필요 충분한 사전 검토가 필요하다.

전하고 있다. 이와 같이 154kV 연계선로를 개방하여 운전하게되면 계통간 결합력이 감소되어 안정도가 손상되고, 계통간 유효 및 무효전력 송수전 유연성이 결여되어 공급신뢰도가 떨어지며 전압제어가 원활하지 못하여 전력품질 유지 면에서도 불리하게된다. 표 3은 우리나라 345kV 및 154kV 차단기 차단내력 초과 변전소 수를 나타낸 것이다.

배전계통 단락고장전류는 상위계통 등가임피던스 즉, 전원측 등가임피던스와 계통에 연결되어있는 회전기기 규모에 따라 결정된다. 일반적으로 154kV측 등가임피던스는 154/22.9kV 변압기 임피던스에 비하여 매우 작아 단락고장전류는 대부분 154/22.9kV 변압기 임피던스에 의해 결정되며, 일반적으로 154/22.9kV 변압기 임피던스 값이 비교적 커서 단락고장전류 증대 문제는 거의 없는 실정이다. 반면에 대전력

표 3. 연도별 345kV 및 154kV 고장전류 차단내력 초과현황

구분 \ 전압	345kV			154kV		
	변전소수	차단내력 초과 변전소수 40[kA]	변전소수	차단내력 초과 변전소 수		
				31.5[kA]	50[kA]	계
1998년도	55	8	439	21	62	83
1999년도	56	9	449	33	81	114
2000년도	61	14	467	37	94	131

한편 154kV용 차단기 정격차단전류는 31.5kA와 50kA 2종류가 있으나 계속 커지고 있는 고장전류에 대응할 수 있도록 점진적으로 차단내력이 큰 50kA 차단기로 교체하고 있으며, 특히 전력수요가 밀집되어 있는 수도권 지역에서는 고장전류를 저감하기 위해 많은 154kV 연계선로를 개방하여 운

수용가인 경우 단락고장전류가 전원 측으로부터 공급되는 것은 물론 자체 내에서 운전중인 회전기기로부터도 상당히 많은 고장전류가 고장점으로 유입된다. 따라서 부하의 많은 부분이 회전기기 들로 구성되어있는 정유, 화학, 시멘트, 제지 및 제철공장의 전력계통에서는 유도전동기 및 동기전동기 영향이 반영되도록

단락고장전류를 계산해야 한다.

우리나라의 어느 정유공장 전력계통에서 유도전동기가 연결되어있는 6.6kV 모선 3상 단락고장전류 계산 결과 6.6kV 모선의 차단전류(Breaking current)는 44.7kA이며, 이중 전원 측으로부터 유입되는 고장전류는 37.6kA이고, 유도전동기 들로부터 유입되는 고장전류는 7.1kA 이다. 즉 고장전류의 약 16%가 유도전동기로부터 유입되고 있음을 보여주고 있다. 이와 같이 비교적 큰 고장전류가 유도전동기로부터 유입되기 때문에 회전기기가 많이 이용되고 있는 산업체 전력계통에서는 6.6kV 또는 3.3kV 전압의 단락고장전류 억제 대책이 수립되어야 한다.

## 4. 고장전류 저감 대책

전력수요 증가로 계속 증대되는 고장전류가 지역에 따라서는 차단기 차단내력을 초과하는 문제가 발생되고 있다. 오늘날과 같이 전력수요 증가율이 큰 상태에서는 매우 빠른 속도로 고장전류가 증가되므로 이에 대처할 수 있게 고장전류가 차단기 차단내력 이내가 되도록 전력계통 계획은 물론 계통운용 측면에서도 고장전류 저감 방안이 체계적으로 수립되고 실시되어야 한다. 전력계통에서 고장전류가 너무 커서 문제가 될 경우 이를 해결하기 위해서 다음과 같은 방안들이 적용되고 있다.

- 차단기를 차단내력이 큰 것으로 교체하는 방안
- 계통분리, 직렬리액터 설치, 고임피던스 기기 채용 및 계통전압 격상과 같은 적극적인 고장전류 저감 방안 채택
- 한류기 적용, 직류 연계 및 자동절체 시스템 채용과 같은 신기술 적용 방안

그러나 이와 같은 대처 방안들이 계획에서 실시까지 걸리게 되는 기간이 수주일 또는 수개월 소요되는 짧은 것에서 몇 년 이상이 걸리게 되는 매우 긴 것까지 다양하고 신기술이 적용되어야 하는 방안의 경우는 신기술 개발 여하에 따라서는 이의 실계통 적용까지 비교적 오랜 기간이 소요될 수도 있을 것이다.

