

비동기 전력계통 연계를 위한 Back-To-Back 직류설비의 운전특성 해석

*곽주식, 우정욱, 고훈연, 김찬기, 심웅보
한국전력공사 전력연구원

Analysis of Back-to-Back HVDC system featured for Asynchronous Connection

*J.S. kwak, W.J. Wook, B.E. Koh, C.K. Kim, E.B. Shim
Korea Electric Power Research Institute of KEPCO

Abstract - The operation of Back-To-Back HVDC system for asynchronous connection is described. It can exchange electric power up to 300 MW between separately operated two power systems, making the interaction on each system minimum. The analysis is done under three different AC transmission lines interconnected to BTB HVDC.

터의 요구량률 도출한다. 특히, 해석 대상의 교류 송전 시스템은 남북한 전력 융통시에 이용가능성이 있는 345 kV 의정부변전소와 154 kV 문산 변전소에서 북한계통으로 연결되는 시스템을 대상으로 하였다.

2. 본 론

2.1 개요

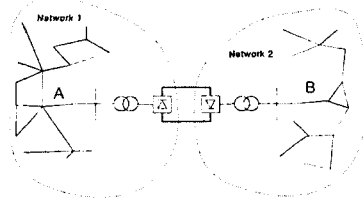


그림 1. Back To Back 방식

두 개의 변환기가 동일 장소에 존재하는 BTB 방식에서는 Point to Point 방식에서 직류 전송라인이 생략된 시스템으로 볼 수 있다. 직류 송전선로가 존재하지 않기 때문에 시스템의 직류전압은 50~150 kV의 비교적 저전압으로 설계되어지고 병렬연결을 사용하지 않으면서 싸이리스터가 전송할 수 있는 최대 전류에 대하여 최적 설계되어진다. 변환소에는 고조파 필터와 조상설비가 필수적으로 필요하다. 밸브의 점호각 제어에 따라 변환기는 정류기(교류에서 직류로)나 인버터(교류에서 직류로)로 동작할 수 있다. 직류전압이 양이면 전력이 변환기 1에서 2로 흘러가고 직류전압이 음이면 직류전류의 방향은 동일한 상태에서 전력이 변환기 2에서 1로 흐른다.

표 2. BTB와 PTP의 비교

항 목	Back To Back	Point To Point
송전선로	없음	가공선, 케이블
송전전압	가능한 한 고전압	밸브전류정격최적화
목 적	비동기연계 주파수 변환	장거리대전력 전송 해저 케이블
변환소	정류기/인버터가 동일 변환소 위치	직류선로 양단에 위 치
건설비용	15 - 20% 저렴	

두개의 전력변환기가 동일한 장소에 설치되고 평활용 리액터와 기타설비들을 공유하기 때문에 Back To Back용 변환기는 직류전송라인의 양 끝단에 위치하는 것보다 비용이 15~20% 경제적이다. PTP방식은 장거리 대전력 전송에 이용되지만 BTB 방식은 전력계통의 경제 부분에 설치되어 이중 주파수 계통을 연계하거나 비동기 계통 연계의 목적으로 주로 이용된다. PTP에 비하여 100~300 MW로 비교적 용량이 작은 편이다.

