

초전도한류기의 계통도입을 위한 경제적 타당성 검토

김종율, 이승렬, 윤재영
한국전기연구원

A Economic feasibility of Superconducting Fault Current Limiter in Korean Power System

Jong Yul Kim, Seong Ryou Lee, Jae Young Yoon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - As power system grows more complex and power demands increase, the fault current tends to gradually increase. In the near future, the fault current will exceed a circuit breaker rating for some substations, which is an especially important issue in the Seoul metropolitan area because of its highly meshed configuration. Currently, the Korean power system is regulated by changing the 154 kV system configuration from a loop connection to a radial system, by splitting the bus where load balance can be achieved, and by upgrading the circuit breaker rating. A development project applying 154 kV Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) to 154 kV transmission systems is proceeding with implementation slated for after 2010. In this paper, the expected price of SFCL in order to assure the economic feasibility is evaluated comparing with upgrading cost of circuit breakers. The results show that the SFCL should be developed under seven times of price of circuit breaker to be competitive against upgrading circuit breakers.

관을 중심으로 활발한 연구가 진행 중이다. 그러나, 초전도한류기의 계통도입을 위해서는 경제적 타당성 및 기기 신뢰성에 대한 검증이 반드시 필요하다. 초전도한류기를 전력계통에 적용할 때 고려하는 신뢰성 문제는 향후 해당 기기의 상용화 개발 완료단계에서 검토되어야 할 사항으로 판단된다. 이는 향후 개발될 초전도한류기가 전력계통에서 요구하는 시험규격을 만족하는지 여부에 따라 판단되어지는 문제이기 때문이다. 따라서, 초전도한류기를 개발 중인 현 시점에서 초전도한류기의 신뢰성 문제를 논하는 것은 성급한 논의라고 생각된다. 그에 반해, 경제성 검토는 가장 기본적인 '상위개념'에서 초전도한류기의 계통적용 가능성을 좌우하는 근거가 되므로 가장 최우선적으로 검토되어야 한다. 그러나, 초전도기술 자체의 특성상 급격한 기술개발로 인해 현 상태에서 미래에 개발될 것으로 예상되는 초전도한류기의 정확한 비용요소(정격사양, 부피, 손실, 가격 등)를 산정하기는 매우 곤란하다. 또한, 미래 전력계통의 불확실성 및 계통측면의 적용관점 다양성 등을 고려한다면 현 시점에서 타 대안과의 직접적인 경제적 편익을 논하는 것은 곤란하다. 본 논문에서는 기술적 대안 중 가장 일반적인 방안인 차단기 용량증대 방안과 비교하여 초전도한류기가 경제성 측면에서 경쟁력을 갖추기 위한 시장진입 가격 가이드라인을 제시하였다.

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 등가 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 초전도한류기의 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 Alsthom, Alcatel Alsthom의 공동연구로 프랑스 송전망에 초전도한류기를 적용하고자 하는 연구가 진행 중이며 일본에서는 TEPCO 및 TOSHIBA에서 배전급 6.6kV 초전도 한류기를 개발중이다[1-3]. 또한 국내에서도 2010년경 154kV급 초전도 한류기 개발을 목표로 대학 및 연구기

2. 차단기 용량 증대 비용

2.1 개 변전소 교체 차단기 수

차단기 용량 증대 비용을 계산하기 위해서는 변전소의 교체 차단기 수가 필요한데, 여기서는 각 변전소의 154kV 선로 회선수 및 154kV 변압기 수를 기준으로 하여 추정하였다. 154kV 선로 회선수는 변전소 구성에 따라 서로 상이하며, 변압기 대수 역시 각 변전소마다 다소 편차를 가지고 있다. 한편 154kV 변전소의 경우 154kV 선로 회선수는 부하밀도가 높지 않은 일단 변전소의 경우 2회선, 부하밀도가 높은 대도시, 특히 수도권 부근의 변전소는 15회선까지 분포하는 것으로 나타났다. 154kV 변압기의 경우는 최소 2대에서 최대 4대까지의 편차를 나타내었다. 결국 이를 근거로 1개 변전소의 전체 154kV 차단기 수를 추정하면 50kA 차단기 설치 변전소의 경우 대략 5대에서 20대까지, 31.5kA 차단기 설치 변전소는 5대에서 15대로 나타났다.

