

BTB 컨버터 적용 연구 및 설치 해외사례

장길수 / 고려대학교
박정수 / 고려대학교

19세기 말, 토마스 에디슨(Thomas Edison)과 조지 웨스팅하우스(George Westinghouse)의 DC 대 AC 전류 전쟁에서 승리한 AC 방식은 발전, 송전, 그리고 배전에 이르는 모든 전력 시스템의 표준이 되었다. 20세기 중반, AC-DC 그리고 DC-AC 컨버터가 개발이 되면서 DC 방식이 장거리 고압 직류 송전과 같은 몇몇 특수한 경우에 적용되어 왔으나 전류 전쟁 이후 100년이 넘는 시간이 흐른 지금까지도 대부분의 전력 시스템은 여전히 AC 방식으로 운영되고 있다.

과학기술이 발전하고 경제 규모가 커지게 되면서 전력 사용량은 나날이 증가해 왔다. 석탄, 석유와 같은 화석 연료를 직접 태워서 에너지를 얻어야만 했던 많은 문명의 이기들이 전기를 통해 에너지를 얻는 형태로 바뀌게 되고, 또한 경제 발전이 에너지 소비량을 증가시키게 되면서 전력 수요는 비약적으로 증가해 왔다. 그 결과 전력 시스템의 규모는 커지고 대규모 장거리 송전 등으로 시스템 운용이 복잡하게 되었으며 이는 전력 시스템의 설비 용량 등의 공급 문제 외에 안전도와 같은 문제들을 가중시키고 있다. 최근 나타나고 있는 이런 문제점들로 인하여 과연 AC 방식이 전력 시스템의 안전도와 전력 수요 증가, 그리고 효율적인 전력 시장 운영을 보장할 수 있는지에 대한 의문이 제기되고 있다.

미국 DCI (DC Interconnect) 사는 전력 산업이 비용의 효율성 면에서 미래의 수요를 만족시킬 수 있도록

AC와 DC 기술 모두를 이용하는 방법을 개발해 왔다. DCI가 제안한 방법은 상호 연결되어 있는 거대한 전력망을 DC 연계선을 이용하여 비동기 운전하는 작은 지역들로 분할(Grid Segmentation)하는 것이다. 한편, 미국 EPRI는 전압형 컨버터를 기반으로 하는 제어기(Voltage Source Converter type HVDC)를 전력망의 충격 완화 장치(Grid Shock Absorber)로 사용하여 상호 연결되어 있는 거대한 전력망의 강건함을 증가시키는 방법을 제안하였다.

이 두 기관은 자신들의 계통 분할(Grid Segmentation)과 충격 완화 장치(Grid Shock Absorber) 개념이 얼마나 효율성이 있는지를 검증하기 위하여 미국 동부 연계 계통(Eastern Interconnection)을 대상으로 공동 연구를 수행 하여 그 결과를 발표(H. Clark, A. A. Edris, M. El-Gasseir, K. Epp, A. Isaacs, D. Woodford, "Softening the Blow of Disturbances," IEEE Power & Energy Magazine, vol. 6, issue 1, pp. 30~41, January-February 2008) 하였다. 이 연구에서는 전압형 컨버터를 이용한 BTB HVDC 모델이 사용 되었으며, 이 BTB HVDC를 AC 연계 계통에 적용하여 전력 전달 용량을 증가시키면서도 전체 계통의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 보였다.

본 원고에서는 EPRI와 DCI 사의 공동 연구 결과를 설명하고, BTB HVDC의 해외 적용 사례를 간단히 소개하고자 한다.

1. 외란 충격의 완화

① 기본 개념

아래 그림 1은 BTB HVDC를 이용한 계통 분할 및 제어의 기본 개념을 보여주고 있다. 이 그림에 나타나 있는 것처럼 A 지역에서 발전 탈락이 일어난 경우를 가정하여 생각해 본다.

각 지역들 간의 연계선이 AC로 이루어져 있을 경우 A 지역에서 발전기 탈락이 발생하게 되면 상호 연결되어 있는 계통 전체에 작은 주파수 강하가 발생하게 되고 이는 대체 발전기가 동작할 때까지 유지될 것이다. 만약 A 지역의 탈락된 발전량이 과도할 경우에는 A와 B 지역 사이의 동기가 상실되거나 A와 B 지역에 전압 붕괴가 발생하게 될 것이다.