2.2 해석조건

남북한의 적정 연계 전력 용동량에 대해서는 보다 정

1. 서 론

인접한 비동기 전력계통사이의 전력용통을 위한 수단으로는 교류송전선에 의한 방법과 직류송전선에 의한 방법이 있다. 두 개의 독립된 전력계통을 연계하려면 기본적으로 주파수가 동일하여야 함은 물론이고 전압의 위상을 일치시켜야 하며, 계통 확장에 따른 고장전류의 증가를 적정수준이하로 억제할 필요가 있으며, 고장파급을 신속히 억제/차단하여야만 한다. 두 개의 전력계통의 운용전략 또한 동일하지 않기 때문에 교류연계의 경우 계통의 운용전략에 수정이 필요하게 된다. 가령 남북한 전력연계의 경우를 살펴보면 북한 전력계통은 남한에 비하여 전압과 주파수 변동이 매우 심하고 전력설비가 노후한 상태인 것으로 알려져 있다. 불안정한 북한 전력계통과 남한계통이 교류방식으로 직접 연계될 경우 북한측의 전압변동, 주파수변화, 전력설비 사고 등의 영향이 남쪽에 직접적인 영향을 주게 된다. 그러나 Back-to-Back 방식의 직류계통으로 연계할 경우 위에서 언급된 상호영향을 크게 감소시킬 수 있게 된다. 교류계통의 경우 전송전력의 크기와 방향은 두 지점의 전압의 크기, 위상차, 선로의 임피던스에 의해 결정되기 때문에 임의로 제어가능하지 못하나, BTB HVDC와 같은 설비를 이용하면 전송전력의 크기와 방향을 전력용 반도체소자로 구성된 전력변환기에 의해 고속(수백msec이내)으로 제어되어 계통간의 상호영향을 신속히 차단할 수 있게 된다.

북한의 전력계통이 안정적이라면 교류방식의 연계를 고려할 수 있으나 언급된 여러 가지의 기술 및 경제적인 요인들로부터 초기 단계의 전력용통은 직류송전방식이 보다 적절한 대안이 된다. 장거리의 대전력 전송이 요구된다면 가공의 직류송전선로를 필요로 할 것이나 남북한의 경우처럼 지리적으로 인접한 경우라면 BTB 직류송전설비가 보다 경제적인 대안이 될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 남한과 북한의 초기 계통 연계를 고려할 때 요구될 것으로 예상되는 BTB HVDC 설비와 계통조건을 상정하여 컴퓨터 모의를 수행하고 그 결과를 기술한다. CIGRE Benchmarking 모델을 기초로 154 kV 및 345 kV 급의 교류 송전망에 연계되는 300 MW 정격의 BTB 직류송전 시스템을 상정하였다. BTB HVDC에 의한 계통연계의 경우 시스템이 전력계통의 변동리에 위치하는 특성상 연계 점에서의 낮은 단락용량이 연계설비의 용동 특성과 운전전략을 결정하는 변수로 작용한다. 연계 점에서의 교류 등가 전원 용량과 임피던스 특성을 산정하고 시스템의 최대 전송용량과 조상설비, 필

확한 자료에 기초한 산출이 요구될 것이나 본 연구에서는 "남북 전력 현황과 전망"에 대한 대한전기학회의 기술조사보고서 보고서를 참조하여 직류전압 100 kV, 전류 3,000 A, 300 MW 용량의 BTB연계설비를 상정하였다. 컴퓨터 모의해석은 다음의 세 가지 연계전압 계급에 대하여 실시하였다.

표 3 BTB 연계 교류송전선로
단, 송전거리 : BTB-북한연계점 사이의 거리

항 목	전 압 (kV)		AC 선로	단락용량 (남한측)
	남한	북한		
Case-1	문산	평산	154 kV, 60 km	950 MVA
	154	154		
Case-2	의정부	평산	154 kV, 60 km	15000 MVA
	345	154		
Case-3	의정부	사리원	345 kV.-170 km 345kV-220kV	15000 MVA
	345	220		

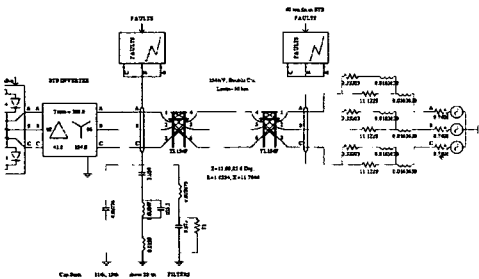


그림 2 BTB HVDC의 인버터측 교류 해석 모델

표 4. BTB HVDC 설비 주요 정격

항 목	정 격	
전 력	300 MW	
직류 전압	100 kV	
직류 전류	3,000 A	
변 압 기	352.4 MVA	
변압기 %Z	12 %	
직류 리액터	50 mH	
11/13차필터	154 kV	27.5 MVar
	345 kV	56 MVar
23차 이상	154 kV	27.5 MVar
고주파필터	345 kV	138 MVar