2.2 차단기 가격 및 기타설비 가격

상전도 차단기 가격은 154kV/50kA 차단기의 경우 2.5 억원/대, 154kV/63kA 차단기의 경우 현재 정확한 가격을 알 수 없지만 제작업체의 의견을 근거로 하여 3.75억/대로 가정하였다. 차단기 교체시 단순히 차단기 자체뿐만 아니라 모선, MOF, DS 등의 기타 설비도 함께 교체되어야 한다. DS의 경우 일반적으로 차단기 1대를 기준으로 2대 가 설치되므로 총 교체수량은 차단기 수의 2배를 넘게 된다. 이러한 기타 설비의 총 교체비용은 전체 차단기 가격의 40%로 가정하여 계산하였다.

2.3 차단기 용량 증대 비용 산출

1) 50kA 차단기 적용 변전소

위에서 언급한 데이터를 바탕으로 1개 변전소의 차단기 교체비용을 계산하면 약 18.8억원에서 75억원 사이일 것으로 추정된다. 또한 모선, MOF, DS 등의 기타 설비 교체 비용까지 고려한다면 차단기 용량 증대에 따른 총 비용은 아래 그림 1에서 알 수 있듯이 차단기 대수에 따라 26.3억원에서 105억원에 달할 것으로 예상된다.

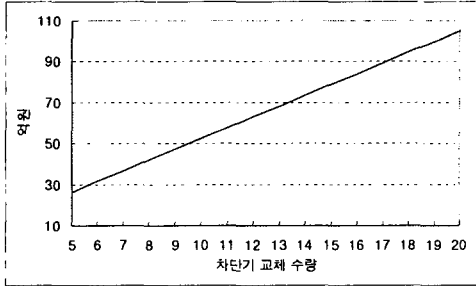


그림 1 교체 차단기 수에 따른 총 소요비용

2) 31.5kA 차단기 적용 변전소

31.5kA 차단기 적용 변전소에 대하여도 앞서와 같은 방법으로 차단기 교체 비용을 계산하면 12.5억원에서 37.5억원 사이일 것으로 추정되며 모선, MOF, DS 등의 기타 설비 교체 비용까지 고려할 경우 차단기 용량 증대에 따른 총 비용은 그림 2와 같이 17.5억원에서 52.5억원 정도로 예상된다.

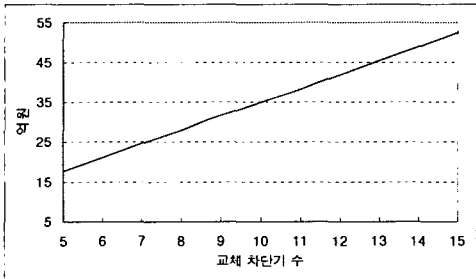


그림 2 교체 차단기 수에 따른 총 소요비용

3. 초전도한류기 시장진입 가격

3.1 초전도한류기 설치 방안

초전도한류기의 설치방안에는 크게 고장전류 초과 변전소의 일부 선로에 직렬로 초전도한류기를 투입하는 방법과 고장전류초과 변전소의 Bus-Tie 지점에 설치하는 방법으로 나눌 수 있다[4-5].

초전도한류기를 송전선로에 직렬로 설치하는 경우는 고장시 초전도한류기가 송전선로를 통해 유입되는 고장전류를 직접 제한하게 되어 고장전류 제한효과 측면에서 매우 유용한 방안이다. 그러나 송전선로에 직렬로 설치하는 경우 각 회선마다 초전도한류기를 설치하여야 하는데 만약 송전선로가 4회선이라면 총 4대의 초전도한류기가 필요하게 되어 경제적인 측면에서는 다소 불리한 측면을 가지게 된다. 이에 반해 초전도한류기를 Bus-Tie 지점에 설치하게 되면 정상상태에서는 모선분리를 하지 않는 것과 같아 모선분리 운전 방안의 단점인 공급신뢰도 및 동기화력 저하 문제를 보완 할 수 있다. 고장 시에는 초전도한류기가 동작하여 모선분리를 시행한 것과 같은 효과를 나타내어 고장전류를 효과적으로 제한할 수 있게 된다. 또한 고장전류 저감을 위하여 1대의 초전도한류기만을 필요로 하게 되어 경제적 측면에서 많은 이

점을 가지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 변전소의 Bus-Tie 지점에 초전도한류기를 설치하는 방안을 토대로 시장진입 가격을 산정하였다.

3.2 초전도한류기 예상가격에 따른 적용 가능 변전소 규모 추정

앞선 교체 차단기 수에 따른 총 소요비용 검토 결과를 토대로 초전도한류기 가격대별 적용 가능 변전소 규모를 추정하여 보았다. 즉, 현 시점에서는 초전도한류기의 가격을 산정하기가 불가능하므로 향후 개발될 초전도한류기의 예상가격을 약 10억원/대에서 50억원/대까지 사이로 예상하고, 이때 각 가격대별 경제성이 있는 교체 차단기 수를 살펴보았다. 여기서 초전도한류기의 예상가격은 초전도한류기 및 냉각설비를 포함한 가격을 의미한다.

