

초전도 한류기의 고장전류 제한 효과 및 경제성 검토

김종율, 최훈관, 윤재영, 김학만
한국전기연구원

A Study on the Technical and Economical Effects of SFCL in Power Systems

Jong Yul Kim, Heung Kwan Choi, Jae Young Yoon, Hak Man Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - As the power system is more complex and power demands increase, the fault currents have the tendency of increasing gradually. In the near future, it will happen that the fault currents exceed circuit breaker duty for some substations. In this paper, the resistive and inductive SFCL are applied to reduce the fault currents in Korea power systems and evaluated technical and economical impacts.

1. 서 론

우리나라 전력계통은 좁은 국토 면적과 밀집된 수요로 인하여 루프 계통으로 구성되어 있으며 이러한 계통 구성은 향후 2015년까지 매년 4-5%의 지속적인 전력수요 증가로 인해 더욱 복잡하게 될 것으로 예상된다. 따라서 이러한 계통 특성으로 인해 계통 동가 임피던스가 감소하여 고장전류가 차단기 정격을 상회하는 결과를 초래할 수 있는데 특히 부하 밀도가 높은 수도권에서는 중요한 현안 문제의 하나로 제기되고 있다. 기존에는 차단기 정격을 높이거나 선로 차단, 모선분리, 한류 리액터 등을 이용하여 고장전류를 제한하여 왔지만 이러한 방법들은 비용 측면이나 전력공급 신뢰도 및 계통 안정도 측면에서 문제점을 나타내고 있다. 이러한 상황에서 초전도 한류기의 적용은 고장전류 저감을 위한 좋은 대안 중의 하나로서 제시되고 있다.

초전도 한류기는 정상상태에서는 임피던스가 거의 zero 이나, 고장상태에서는 큰 값을 가지게 되어 고장전류를 크게 감소시킬 수 있다. 즉, 초전도 한류기를 적용함으로써 고장발생시 전력계통을 안전하게 보호할 수 있음은 물론이고, 고장용량이 초과되는 송변전 설비를 교체하지 않아도 되므로 경제적으로 큰 효과를 볼 수 있다. 현재 초전도 한류기에 관한 연구는 국내외에서 활발히 이루어지고 있는데 유럽의 경우 EDF, GEC Alstom, Alcatel Alstom의 공동연구로 프랑스 송전망에 초전도 한류기를 적용하고자 하는 연구가 진행 중이며 일본에서는 TEPCO 및 TOSHIBA에서 배전급 6.6kV 초전도 한류기를 개발 중이다. 또한 국내에서도 2010년경 154kV급 초전도 한류기 개발을 목표로 대학 및 연구기관을 중심으로 활발한 연구가 진행 중이다.[1]

본 논문에서는 154kV 초전도 한류기 개발 시점인 2010년 수도권 지역의 3상 단락고장 전류 분포 결과를 검토하였고 그 결과를 토대로 차단기 정격초과 모선에 대하여 고장전류 기여분이 큰 연계 모선쪽 선로에 직렬로 초전도 한류기를 설치하여 고장전류 제한 효과를 살펴보았다. 아울러 초전도 한류기 적용에 따른 차단기 정격 증대 비용 회피 효과도 함께 검토하였다.

2. 수도권 154kV 모선 고장전류 해석결과

본 논문에서는 수도권 154kV 모선의 고장전류 추이 및 차단기 정격 초과 모선을 선별하기 위하여 연도별 3상 단락 고장전류를 검토하였다. 검토 대상 계통은 2004,

2006, 2010년 피크 부하 계통이며 우리 나라 실제통 해석에 이용되고 있는 PTI사의 PSS/E를 이용하여 검토하였다. 그림 1-3은 연도별 고장전류 검토 결과를 나타내고 있는데 가로축은 각 모선을 나타내고 세로축은 해당 모선의 고장전류 크기를 나타내고 있다. 검토 결과 2004년 30-40kA 사이에서 분포하던 고장전류가 시간이 경과함에 따라 점점 증가하여 2006년에는 일부 모선에서 40kA를 초과하고 2010년에는 154kV 차단기 최대 용량인 50kA를 초과하는 모선도 나타나고 있다.

따라서 기존 차단기의 차단 정격을 상회하는 모선에 대해서는 적절한 고장전류 억제 대책을 수립하여야 할 것이다.