그러나 그림 1에 나타나 있는 것처럼 지역들 간의 연계선에 BTB HVDC가 설치되어 있는 경우에는 손실된 발전량을 지역 A의 다른 발전기들과 BTB HVDC가 공유하게 된다. 따라서 해당 지역 내의 순동 예비력을 최대한 활용하게 하여 연계선의 스트레스를 최소화할 수

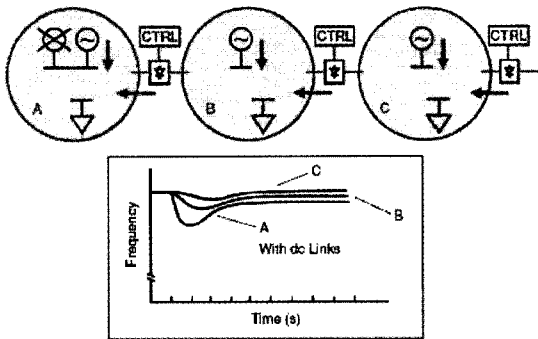


그림 1 사고가 발생했을 때 BTB HVDC의 효과

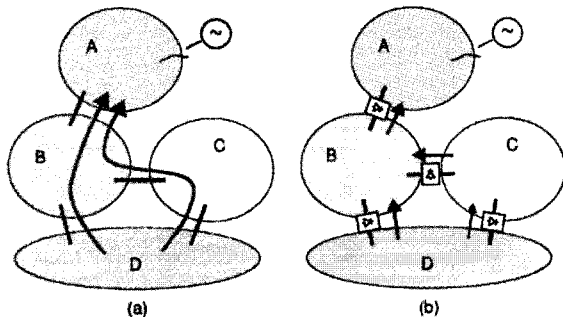


그림 2 (a) AC 시스템과 (b) BTB HVDC 시스템이 설치되었을 때의 미국 동부 연계 계통

있다. 손실된 발전량이 크다면 해당 지역 내에서 전압 강하가 크게 나타나게 되고 허락된 용량 범위에서 BTB HVDC는 주파수의 저하를 막기 위해 더 빠르게 반응할 것이다. 그러나, BTB HVDC는 A 지역이 저주파수 부하 차단이 일어나는 것을 방지하는 것 보다는 이러한 영향으로부터 지역 B와 지역 A-B 간의 연계선이 안전할 수 있도록 지역 B로부터 A로 전달되는 전력량에 제한을 두고 운전하게 된다.

② 미국 동부 전력계통 사고에 대한 적용 사례

아래 그림 2는 이 연구에서 사용된 2011년 미국 동부 연계 계통의 구조를 보여주고 있다. 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼 미국 동부 연계 계통은 3개의 지역(지역 A, B, C)이 훨씬 큰 외부 D 지역과 연계되어 있는 구조를 가지고 있다.

본 시나리오에서는 A 지역에서 약 2,700MW의 발전량이 탈락하는 사고를 가정하였다. 이 사고는 연계선에서 설정된 계통 운영 한계 1,200MW를 훨씬 넘어선다. 그림 2(a)에서처럼 지역 간 연계선이 AC 시스템으로 구성되었을 경우, 탈락된 발전량을 보충하기 위해 타 지역으로부터 A 지역으로 전달되는 전력량이 증가하게 된다. 이 때 아래 그림 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼 지역 간 연계선에 과부하가 발생하여 약 7.0초에 첫 번째 선로가 탈락하게 된다. 이 선로 탈락은 다른 연계선에 부담을 가중시켜 약 14.0초에 두 번째 선로 탈락이 발생하게

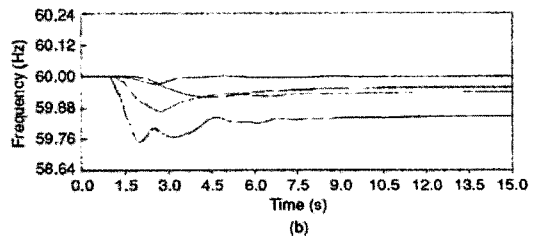
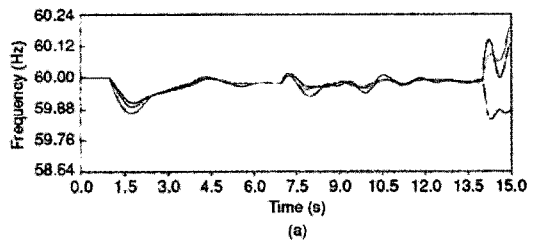