표 4는 고장전류 저감 방안별 문제점과 이를 실계통에 적용하기 위해 선결 해야 할 사항 등을 간략화 한 것이다. 전력계통 고장

표 4. 고장전류 저감 방안

구 분	고장 전류 저감 방안	문제점 및 선결 과제
차단기 교체	차단기 차단내력 격상	-대전류 차단기 개발 -기존 차단기 교체에 따른 전력공급 지장 -선로 및 모선 등 직렬기기 내력 격상
	계통 분리	-전력 용통 제약 -설비 과부하 및 전압강하 -안정도 저하
고장 전류 저감	직렬리액터 설치	-넓은 설치공간 소요
	고임피던스 기기 채용	-계통 안정도 저하
	계통전압 격상	-UHV 기술 개발 -투자비 과다
신기술 적용	한류기 적용	-기술 개발 -보호계전 방안 개발
	직류 연계	-투자비 과다 -SSR(저주파축비틀림 공진)방지
	자동절체 시스템	-보호제어 장치 개발

전류 증대에 대처할 수 있는 적용 가능한 방안은 대상 발·변전소 그리고 실행 장·단기 여하에 따라 매우 다양한 방법들이 있으며 이의 실시에 소요되는 예산도 그 차이가 매우 크다. 이들 다양한 방법이 고장전류 저감 목표에 도달하는지 그리고 제약조건인 과부하, 전압강하, 안정도 및 공급 신뢰도 등에는 문제가 없는지를 점검해야 하고, 현장 여건이 실시가능하며 투자비는 경제성이 있는지를 종합 검토하여 최선의 고장전류 저감 방안이 전원계획 단계에서 계통운용 단계에 이르기까지 수립되고 이것이 단계적이고 체계적인 형태로 실시될 수 있어야 한다.

## 5. 우리나라 교류차단기 정격

전력계통의 증대되는 고장전류는 전력설비의 전기적 및 기계적 강도 보강을 요구하게 되며, 특히 차단기 차단내력에 직접 영향을 미치게 된다. 따라서 차단기의 기능과 성능을 조사하고 현재 우리나라에서 적용 가능한 차

단기 규격을 검토하여 전력계통의 고장전류 억제한도와 현재 개발 중에 있는 초전도 한류기의 규격 결정 등에 참고하도록 한다.

차단기란 정격 조건 하에서 전력의 흐름을 개폐하는 이외에 이상상태 특히 단락고장 상태에서 전력의 흐름을 개폐하는 장치를 말한다. 즉, 규정된 조건 하에서 투입, 통전 및 차단하며 또한 단락고장과 같은 이상 상태에서 투입, 일정시간 통전 및 차단이 가능한 개폐장치를 뜻한다. 차단기가 갖추어야 할 기능을 열거하면 다음과 같다.

- 폐로시에는 양호한 도체이고, 상시의 전류는 물론 단락전류에 대하여도 열적 및 기계적으로 견뎌야 한다.
- 개방시에는 양호한 절연성이 보장되어야 하고, 상간 및 대지와 상사이 인가 전압에서 견뎌야 한다.
- 폐로 상태의 어느 시간에서든 정격차단 전류 이하 전류를 이상 전압을 발생하지 않고 가급적 단시간에 차단해야 한다.
- 개방 상태에서 언제라도 단락 상태에 있는 회로를 접촉자 손상없이 단시간에 안전하게 투입할 수 있어야 한다.

이와 같이 차단기 기능들 간에는 서로 상반되는 요구가 있기 때문에 차단내력이 큰 차단기 개발이 기술적으로 쉽지 않고 비록 피가 상대적으로 크고 가격 또한 비싸게 되는

경향이 있다.

표 5는 우리나라에서 사용 가능한 송·배전 교류차단기 정격전압, 정격전류, 정격투입전류, 정격차단전류 및 정격차단시간을 나타낸 것으로 정격차단전류는 차단기의 정격전압에 해당하는 회복전압 및 정격재기전압을 갖는 회로조건 하에서 규정의 표준동작책무 및 동작상태를 수행할 수 있는 차단전류의 최대 한도이고 교류분 실효치로 표시한 것이다. 따라서 전력계통의 전압별 단락고장전류 한도는 표의 정격차단전류 이하로 억제해야 하고, 개발 중에 있는 초전도 한류기도 현재 전력계통에 사용되고 있는 차단기 차단내력을 감안하여 규격이 결정되어야 할 것이다.

### 6. 초전도 한류기에 대한 기대

앞에서 설명한 차단기 한계 때문에 전력계통 계획을 담당하는 기술자들은 최대 고장전류를 줄이고 계통안정도를 유지하기 위하여 고임피던스 변압기를 사용하거나 공심리액터를 적당한 위치에 설치하는 방법을 사용한다. 그러나 이 두가지 방법은 시스템 효율을 저하시키고, 전력손실을 가져오며 전압강하를 유발한다. 과거 규제완화 이전에는 어느 정도 이러한 것들이 허용되었을지 모르지만 보다 심한 경쟁이 예상되고 더 높은 운영효율이 요구되는 오늘날에 있어서는 사고전류 문제를 처리할 수 있는 좀 더 효과적인 수단이 필요하게 되었고 그에 따라 현대적인 사고전류 대책수립에 들어가게 되었다.