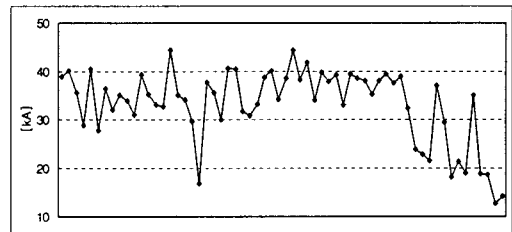


그림 1 2004년 수도권 154kV 모선 고장전류 분포

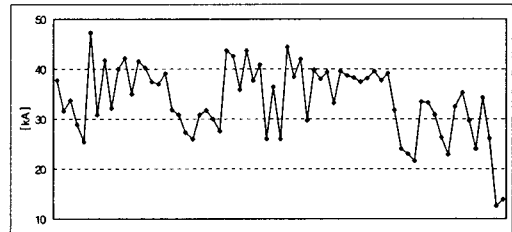


그림 2 2006년 수도권 154kV 모선 고장전류 분포

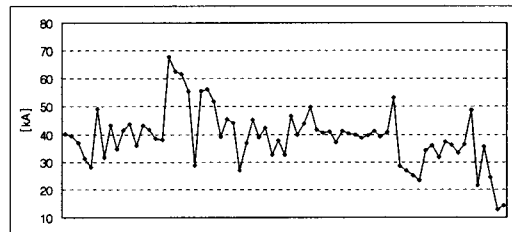


그림 3 2010년 수도권 154kV 모선 고장전류 분포

3. 초전도 한류기 적용 방안

3.1 검토 대상 지역 및 차단기 정격 초과 모선

초전도 한류기의 적용효과 및 적용 방안 검토에 있어서 전 계통을 대상으로 검토하였으나 우선적으로 고장전류 문제가 발생할 개연성이 상대적으로 높은 수도권 지역에 대하여 자세한 검토를 수행하였고 본 논문에서는

그 중에서도 다른 지역에 비해 부하 밀도가 높은 서울 강남일대의 남서울 지역에 대하여 상술하고자 한다. 또한 154kV급 초전도 한류기 경우 개발 목표 시점이 2010년경이므로 2010년 피크 부하 계통을 대상으로 하였고 차단기의 정격은 모두 50kA인 것으로 가정하였다. 따라서 고장 전류가 50kA를 초과하는 모선을 차단기 정격 초과 모선으로 분류하였고 그 결과는 표 1과 같으며 8개 모선에서 차단기 정격을 초과하고 있다.

표 1. 차단기 정격 초과 모선

모선번호	고장전류[kA]
2510	67.9
2520	62.5
2525	61.7
2530	55.6
2540	55.6
2570	56.1
2580	52.0
2845	53.2

3.2 고장전류 저감을 위한 초전도 한류기 적용 방안

본 논문에서는 차단기 정격 초과 모선의 고장전류 저감을 위한 초전도 한류기 적용 방안을 제시하였고 그 절차는 그림 4와 같다. 먼저 차단기 정격 초과 모선에 대해 연계 모선의 고장 전류 기여분을 분석하고 가장 큰 고장 전류 기여분을 가지는 위치를 후보 지점으로 선정한다. 각 후보 지점에 대하여 초전도 한류기 적용 효과를 검토하고 그 결과를 토대로 효과가 가장 큰 후보부터 순서대로 설치하여 차단기 정격 초과 모선의 고장전류가 모두 차단기 정격 이하로 제한되도록 한다.

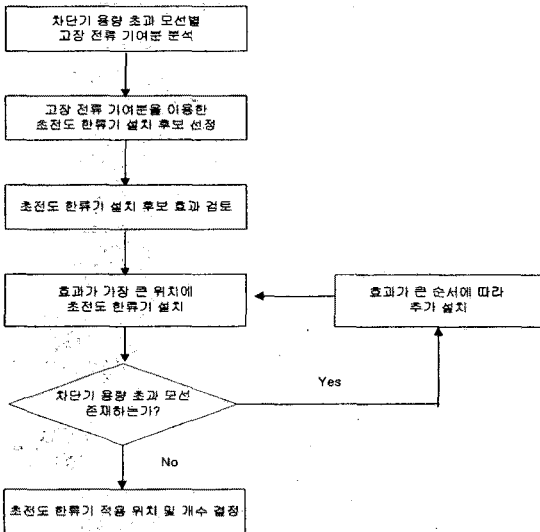


그림 4. 고장전류 저감을 위한 초전도 한류기 적용 방안

1) 후보 지점 선정 및 적용 효과 검토

차단기 정격 초과 모선에 대해 연계모선의 고장 전류 기여분을 검토하였고 각 모선에서 가장 큰 기여분을 가지는 위치를 후보 지점으로 하여 총 8곳을 선정하였다. 이들 후보 지점에 대해 저항형 및 유도형 초전도 한류기를 그림 5와 같이 선로에 직렬로 설치하여 고장전류 저감 효과를 검토 하였다. 초전도 한류기의 한류 임피던스는 저항형의 경우 저항이 유도형의 경우는 리액턴스가 100[MVA]기준으로 0.05[pu](약 12[Ω])의 값을 가지도록 모의 하였다.