그림 3 (a) AC 연계선과 (b) BTB HVDC가 사용되었을 때의 주파수 변화

● 기 획 시 리 즈

되고 결국 전체 계통이 붕괴된다.

그림 3(b)와 4(b)는 그림 2(b)에서와 같이 각 지역 간 연계선에 BTB HVDC가 설치되었을 경우를 가정한 시뮬레이션 결과이다. 그림 2(b)에 나타나 있는 것처럼 연계선에 설치되어 있는 BTB HVDC가 계통 운영 한계 1,200MW로 전력 전달량을 제한(그림 4(b))하여 A 지역의 주파수 강하가 AC 연계선이 설치된 경우보다 더욱 크게 나타나(그림 3(b))게 되지만 과부하로 인한 선로

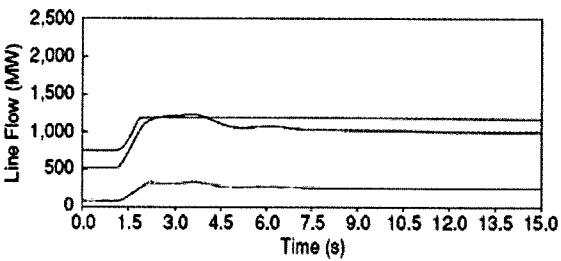
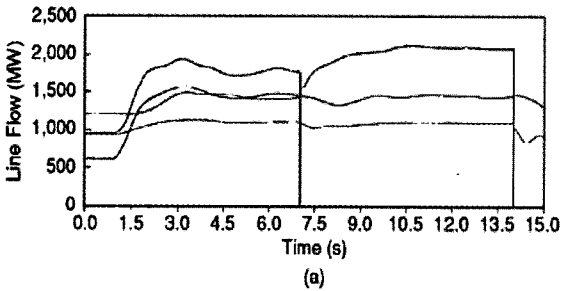


그림 4 (a) AC 연계선과 (b) BTB HVDC가 사용되었을 때의 연계선 전력 조류 변화

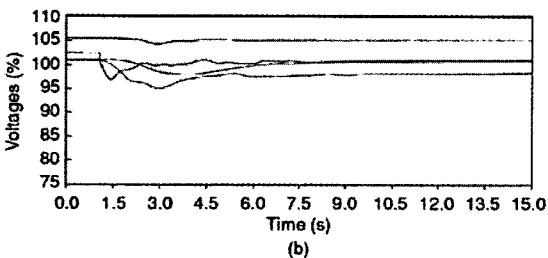
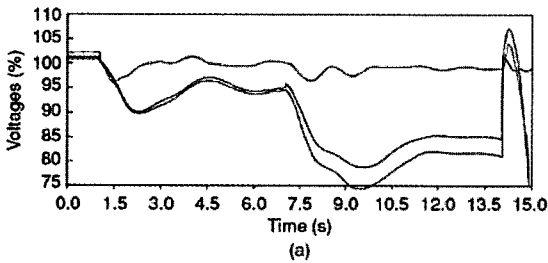


그림 5 (a) AC 연계선과 (b) DC 연계선이 사용되었을 때의 전압 변화

탈락 없이 전체 계통이 동기를 유지할 수 있게 된다.

③ 연쇄 고장 시나리오

아래 그림 6(a)는 2003년 8월 14일에 동부 연계 계통에서 실제로 발생한 연쇄 고장 사례에 기초한 것이다. 이 그림에서처럼 D 지역 내부에는 약 10,000MW의 용량을 가진 Metro라는 구역이 존재하고, 이 Metro 구역은 D 지역의 나머지 구역으로부터 수천 MW의 전력을 공급받고 있다.

