

**HVDC 시스템 국내 적용 타당성 연구: 경인지역 단락전류 억제효과 분석**

김동준, 윤재영, 양광호, 이동일\*  
한국전기연구원, 전력연구원\*

**A Feasibility Study of HVDC System Application to KEPCO**

D.J. Kim, J.Y. Yoon, K.H. Yang, D.I. Lee\*  
KERI, KEPRI\*

**Abstract** - This paper describes the applicability of HVDC system to KEPCO system in terms of reducing short circuit current. Especially, the effect of reducing the short circuit current in Gyungin area and Seoul area by using HVDC system was mainly investigated. In addition, the transaction of electric power between areas, security problem, and economic aspects were also examined.

**1. 서 론**

전력계통 규모의 확대와 계통의 광역연계 강화에 따라 단락용량이 해마다 증가하고 있다. 그 경향은 발전소 규모의 증대와 전원입지의 집중화에 따라 더욱 증대되고 있으며 계통 안정도와 함께 전력계통의 계획 운용상 중요한 과제가 되고 있다. 특히 부하 집중 지역인 서울과 경인지역의 단락용량 증대 문제가 크게 대두 되고 있다.

단락용량 증대의 원인으로서 먼저 발전기의 단기용량 증대를 들 수 있다. 대용량 화력, 원자력을 주류로 하여 선원이 개발되기 때문에 단기용량이 커지고 있다. 그리고 전원입지의 집중화를 들 수 있다. 1개 발전소당의 발전기 설치 대수의 증가와 발전소의 편재화 경향으로 발전소 근방의 단락전류가 증대하고 있다.

단락용량이 전력계통에 미치는 영향은 큰 단락 전류에 의해 변압기, 변류기, 송전 선로 등의 기기 및 설비가 줄열로 인하여 열적으로 파손되기 쉬우며, 또한 대전류에 의한 큰 전자기력에 의해서 왜형 또는 파손될 수 있다. 또한 차단기의 차단 능력 차단기가 대전류를 차단해야 하므로 차단 용량이 커져야 하고, 차단뿐만 아니라 재투입 능력 및 접촉자의 소손 등의 문제가 야기된다.

일반적인 고장전류 억제대책은 고임피던스 전력설비 채용, 직렬한류리액터 설치, 계통전압 격상, 계통간 HVDC 시스템 연계, 그리고 연계선로 분리 및 모선 분리 등이 있다. 고임피던스 전력설비 채용은 전력계통의 등가임피던스를 증가시켜 고장전류를 감소시키는 방법이다. 계통간 HVDC 연계방법은 계통간을 직류로 연계하게 하면, 연계 계통간에 무효전력 수수가 이루어지지 않게 되어 고장전류가 억제된다. 연계선로 분리 및 모선 분리 방안은 별도의 비용 없이 주어진 전력계통에서 비교적 손쉽게 간편하게 적용할 수 있는 적극적인 고장전류 억제방안이다. 단점은 계통 선로 임피던스 증가로 과도 안정도나 미소신호안정도가 낮아진다는 것이다.

본 논문에서 단락전류 억제대책으로 다루게 되는 계통간 HVDC 연계는 과다한 투자비가 소요되어 계통의 고장전류 억제대책만으로 적용하기는 비현실적이다. 따라서 송전선로의 이용률 증대 및 지역간 송전용량 증대 등을 고려하여 적용 가능성을 검토하는 것이 필요하다.

본 논문은 서울과 경인지역을 대상으로 HVDC 시스템을 적용하여 단락전류 억제 효과를 검토한다. 사용된 데이터는 현재 계통, 2007년 계통, 그리고 2010년 계통이며, HVDC 시스템 연계 위치 선정, 선로 이용률 증대 및

전력용통, 안전도 문제, 그리고 경제성 등도 고려하여 HVDC 시스템의 국내 적용 타당성을 분석한다.