그림 5 선로에 직렬로 설치된 초전도 한류기

표 2에서는 초전도 한류기 설치 후의 지점들에 대한 적용 효과 검토 결과를 나타내고 있는데 적용 효과 정도는 차단기 정격 초과 문제가 해결되는 모선 개수를 기준으로 하였다. 검토결과 저항형 및 유도형 초전도 한류기 모두 동일하였고 2525 모선에서 연계모선인 2520 모선으로의 선로 측에 설치한 경우 총 8개 모선 중 7개 모선의 차단기 정격 초과 문제가 해결되어 가장 큰 효과를 나타내었으며 다음으로 2510 모선에서 2500 모선으로의 위치에 설치한 경우로 5개 모선의 고장전류가 차단기 정격 이하로 제한되었다.

표 2. 후보 지점 및 적용 효과 검토 결과

설치 후보지점		차단기 정격 초과 문제 해결 모선 수	
설치모선	연계모선	저항형	유도형
2510	2500	5	5
2520	2510	0	0
2525	2520	7	7
2530	2520	4	4
2540	2530	4	4
2570	2510	4	4
2580	2570	1	1
2845	2510	1	1

2) 고장전류 저감을 위한 초전도 한류기 적용

그림 4의 흐름도와 표 2를 토대로 8곳의 차단기 정격 초과 모선을 모두 해결하기 위한 초전도 한류기 적용 지점은 아래와 같으며 초전도 한류기 설치 전후의 고장전류는 표 3과 같다.

초전도 한류기 적용 지점		
설치모선	연계모선	회선수
2525	2520	2
2510	2500	4

표 3 초전도 한류기 설치 전후의 고장전류

모선번호	초전도 한류기 설치 전	저항형 초전도 한류기 설치 후	유도형 초전도 한류기 설치 후
	고장전류[kA]	고장전류[kA]	고장전류[kA]
2510	67.9	43.5	39.6
2520	62.5	39.8	36.4
2525	61.7	31.7	35.3
2530	55.6	37.9	34.3
2540	55.6	38.2	34.5
2570	56.1	38.5	34.8
2580	52.0	36.6	33.1
2845	53.2	39.8	35.9

표 3에서 알 수 있듯이 초전도 한류기 설치 전 차단기 정격 50kA를 초과하였던 고장전류가 2곳의 모선에 초전도 한류기를 설치한 후 30~40kA 사이로 제한되는 효과를 나타내었으며 저항형, 유도형 모두 유사한 결과를 보

임을 확인 할 수 있었다.

4. 초전도 한류기의 경제적 효과

4.1 차단기 교체 비용

앞선 검토에서 남서울 지역 154kV 모선중 8개 모선에서 고장전류가 기존 차단기 정격을 초과하였다. 따라서 안정적인 고장 차단을 위해서는 기존 차단기를 50kA 이상의 정격을 가지는 차단기로 교체하여야 하는데 이 경우 막대한 교체 비용이 소모될 뿐 아니라 차단기 교체 작업으로 인해 안정적인 전력공급이 어려울 수도 있다.

특히, 현재 진행 중인 전력사업 구조개편으로 인해 송/배전 사업자가 분리될 경우 이러한 전력 공급 신뢰도 문제는 더욱 중요하게 부각될 것으로 예상된다.

따라서 초전도 한류기 적용을 통해 고장전류를 제한한다면 기존 차단기를 더 높은 정격을 가진 차단기로 교체하지 않고 계속 사용할 수 있게 되어 막대한 비용을 줄일 수 있게 된다. 표 4에서는 앞서 검토한 사례의 차단기 교체 비용을 나타내고 있다.

표 4. 차단기 교체 비용

모선 번호	154kV 연계선로 회선	M.Tr 차단기	교체 차단기	차단기 가격/대 (억원/대)	차단기 교체비용 (억원)
2510	14	2	16	1.5	24
2520	6	2	8	1.5	12
2525	4	2	6	1.5	9
2530	4	2	6	1.5	9
2540	6	2	8	1.5	12
2570	6	2	8	1.5	12
2580	4	2	6	1.5	9
2845	4	2	6	1.5	9
합계	48	16	64	-	96

연계선로 회선수는 각 모선과 연계되어 있는 154kV 선로의 회선수 합을 나타내고 M.Tr의 경우 각 모선마다 차이가 있지만 모두 2개 이상으로 구성되어 있으므로 여기서는 M.Tr측의 차단기 수를 최소 대수인 2대로 가정하였다. 따라서 차단기 정격을 초과하는 8개 모선에서 교체되어야 할 차단기 수는 최소 64대 이상이다.