그림 7(a)에 나타나 있는 것처럼 약 0.5초에 D 지역과 Metro 구역 사이의 2회선 선로가 탈락 되고, 약 5초 후에 다른 병렬 1회선 회로가 또 다시 탈락되어 D 지역의 모선들과 Metro 구역의 모선들 간에 전압 위상차가 커지게 되었다. 약 7.5초에 또 다른 선로 하나가 추가로 탈

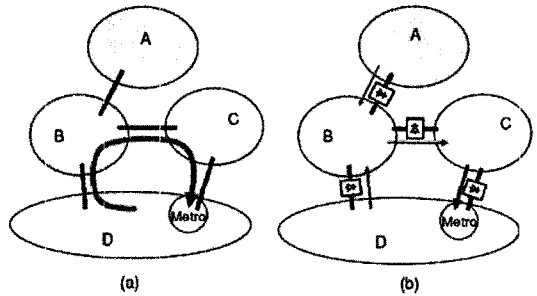


그림 6 (a) AC 연계선과 (b) BTB HVDC가 설치되었을 때의 연쇄 사고 사례

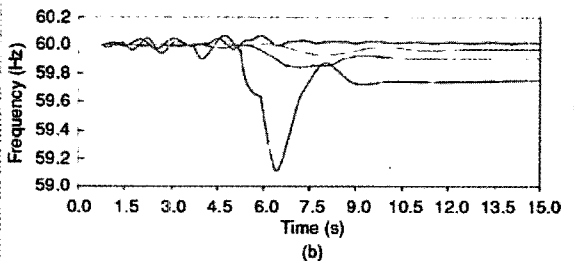
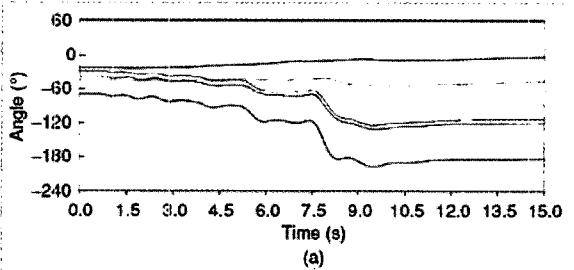


그림 7 (a) AC 연계선이 설치되었을 때의 위상각 변화, (b) BTB HVDC가 설치되었을 때의 주파수 변화

락이 되면서 이 두 지역 내 모선들 간의 전압 위상차는 더욱 증가하여 약 180°에 이르게 되었다.

이 연속적인 사고들로 인해 계통의 동기가 상실되고, Metro 구역과 D 지역 간의 나머지 AC 연계선들이 거리 계전기 오작동에 의해 모두 개방되면서 Metro 구역은 오직 C 지역으로만 연결되어 Metro 구역은 D 지역으로부터 B와 C 지역들을 거치는 먼 경로를 통해 전력을 공급받게 되었다. 따라서 이 경로를 따라 전압 강하가 발생(그림 8(a))하게 되고 그로인해 인접 지역의 발전기들이 여자 한계에 부딪히게 되면서 전체 계통이 붕괴되었다.

그림 5(b)에서와 같이 각 지역 간 연계선에 BTB HVDC가 설치되었다고 하더라도 Metro 구역과 D 지역의 간의 지역적인 연쇄 고장과 불안정은 막을 수 없다. 오히려, BTB HVDC가 C 지역과 Metro 구역 간의 전력

조류를 제한하여 Metro 구역의 위상각이 더욱 빠르게 뒤쳐지게 된다. 따라서 그림 7(b)와 8(b)에 나타나 있는 것처럼 Metro 구역과 D 지역 간의 동기 탈조는 AC 연계선이 설치되었을 때보다 약 1초 더 빠르게 나타나게 되고, 이 동기 탈조로 인해 Metro 구역 내에서 부하 차단이 일어난다. 그러나 추후 BTB HVDC에 의해 탈조가 방지된 C 지역으로부터 안정적으로 전력을 공급받게 되면서 Metro 구역의 주파수는 빠른 회복이 가능하게 된다.