PSS/E를 이용하여 345 kV 의정부 변전소와 154 kV 문산 변전소에서의 고장용량과 등가 임피던스를 추출하였다. 의정부변전소에서의 고장용량은 15,431 MVA, 단락비 SCR = 51.0 이고 문산 변전소에서는 2,083 MVA, 단락비 SCR = 6.94 의 값으로 계산되었다. 의정부나 문산 변전소에서의 단락용량은 BTB 용량에 비해 충분히 큰 값을 나타내고 있어 안정적인 운전이 가능할 것으로 평가된다. 그러나 교류전압계급을 제외한 북한 전력계통에 대한 자료가 확보되지 않은 관계로 북한측의 교류전원의 등가용량은 모두 950 MVA를 임의 적용하였으며, 인버터에서 연결된 송전선로의 임피던스와 무효전력 보상을 위한 커패시턴스를 고려한 유효 단락비 ESCR = 2.5 의 값을 적용하였다. 인버터에 연결되는 교류 송전선로는 이상적으로 연가된 주파수 의존모델을 사용하였다. CASE-1과 CASE-2에서는 BTB설비에서 북한측으로 154 kV, 1도체, 2회선 선로 60 km를 경유하여 북한 계통에 연계되는 것을 가정하였고, CASE-3 에서는 345 kV, 4도체, 2회선 170 km의 선로를 가정하였다. 고조파 필터는 11/13차 필터와 23

차 이상의 고조파용 필터가 각각 고려되었다. BTB 시스템의 전력흐름은 정류기에서의 전류제어와 인버터에서의 전류제어와 정전압제어 및 소호각 제어를 구비하여 조절되는 것으로 설정하였다.

전류 지령 값은 지령 전력을 직류 전압으로 나누어 생성하며 생성된 전류 지령 값은 직류전압의 크기에 따라 그 크기를 제한하여 정류기와 인버터의 전류제어기에 전달한다. 인버터의 전류 제어기에는 전류 지령 값에서 전류마진이 감해져서 인가되고 전압제어기와 감마각 제어기의 생성 점호각과 비교되어 최대값을 인버터 점호각으로 사용하는 구조로 되어있다. BTB 설비용량이 연계 계통용량에 비하여 작기 때문에 정주파수제어나 계통제동제어와 같은 기능은 배제하였다. 북한에서 남한으로의 전력흐름은 본 해석에서 고려하지 않았다.

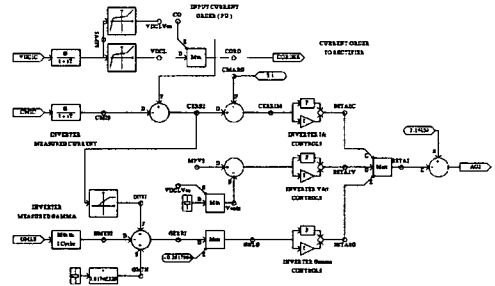


그림 3. 인버터 제어 블록도

BTB 설비의 기초 파라미터는 다음과 같이 계산할 수 있다. BTB HVDC의 설비는 소호각 (γ) 18° 의 인버터와 3 kA의 직류 정격전류로 운전되고 있다. 이 계통은 단극이고 정류기와 인버터는 모두 12 펄스 컨버터이다. 밸브 권선의 선간 전압은 41.6 kV이다.

2.3 컴퓨터 해석 결과

컴퓨터해석은 PSCAD/EMTDC를 사용하였다. 해석은 300 MW 정격조류에 대하여 인버터(북한) 연결 교류선로가 북한변전소와 연결되는 60 km와 170 km 지점과 인버터 근단에서 단상 및 삼상 지락고장을 각각 0.1초간 인가하여 고장상태를 모의하였다. 정상상태에서 300 MW의 유효전력을 변환할 때 인버터가 소비하는 지상무효전력 153 MVar는 필터와 커패시터 뱅크에 의하여 100 % 보상하는 것으로 상정하였다.

$$\frac{IVIL}{V_{DRM}} \times 0.95 = \frac{107 \text{ kV} \times 1.15}{5.2 \text{ kV}} \times 0.95 = 22.48 \approx 23 \text{ 개}$$

밸브는 정격 5.2 kV 의 경우이다. 여기에 3%의 여유를 더하면 밸브당 싸이리스터의 직렬 개수는 24 개가 소요된다.