**2. 본 론**

**2.1 경인 지역 단락전류 분석**

서울과 경인지역의 단락전류를 분석하기 위해서 아래와 같은 첨두치 조류계산 데이터를 이용하였고 단락전류 검토 대상 모선은 345 kV 모선 34개를 대상으로 하였다.

- 2004년(현재), 첨두치 총부하: 49,493.4 MW
- 2007년, 첨두치 총부하: 54,825.4 MW
- 2010년, 첨두치 총부하: 55,427.0 MW

표 1은 경인지역 345 kV 34개 모선에 단락을 주고, 계산된 단락전류 값으로 가장 큰 순서대로 11개 모선만 나열한 것이다. 2004년인 첨두치 부하인 경우 경인지역 평균 단락전류는 36 kA 정도였다. 가장 큰 단락전류를 보인 모선은 신시흥 모선으로 345 kV 차단용량인 40 kA를 초과하고 있다. 현재 이 모선은 60 kA 차단기 설비로 대체하여 운전 중에 있다. 대부분 서인천 지역과 서해안 발전기와 연결된 모선에 단락전류가 다른 모선보다 컸다. 2004년도 케이스인 경우 동서울 345 kV 모선은 분리모선으로 두고 계산한 값이다. 만약 동서울 모선을 분리모선으로 두지 않는 경우 이 모선의 단락 전류값은 40 kA를 상회한다.

표 1 2004년도 Peak 부하 기본 케이스

순서	모선번호	모선명 [345kV]	단락전류 (kA)
1	3600	[신시흥3]	44.63
2	3650	[신시흥#2]	42.13
3	3150	[서인천CC]	41.86
4	3151	[서인천CC]	41.86
5	4400	[화성3]	41.79
6	3550	[서인천3]	41.36
7	2400	[영서3]	40.91
8	4401	[화성3]	40.85
9	3450	[인천TP3]	39.68
10	4450	[평택TP3]	39.59
11	4700	[신용인3]	39.15
12~34	...	...	...
평균			35.83

표 2는 2004년, 2007년, 그리고 2010년을 대상으로 첨두치 부하 기본 케이스의 경인지역 평균 단락전류를 보여준다. 2010년에는 경인지역 평균단락전류가 약 39 kA 정도로 예상되고 있다. 이것은 345 kV 차단기 용량 40 kA에 근접한 값으로 대부분의 345 kV 차단기를 60 kA 정격 차단기로 교체해야 하는 것을 의미한다.

표 2 침두치 부하 기본 케이스 경인지역  
345 kV 모선 평균 단락 전류

년도	평균 단락 전류 (kA)
2004	35.83
2007	37.01
2010	38.66

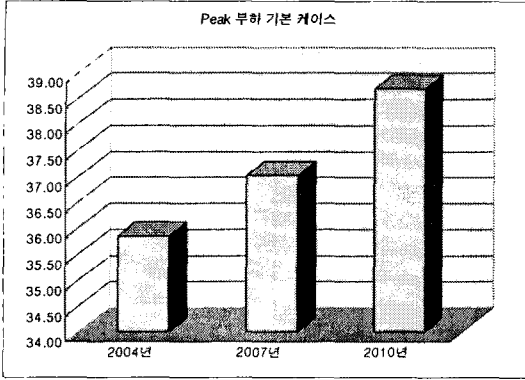


그림 1 침두치 부하 기본 케이스 경인지역 평균 단락 전류 (kA)