그림 9는 BTB HVDC가 설치되었을 때의 C 지역과 Metro 구역 간의 전력 조류를 보여 준다. BTB HVDC는 전압 불안정과 주파수 강하가 일어나는 중에도 Metro 구역으로 전력을 계속 전달하지만, 그 양을 제한하여 열, 전압, 또는 안정도 문제로부터 C 지역을 보호하고, 급격한 전압 변동을 줄여준다. 또한 Metro 구역이 D 지역으로부터 분리되어 주파수가 떨어질 때 빠르게 전력을 Metro 구역으로 공급할 뿐만 아니라, Metro 구역에서 부하 차단이 발생한 후에도 전력을 공급하여 주파수가 회복될 수 있도록 한다.

위 그림 2와 6의 연구 결과에서 볼 수 있는 것처럼 BTB HVDC는 계통 내의 순동 예비력을 최대한 활용하여 연계선의 부담을 최소화하고 전체 계통의 신뢰도를 향상시키는 효과를 가져왔다.

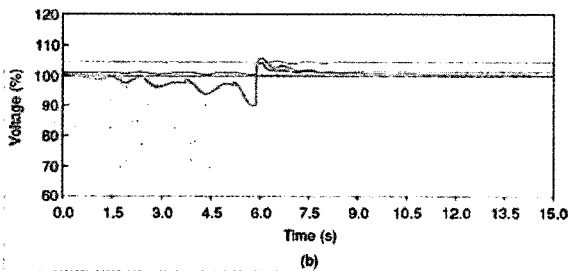
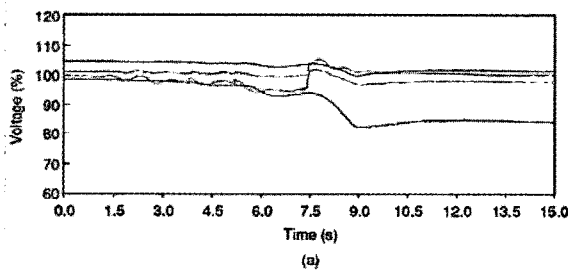


그림 8 (a) AC 연계선과 (b) BTB HVDC가 설치되었을 때의 전압 변화

2. BTB HVDC의 해외 적용 사례

① 캐나다 Mc-Neill BTB HVDC

1989년 준공된 150MW 정격의 McNeill BTB HVDC 시스템은 캐나다의 유일한 동서 연결송전 선로이다. 캐나다의 각 시스템이 미국과 연계 운전되는 상황에서 일반적인 교류 송전방식으로는 동서간의 연결이 곤란하

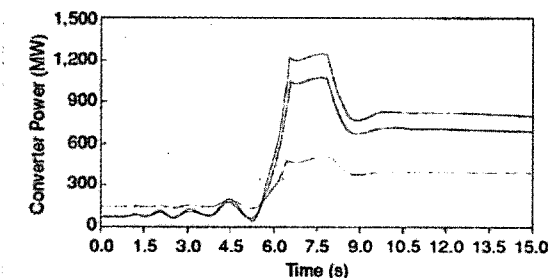


그림 9 BTB HVDC가 설치되었을 때 C 지역과 Metro 구역 간의 전력 조류

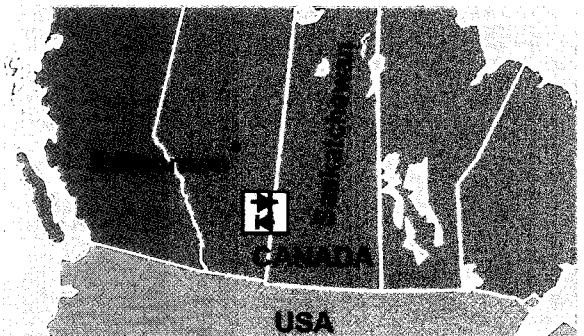


그림 10 캐나다 Mc-Neill BTB HVDC

● 기 획 시 리 즈

여 직류 송전 방식이 채택되었다.

캐나다의 Alberta와 Saskatchewan을 연계하는 이 BTB HVDC는 연계되는 교류 계통이 송전 용량 150MW에 비해 약한 계통이기 때문에 교류 계통의 과전압을 제한하는 BTB HVDC의 무효전력 제어 모드를 이용하여 정상 상태와 과도 상태에서의 안정 운용을 도모한다. 교류 전압의 정상 상태 제어는 컨버터와 고조파 필터, 병렬 리액터의 협조 제어에 의해 이루어진다.