요즈음 새롭게 개발되는 한류기는 모두 초전도 기술에 의지하고 있다. 즉 이미 성숙한 기술이라고 볼 수 있는 저온초전도체 기술이나 개발이 진행되고 있는 고온초전도체 기술 중 어느 하나에 기반을 둔다. 초전도체는 켄치될 때 급속히 초전도 상태에서 상전도 상태로 바뀌는 능력 때문에 일찍부터 한류기로 응용하는 것이 당연하다고 생각해 왔다.

다시 말해서 초전도체는 정상시에 전기저항이 없다가 고장이 발생하는 즉시 고저항 상태로 될 수 있다 적절한 제어장치를 부가함으로써 초전도 한류기는 순간적으로 사고전류를 감지하여 한류하고, 사고가 제거되면 다시 빠른 속도로 초전도 상태로 되돌아가서 다음 사고에 대비할 수 있다. 이러한 장점 때문에 지난 10년간 여러 가지 형태의 초전

표 5. 교류차단기 정격

구분	정격전압 [kV]	정격전류 [A] 실효치	정격 투입 전류 [kA] 피크치	정격차단 전류 [kA] 실효치	정격차단시간 [Hz]
배전	7.2	600 600, 1200, 2000 1200, 2000, 3000 1200, 2000, 3000, 4000	31.5 63 80 100	12.5 25 31.5 40	8
	25.8	600, 1200 600, 1200, 2000, 3000 2000, 3000	31.5 63 80	12.5 25 40	5
송전	170	600, 1200, 2000 1200, 2000, 3000, 4000	80 125	31.5 50	3
	362	2000, 4000 4000, 8000	100 158	40 63	3
	800	8000	125	50	2

도 한류기에 관한 개발이 시도되었으며 저온 초전도체를 이용한 한류기는 사고전류 제한 이후 즉시 초전도 상태로의 회복이 어렵기 때문에 최근의 한류기 프로그램들은 고온초전도 기술을 사용한다.

ABB의 자기차폐형, General Atomics의 유도/전자형, EA Technology의 저항/유도형 그리고 Siemens의 박막저항형 모두가 서로 모양은 다르지만 같은 고온초전도체를 이용한다는 것이 관심을 끈다. 고온초전도체의 기하학적 형태는 각각 튜브, 코일, 봉 그리고 박막으로 되어 있다.

### 7. 결 론

지속적인 전력설비 증강에 따라 전력계통의 단락고장전류가 계속 증대되고 있다. 증대되는 단락고장전류를 차단기내력 이하로 억제하거나 또는 차단기내력이 큰 차단기들로 교체해야한다. 그러나 차단기 교체는 현실적으로 많은 어려움이 있다. 따라서 전력계통에서 단락고장전류를 억제하기 위하여 연계선로 또는 모선을 분리하여 운영하고 있으나 이와 같은 계통 분리는 전력공급의 신뢰성을 떨어뜨리고, 전력 유통의 유연성을 손상시켜 전력품질 유지에도 나쁜 영향을 미치게되는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 분리된 계통간에 직렬리액터를 설치할 수 있으나, 직렬리액터를 설치하기 위해서는 비교적 넓은 설치공간이 필요하고, 직렬리액터에 의한 전력 손실이 발생하는 등의 문제점이 있다.

초전도 한류기는 새로운 개념의 사고전류 제한기로서 사고시 신속한 고장전류 제한 및 차단은 물론 자동회복 등 이상적인 특성을 구비하고 있으며, 특히 기존 계통의 변경 없이 투입이 가능하여 5년 이내에 초전도 한류기가 일반 전력계통에서도 사용 가능할 것으로 기대되며, 산업체 전력계통에서 요구되고 있는 3.3kV 또는 6.6kV 배전전압 수준의 초전도 한류기는 154kV 및 345kV 송전전압 수준의 한류기에 비하여 실용화 시기가 훨씬 빠를 것으로 전망되고 있다.

### 참고문헌

[1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안" 전기저널, 19권, pp. 19

(1998)

- [2] 김영선, 이강완, "고장전류 저감을 위한 345kV 직렬리액터 설치 검토" 전기저널, 제285호, pp.37(2000. 9)
- [3] 현옥배, 최효상, 이강완, "초전도한류기 개발 동향과 전망" 전력계통 보호제어 연구회 기술세미나 논문집, Vol.4, No.1, pp. 182 (2000. 11)

### 저자이력

#### 이강완(李康玩)



1946년 1월 7일생, 1974년 인하대 전기공학과 졸업, 1974년부터 1987년까지 한국전력 근무, 1987년~현재 대화기술단 대표, 1982년 전기기술사(발송배전)