표 5. BTB HVDC 운전 조건

항 목	전력조류방향(남 → 북)	
	정류기	인버터
전원용량-345 kV	15,431 MVA SCR = 51.0	950 MVA SCR = 3.16
전원용량-154 kV	2,083 MVA SCR = 6.94	1,000 MVA SCR = 3.16
전 송 유효전력	300 MW	
변환기무효전력	j153 MVar	j153 MVar
조상설비	-j153 MVar	-j150 MVar
점호각	α = 16.1°	γ = 18.0°
중복각	-	μ = 15.8°

인버터측(북한측) 송전선 지락사고
BTB 인버터측 60 km 지점에서 100 msec 동안 삼

상 지락사고 발생시 직류전력은 0 MW 수준까지 감소하며 사고가 제거되고 약 1초에 걸쳐 정상상태의 값으로 회복되는 상황을 보여주고 있다. 이 때 직류 전류는 일시적으로 1.8 p.u. 까지 일시 상승하나 VDCL(Voltage Dependant Current Limit) 기능에 따라 제한 값 이내로 억제됨을 보여주고 있다. 인버터측에 삼상 지락이 발생하면 전환(Commutation) 실패가 발생하고 소호각이 0 도로 감소하였다가 고장이 제거되어 전압이 정상으로 회복되면 다시 정상으로 복귀한다. 인버터에 구비된 세 가지 제어가 생성하는 β 각을 보여주고 있다. 이 세 개의 값 중에서 가장 큰 것이 인버터의 점호각 α_{inv} 를 생성하게 된다. 정상상태에서는 전압제어의 값이 선택이 되나 지락사고에 의하여 소호각이 설정값 이하로 감소하면 감마 제어가 점호각을 제어하는 것을 보여주고 있다.

정류기(남한측) 송전선 지락사고

정류기측의 삼상 지락이 100 msec 동안 발생하였다가 제거되는 경우의 전력 및 전압전류의 변화가 그림 21에서 보여진다. 고장 회복시 직류전류가 1.62 p.u. 까지 상승하는 결과를 보이고 있다.

송전선 트립에 의한 300 MW 부하 차단

그림 4에서 인버터에 연결된 60 km 위치에서 송전선이 trip out 되어 300 MW 전력 전송이 일시에 차단되는 경우의 직류전력, 전압, 전류의 변화를 보여주고 있다. 이때 BTB의 정류기와 인버터 밸브는 차단기 개방 10 msec 후에 게이트 신호가 차단되며 필터 및 커패시터 뱅크는 50 msec 후에 선로에서 개방되는 조건을 적용하였다. 그림 13에서 300 MW의 전력흐름이 154 kV 선로 인버터 60 km 지점에서의 차단기 개방으로 일시에 사라지는 경우 인버터측의 교류 전압은 1.524 p.u. ($\Delta V=0.504$)까지 일시 전압이 상승하나 정류기측은 $\Delta V=0.0744$ p.u. 정도의 미소한 상승전압이 나타나는 것으로 해석되었다. 전력량이 급격히 감소할 때 변환기의 무효전력 소비 또한 감소하게 되어 필터 및 조상설비에 의한 진상 무효전력이 전압상승을 초래하게 된다. 부하 차단시 조상설비의 차단이 지연되면 발생 과전압의 크기와 지속시간이 증가하게 된다. 정류기측이 345 kV이고 인버터측이 154 kV, 60 km의 선로에 연결된 경우에 그림 28에서처럼 인버터측 교류 전압은 1.661 p.u. 까지 일시 전압상승이 발생하나 정류기측의 전압상승은 ΔV 는 0.01 p.u. 정도 발생하는 결과를 보이고 있다. 그림 6은 345 kV 송전선에 연계된 경우로서 인버터에서 170 km 떨어진 지점에서 송전선이 부하와 차단되는 경우의 모선에 발생하는 과전압을 보여주고 있다. 300 MW를 전송하고 있는 조건에서 인버터측은 1.2907 p.u.의 최대 전압상승이 약 50 msec 동안 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 부하차단에 의한 필터와 커패시터가 50 msec이내에 제거된다면 과전압은 80 msec 이내에 소멸되는 것으로 나타나고 있다.