1) 50kA 차단기 적용 변전소

표 1에서 알 수 있듯이 초전도한류기 가격이 20억/대 이하일 경우는 모든 154kV 변전소에서 차단기 용량 증대 방안에 비해 가격경쟁력을 가지게 되며 초전도한류기 가격이 상승함에 따라 적용 가능 변전소 범위는 점점 줄어들게 된다. 만일, 예상가격이 50억원일 경우는 교체 차단기 수가 10대이상인 변전소에서만 경쟁력을 가지게 되며, 154kV 선로 회선이 많지 않은 소규모 변전소(차단기 교체수가 5대 정도)에의 적용에는 경쟁력이 없을 것으로 예상된다.

따라서, 향후 개발될 초전도한류기가 보다 큰 판매시장을 갖기 위해서는 20억원/대에서 30억원/대 사이의 가격대가 되어야 할 것으로 판단된다.

표 1 초전도한류기 예상가격별 적용가능 변전소 규모

| 초전도한류기 예상가격 | 적용 가능한 변전소 규모 |
|-------------|--------------------|
| 10억원/대 | 교체 차단기 5대 이상의 변전소 |
| 20억원/대 | 교체 차단기 5대 이상의 변전소 |
| 30억원/대 | 교체 차단기 6대 이상의 변전소 |
| 40억원/대 | 교체 차단기 8대 이상의 변전소 |
| 50억원/대 | 교체 차단기 10대 이상의 변전소 |

2) 31.5kA 차단기 적용 변전소

31.5kA 차단기 적용 변전소의 경우를 살펴보면 아래 표 2와 같다. 초전도한류기가 10억원/대 이하인 경우는 모든 154kV 변전소에서 차단기 용량 증대 방안과 비교하여 가격 경쟁력을 가진다. 50kA 차단기 적용 변전소와 마찬가지로 초전도한류기 가격이 상승함에 따라 적용 가능 변전소 범위는 점점 줄어들게 되고, 예상가격이 40억원/대일 경우는 교체 차단기 수가 약 12대이상인 변전소에서만 경제성을 가지게 된다. 따라서, 모든 31.5kA 차단기 적용 변전소에서 가격 경쟁력을 가지기 위해서는 약 10억원/대에서 20억원/대 사이의 가격으로 개발되어야 할 것으로 예상된다.

표 2 초전도한류기 예상가격대별 적용 가능 변전소 규모

| 초전도한류기 예상가격 | 적용 가능한 변전소 규모 |
|-------------|--------------------|
| 10억원/대 | 교체 차단기 5대 이상의 변전소 |
| 20억원/대 | 교체 차단기 6대 이상의 변전소 |
| 30억원/대 | 교체 차단기 9대 이상의 변전소 |
| 40억원/대 | 교체 차단기 12대 이상의 변전소 |

3.3 초전도한류기 시장진입 가격 산정

본 논문에서는 차단기 용량 증대에 따른 총 소요비용을 바탕으로 초전도한류기 경제적 측면에서 경쟁력을 가질 수 있는 한계가격 (시장진입 가격)을 추정하고, 가격지수(N)을 통하여 기존 차단기와의 가격 비율을 검토하여 보았다. 또한 본 검토의 목적이 초전도한류기의 시장진입을 위한 한계가격을 제시하는데 의미가 있으므로, 차단기 수가 5대로서 가장 적은 규모의 변전소에 적용하는 경우를 기준하였다. 향후 개발될 초전도한류기가 본 검토에서 제시한 시장진입 가격을 만족한다면 모든 154kV 변전소에 대한 초전도한류기 적용의 경제적 타당성은 확보될 것으로 판단된다.