현재 사용중인 154kV 차단기의 최고 정격이 50kA이므로 그 이상의 정격을 가지는 차단기의 가격은 현재로서 정확히 알 수 없다. 따라서 본 검토에서는 효성중공업의 기존 154kV/50kA 및 345kV/63kA 차단기 가격을 근거로 하여 약 1.5억원으로 산정하였다.

이를 바탕으로 차단기 교체 비용을 계산하면 총 96억원 정도이며 일부 모선의 경우는 단순히 차단기 정격뿐만 아니라 DS를 포함한 기존 설비도 함께 교체해야 하므로 그 비용은 96억원을 훨씬 넘을 것으로 예상된다.

4.2 초전도 한류기 가격 전망 [2]

현재로서 초전도 한류기의 가격을 산정하는 것은 매우 어려운 일이다. 초전도 한류기의 가격은 크게 초전도 선재 및 냉각장치로 나눌 수 있는데 현재까지 초전도 선재 및 냉각장치가 완전 상용화 되지 못하였고 향후에도 국내외에서 활발한 연구가 진행되어 가격이 현재보다 훨씬 낮아질 것으로 전망하고 있다. 초전도 선재의 경우 약 \$200/kAm이지만 미국 American superconductor corporation에서는 2004년에 \$50/kAm를 목표로 BSCCO 선재를 개발중이며 DOE에서는 2세대 YBCO 선재를 이용하여 \$10/kAm를 목표로 하고 있다. 따라서 앞으로 초전도 케이블 선재 가격은 약 \$10-\$50사이가 될 것으로 전망되며 그림 6에서는 향후 초전도 선재의 예상 가격을 나타내고 있다.

냉각장치 가격은 초전도 한류기의 열 발생 정도에 따

라정해지는데 Cryomech,inc사의 Gifford-McMahon 타입 AL300 냉각장치 경우 1kW의 열 에너지를 냉각하는데 약 \$100,000의 비용이 드는 것으로 조사되었다. 또한 냉각장치의 운영비용과 밀접한 관련이 있는 냉각장치 효율의 경우 현재 개발된 AL300 냉각장치 경우 65K의 온도를 유지하기 위해 1W의 열을 냉각하는데 26W의 입력이 필요하며 Mesoscopic Devices에서 개발중인 20K 가스 liquifier 모델은 1W 냉각하는데 20W의 입력이 필요한 수준인데 이 역시 효율 개선을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

따라서 앞선 경우와 같이 2곳의 모선에 초전도 한류기를 설치한다면 차단기 교체 경우에 비해 상당한 경제적 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각되며 향후 초전도 선재 가격 및 냉각장치 제작 기술의 발달에 따라 그 경제적 효과는 더욱 커질 것으로 전망된다.

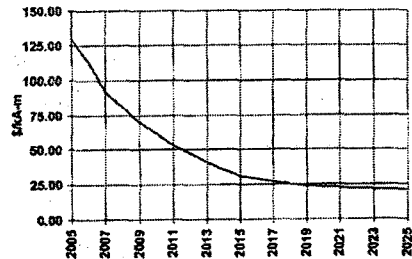


그림 6 초전도 선재 가격 전망

5. 결론

본 논문에서는 초전도 한류기 계통 적용에 따른 기술적, 경제적 효과를 살펴보았다. 2010년 남서울 지역 154kV 모선의 고장 전류 문제를 해결하기 위해 2곳의 모선에 초전도 한류기를 설치하였고 그 결과 모든 모선의 고장전류가 30-40kA로 제한되는 효과를 확인 할 수 있었다. 또한 경제성 검토결과 기존 차단기를 보다 높은 정격으로 교체하는데 96억원 이상의 막대한 비용이 소요 될 것으로 예측되었다. 따라서 초전도 한류기 적용을 통해 기존 차단기를 교체없이 계속 사용할 경우 그 경제적 효과는 매우 클 것으로 생각되며 향후 초전도 관련 기술의 발달에 따라 초전도 한류기의 경제적 가치는 더욱 커질 것으로 예상된다.

향후에는 초전도 한류기의 Bus-Tie 적용과 같은 다른 적용 방안에 대해 검토하고자 한다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] L.R.Lawrence, Jr and C.Cox and D.Broman, "High temperature superconductivity: The products and their benefits", Bob Lawrence & Associates, Inc., 2000.
- [2] J.Mulholland, T.P.Sheahan and B.Mcconnell "Analysis of future prices and markets for high temperature superconductors", U.S Department of Energy, Sept. 2001.
- [3] 김학만, 김종율, 최상봉, 문영환, 성기철 "고장전류 저감을 위한 초전도 한류기 적용", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 206-208, July 2001.
- [4] M. Sjoström and D. Politano, "Technical and Economical Impacts on a Power System by Introducing an HTS FCL", IEEE Trans on Applied Superconductivity Conference, Sept. 2000.