변압기 가압과 필터의 개폐

변압기 무부하 가압시 154 kV 인버터 측의 교류 전압은 최대 0.5 초간 약 5% 전압변동을 보이며 돌입전류에 의한 고조파 전압이 나타난다. 무부하 조건에서 154 kV 인버터측의 27.5 MVar 필터 개폐에 의하여 4% 전압변동이 발생하며 과도 변화시 최대 30 msec동안 5.8%정도의 전압변동을 발생시킬 수 있는 것으로 해석되었다.

3. 결 론

345 kV 의정부변전소와 154 kV 문산 변전소에서 북한계통으로 연결되는 시스템을 대상으로 남북한 초기 전력융통을 위하여 이용이 예상되는 Back-To-Back HVDC 설비를 상정하여 연계점에서의 교류 등가 전원 용량과 임피던스 특성, 시스템의 조상설비, 필터의 요구량을 산출하고 운전상황을 해석하여 보았다.

(참고 문헌)

- [1] A.E.Hammad, W.F.Long, "Performance and Economic Comparisons Between Point-to-Point HVDC Transmission and Back-To-Back HVDC/AC Transmission", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5.No.2, April 1990
- [2] 대한전기학회 남북 전력현황 조사전문위원회, "남북전력현황과 전망", 1998.10

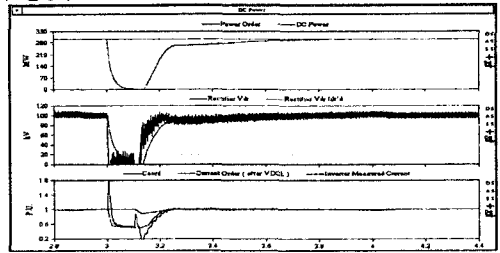


그림 4. 154 kV 인버터 60km 지점 3상 지락사고

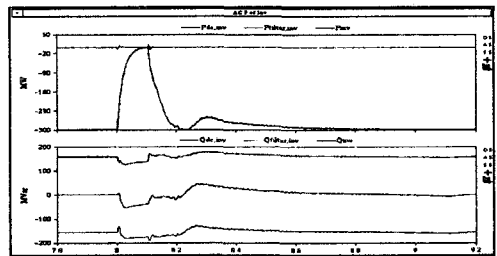


그림 5. 154 kV 정류기 삼상 지락사 Pdc, Qdc

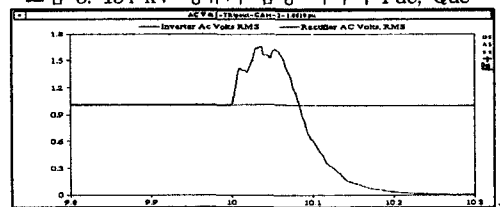


그림 6. 300 MW 부하 차단시 154 kV 전압상승

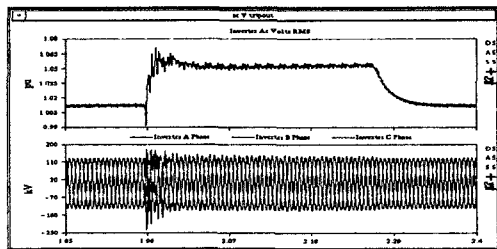


그림 7 154 kV 필터 개폐시 전압 변동

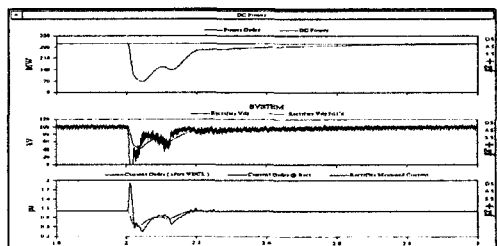


그림 8. 345 kV 인버터 170 km 지점 단상지락