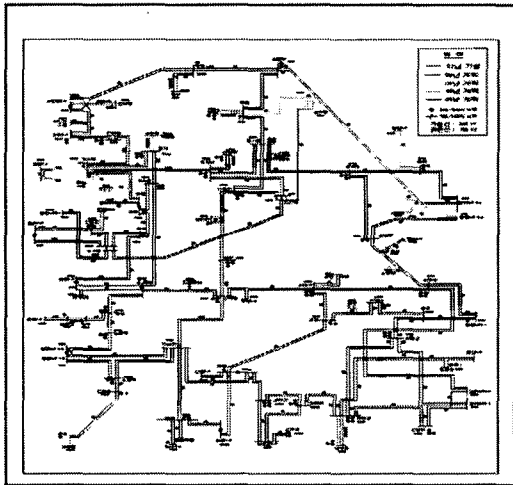


그림 2 345kV 이상 계통 구성도

### 2.2 BTB HVDC 위치 선정

경인지역 단락전류를 가장 크게 억제하는 345kV 선로를 찾기 위해서, 서인천-양주 선로, 신성남-동서울 선로, 서인천-신시흥 선로, 영서-서서울 선로, 그리고 화성-서서울 선로 등에 BTB HVDC 시스템을 설계하고 단락전류를 계산하였다. 이때 BTB HVDC의 용량 결정은 기본 케이스에서 계산된 선로 조류용량으로 결정하였다.

BTB HVDC 설치 선정에 있어서 고려되어야 할 점은 단락전류를 가장 크게 억제시키면서, 선로의 조류가 잘 흐르지 않는 선로여야 한다는 것이다. 만약, 단락전류 억제효과는 적으면서 선로에 조류가 많이 흐르는 경우는 큰 용량의 HVDC를 건설해야 하기 때문에 경제적인 면에서 적용하기 어렵게 된다.

계산 결과, 가장 조류가 적게 흐르면서 단락전류 억제효과가 높은 선로는 신시흥-서인천 선로였다. 이것은 서인천 지역에 발전설비가 집중되어 있기 때문에 단락전류를 억제하기 위해서 많은 모선에 모선분리를 해 두었기 때문이다. 따라서 모선을 분리함으로써 선로 임피던스가 증가했고, 이것은 조류의 흐름을 방해한 것이다. 그림 3은 신시흥 모선에서 서인천으로 가는 345 kV 선로에

직렬로 BTB HVDC를 설계한 것을 보여주고 있다. HVDC 용량은 기본 케이스 조류계산에서 계산된 150 MW로 결정하였다. 이때 무효전력 보상은 HVDC 용량의 50%정도로 결정하였고, 직류 선로의 저항은 작게 설정하였다.

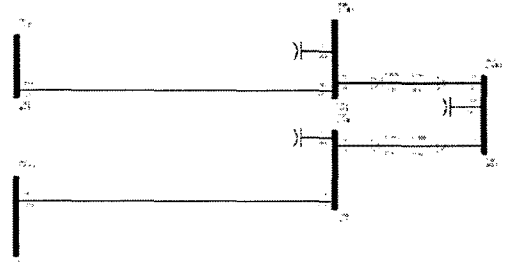


그림 3 신시흥-서인천 2회선 선로 BTB HVDC 시스템 설계 (신시흥 모선에 설치)

표 3은, 신시흥-서인천 선로에 HVDC를 삽입한 후, 계산된 단락전류 값이 큰 순서대로 모선을 나열한 것이다. 전체 평균 단락전류는 29.88 kA로, 다른 모선에 HVDC를 설치하는 것보다 훨씬 크게 줄었다. 특히 서인천 지역의 단락전류는 대부분 크게 줄었다.

표 3 신시흥(3600) 150 MW BTB HVDC 시스템 (서인천 345 kV 선로), 2004년도 케이스

순서	모선번호	모선명	단락전류(kA)
1	4700	[신시흥3]	38.77
2	4400	[화성3]	38.28
3	3650	[신시흥#2]	37.98
4	4100	[신안성3]	37.64
5	4500	[신성남3]	37.59
6	4450	[평택TP3]	37.59
7	4401	[화성S]	37.50
8	1400	[양주3]	37.16
9	1700	[미금3]	36.14
10	3150	[서인천CC]	36.00
11	3151	[서인천CC]	36.00
12~36	...	...	...
평균			29.88

표 4는 신시흥에 BTB HVDC를 설치하는 경우 경인지역 평균 단락전류와 이때 설계된 HVDC의 용량을 나타낸다. 이것은 작은 용량의 HVDC 시스템을 적용하고도 높은 단락전류 억제효과를 발생시키는 것을 보여준다. 만약 이보다 큰 용량의 HVDC 시스템으로 설치하는 경우에는 서인천-양주로 흐르는 조류를 제어하면서 신시흥-서인천 선로의 선로 이용률을 높일 수 있는 장점이 있었다. 즉, 신시흥-서인천 선로의 조류를 제어함으로써 서인천 지역과 서해안 지역의 에너지를 서로 자유롭게 HVDC 용량 범위내에서 제어할 수 있는 장점이 있다.