가격지수(N)은 아래 식(1)과 같이 향후 개발될 초전도한류기와 기존 차단기의 가격 비율을 나타내며, 초전도한류기 시장진입 가격이 기존 차단기 가격과 비교하여 상대적으로 어느 정도 높은 수준인지를 가늠할 수 있는 척도로 활용할 수 있다. 여기서 제시하는 가격은 냉각설비를 포함하는 가격이다.

$$\text{가격지수}(N) = \frac{\text{초전도한류기 가격}}{\text{차단기 가격}} \quad (1)$$

1) 50kA 차단기 적용 변전소

1개 변전소의 교체 차단기 수량이 최소 5대 정도인 것을 고려하면, 5대 차단기 교체시 초전도한류기가 가격경쟁력을 가질 수 있는 한계가격이 적절한 시장진입가격이라 할 수 있다. 아래 그림 3에서 알 수 있듯이 1개 변전소의 교체 차단기 수가 5대일 경우 차단기 용량증대에 따른 총 소요비용은 약 26.3억이며, 초전도한류기가 가격경쟁력을 갖추기 위한 가격지수(N)는 7임을 알 수 있다.

즉, 향후 상용화될 초전도한류기가 63kA 차단기 가격의 7배인 26.3억원 이하로 개발 가능하다면 차단기 교체방안에 대하여 경제적 측면에서 우위를 가질 수 있을 것으로 예상된다.

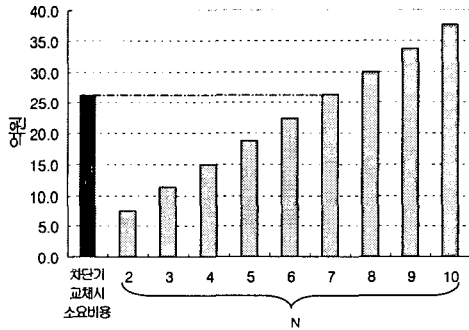


그림 3 초전도한류기의 시장진입가격

2) 31.5kA 차단기 적용 변전소

50kA 차단기와 마찬가지로 1개 변전소의 교체 차단기 수량이 5대일 경우의 초전도한류기 시장진입 가격을 살펴보면 그림 4와 같다. 1개 변전소의 차단기 교체에 따른 총 소요비용은 17.5억이며, 초전도한류기가 가격경쟁력을 갖추기 위한 가격지수(N)는 7이다. 즉, 초전도한류기가 50kA 차단기 가격의 7배인 17.5억원 이하로만 개발 가능하다면 31.5kA 차단기 설치 154kV 변전소의 고장전류 초과 문제 발생시 차단기 교체 방안과 비교하여 경제성 측면에서 우위를 가질 수 있을 것으로 예상된다.

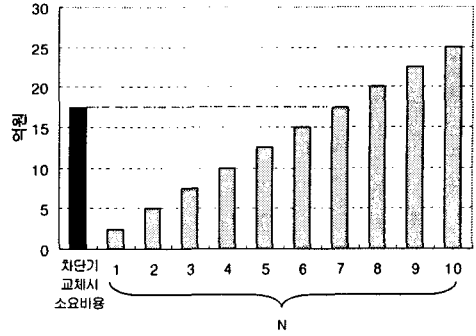


그림 4 초전도한류기의 시장진입가격

4. 결론

본 논문에서는 향후 개발예정인 초전도한류기의 계통 도입을 위한 경제적 측면의 타당성을 검토하였다.

검토결과 154kV 초전도한류기 시장진입 가격이 50kA 차단기 적용 변전소는 154kV/63kA 차단기 가격의 7배인 26.3억원/대, 31.5kA 차단기 적용 변전소는 154kV/50kA 차단기 가격의 7배인 17.5억원/대로 추정되었다. 결론적으로, 향후 개발될 초전도한류기를 기존 상전도 차단기 가격의 7배 이하로만 개발할 수 있으면, 차단기 용량증대 방안보다 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 추정결과와 초전도한류기의 실제 적용 가능성이 상당히 밝음을 의미한다.

그러나 여기서 제시하는 시장진입 가격은 미래계통의 불확실성 및 구체적 적용대상의 조건에 따라 다소 가변적일 수 있으므로 향후 실제 계통적용을 위해서는 보다 구체적인 적용방안을 토대로 정밀한 검토가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

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

[참고 문헌]

- [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] John Cerulli, "State of the Art of HTS Technology for Large Power Applications: Current Programs and Future Expectations" Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting, Dec. 1998
- [3] R. Mikkonen, "Highlights of SC Power Applications in Europe," IEEE Trans on Applied Superconductivity vol.12, no.1, pp 782-787, March 2002.
- [4] J. Y. Kim and H. K. Choi and J. Y. Yoon, "A Study on the Application Impacts on Korean Power System by Introducing SFCL", KIEE International Trans on Power Engineering, Vol. 3, No. 1, March 2003.
- [5] 김종율, 이승렬, 윤재영, "고장전류 저감을 위한 초전도한류기 Bus-Tie 적용에 관한 검토", 한국초전도저온공학회 추계학술대회, 2003.