표 4 신시흥(3600 BTB HVDC 시스템 설치인 경우 경인지역 평균 단락전류 (신시흥-서인천 선로)

년도	평균 단락 전류 (kA)	BTB HVDC 용량
2004	29.88	150MW *2
2007	31.80	200MW*2
2010	33.60	500MW*2

그림 4는 신시흥 모선에 서인천으로 가는 선로에 BTB HVDC를 설치할 경우 경인지역의 평균 단락전류를 보여준다.

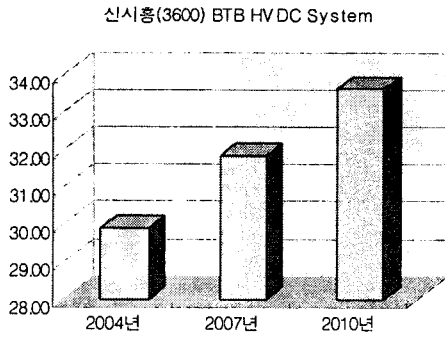


그림 4 첨두치 부하 기본 케이스 경인지역 평균 단락전류 (kA): 신시흥-서인천 선로에 BTB-HVDC를 삽입하는 경우

표 5와 그림 5는 신성남 모선에 동서울로 가는 선로에 BTB HVDC를 설치한 경우 경인지역 평균 단락전류를 보여준다. 이것은 신시흥 모선에 HVDC를 설치한 것 보다 단락전류억제 효과가 적음을 보여준다. 또한 용량이 보다 큰 HVDC 시스템을 설치한 경우에는, 루프시스템으로 구성되어 있기 때문에, 인근 연결된 선로에 흐르는 조류에 영향을 주었으나 서해안쪽에서 송전전력을 증대하는 것에는 큰 효과가 없었다.

표 5 신성남(4500) 200MW BTB HVDC System

년도	평균 단락 전류 (kA)	BTB HVDC 용량
2004	33.05	200MW*2
2007	34.29	150MW*2
2010	35.83	300MW*2

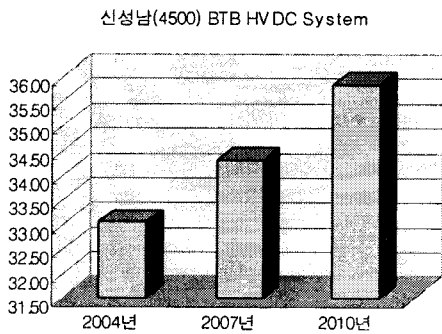


그림 5 첨두치 부하 기본 케이스 경인지역 평균 단락전류 (kA): 신성남-동서울 선로에 BTB-HVDC를 삽입하는 경우

### 2.3 안전도 문제

국내 전력계통을 N-1 안전도에 부합하는 가 검토하였다. 345 kV 2회선 송전선로를 제거하는 상정 조류계산을 수행하였고, 345 kV 모선에 3상 단락사고를 가하고 5 사이클 후에 사고제거하고 송전선로를 제거하는 것으로 모의하여 안정도를 판별하였다. 2004년, 2007년, 그리고 2010년 데이터를 사용하여 모의 하였고, 조류계산 케이스는 ill-conditioned 케이스와 well-conditioned 케이스 [1]로 분리하여 검토하였다. ill-conditioned 케이스는 모선에 무효전력 보상을 적절히 하지 않은 케이스이며, well-conditioned 케이스는 무효전력을 적절히 보상하여 조류계산이 잘 수렴하게 한 케이스다.

ill-conditioned 케이스인 경우 345 kV 2회선 송전선로

를 제거하는 경우 조류계산이 수렴되지 않은 경우가 많 이 발생하였다. 그러나 무효전력 보상장치가 잘 설치된 well-conditioned 케이스인 경우 N-1 안전도를 만족하는 결과를 보였다. 이 경우 경인지역에 과전압 문제가 발생할 수 있어, SVC와 같은 속응성 무효전력장치가 필요할 것으로 보인다. 그리고 가장 크게 문제가 되는 경우는 765kV 송전선로에 사고가 발생하는 경우이다. 이 송전 선로가 사고가 발생하면 조류계산이 수렴되지 않고, 과도 안정도도 불안정함을 보였다.

신시흥 모선에 서인천으로 가는 선로사이에 BTB HVDC를 설치했다고 가정하자. 그리고 서인천에서 양주 로 가는 2회선 345 kV 송전선로에 사고가 발생했다면, 조류는 신시흥-서인천 송전선로에 집중하게 된다. 만약 지용량으로 설계된 BTB HVDC 시스템이라면 송전해야 할 과잉 전력을 감당하기 어렵기 때문에 이 경우에는 BTB HVDC를 bypass하는 것이 필요하다.

### 2.4 경제성 분석

BTB HVDC를 건설할 때 두 가지 시스템을 생각할 수 있다. 하나는 전압형 HVDC 시스템이고, 다른 하나는 전류형 HVDC 시스템이다. 전압형 HVDC를 건설할 경우 무효전압을 자유롭게 제어할 수 있어 전압안정도 향상을 가져올 수 있다. 반면, 전류형 HVDC를 사용할 경우 경제적인 면에서 유리하고, 충분한 무효전력 보상장치를 설치할 경우 전압안정도에 영향을 주지 않아도 된다. 표 6은 전류형 BTB HVDC를 건설한 경우 예상되는 비용이다. 전압형 BTB HVDC인 경우 최근 제작처 bidding에 의하면 전류형 BTB HVDC보다 25%정도 비싸다고 한다[2].

표 6. 전류형 BTB HVDC 변환소 비용 (2003년)

설 명	단위	BTB	BTB
Rating	MW	200	500
Total per kW (both stations)	\$/kW	176	170
Basic Station Cost (both)	\$M	35	85
Terminal Station Spares	\$M	2	4
Grounding Electrodes	\$M	0	0
Interest During Construction	\$M	3	7
7.5% Contingency Costs	\$M	2.79	6.675
Total DC Converter Costs	\$M	43	102

### 3. 결 론

본 논문은 서울과 경인지역을 대상으로 HVDC 시스템을 적용하여 단락전류 억제 효과뿐만 아니라, 선로의 이용률 증대, 안전도 문제, 그리고 경제성 등에 대해서도 고려하여 검토하였다. 검토결과 신시흥 모선에 서인천으로 가는 345kV 선로에 직렬로 BTB HVDC 시스템을 설치하는 것이 경인지역 단락전류를 가장 크게 억제하는 것으로 나타났다. 또한 이 선로에 적절한 용량의 HVDC를 설치하는 경우 송전선로의 이용률을 크게 개선시킬 수 있고, 서인천 지역과 서해안 지역의 전력 에너지를 융통할 수 있는 장점이 있었다. 경제성 평가에서는, 전압형 BTB HVDC 설치하는 비용이 전류형 HVDC 시스템을 비해 25% 정도밖에 비싸지 않기 때문에, 전압형 BTB HVDC 시스템을 건설하는 것이 적절한 것으로 판단되었다.

그러나 이와 같은 결과에도 불구하고 HVDC 시스템을 건설하는 비용은 다른 단락전류 억제 대안보다 매우 고가이기 때문에 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 대규모정전 예방을 위한 단기 계통운영정책 수립에 관한 연구 (최종보고서), 한국전력공사, 2004.11.26.
- [2] Discussion with Dennis Woodford via of e-mail, 2005.6.4.