② 일본의 BTB HVDC 연계

일본은 여러 개의 섬으로 이루어진 국토와 서로 다른 2개의 주파수로 구성되어 있는 계통 특성으로 인하여 PTP 및 BTB HVDC를 다수 사용하고 있다. 일본의 가장 대표적인 BTB HVDC 적용 사례는 관동지방과 관서지방을 비동기 연계하는 Shin-Shinano와 Sakuma 시스템이다. 일본의 전력 계통은 관서 지역은 60Hz 계통으로 관동 지역은 50Hz 계통으로 구성되어 있다. 따라서 이 두 지역 간의 계통 연계를 위해 CEPSCO(Chubu Electric Power Co.)와 TEPCO(Tokyo Electric Power Co.) 간에 BTB HVDC 시스템들이 설치되어 주파수 변환기(Frequency Converter, FC)로 동작하고 있다. 이 연계 시스템은 각기 다른 주파수를 사용하는 두 계통 중 어느 한 계통의 주파수가 제한된 범위를 벗어나게 되면 다른 지역으로부터 사전에 정해진 전력량을 긴급 투입하여 주파수를 조절하는 역할을 한다.

일본에서 BTB HVDC가 적용된 또 다른 사례는 HEPCO(Hokkuriku Electric Power Co.)와 KEPCO(Kansai Electric Power Co.), 그리고

CEPCO(Chubu Electric Power Co.) 계통들 간의 전력 제어용으로 사용되고 있는 Minami-Fukumitsu 시스템(300MW)이다. 이 BTB 시스템은 이 세 계통들 간에 불필요한 환상 조류(Loop Flow)가 발생하는 것을 막고, HEPCO와 CEPCO 계통 간의 전력 조류를 자유롭게 제어하기 위하여 설치되었다.

KEPCO와 HEPCO 간의 AC 연계선이 끊어지게 되거나 HEPCO 내의 발전기 탈락으로 인하여 계통 내의 자체 발전기들만으로 HEPCO 계통의 주파수 제어가 힘들 경우 BTB HVDC가 AFC(Automatic Frequency Control) 모드로 운전되면서 HEPCO 계통의 주파수를 제어하는 역할을 한다.

③ 인도 BTB HVDC

인도는 전체 전력 계통을 3개(Eastern, Western, Southern)로 나누어 비동기 운전하고 있다. 이 세 계통들을 연계 운전하기 위하여 서부와 남부 계통을 연계하는 Chandrepur(500MW?), 동부와 남부 계통을 연계하는 Visakhapatnam(500MW), 그리고 동부와 서부 계통

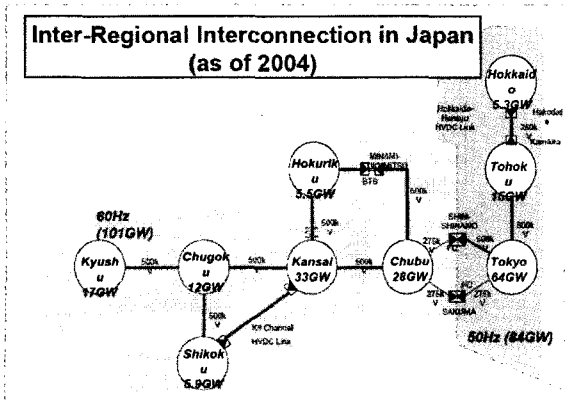


그림 11 일본의 HVDC 현황

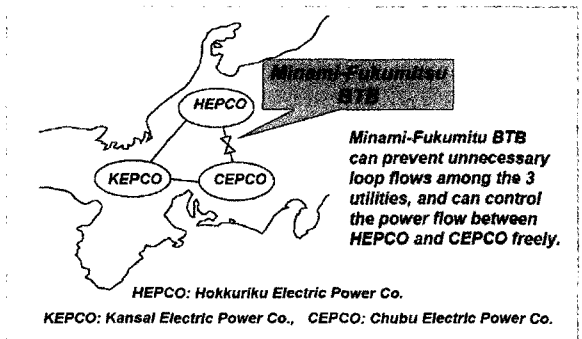


그림 12 Minami-Fukumitsu BTB HVDC 시스템

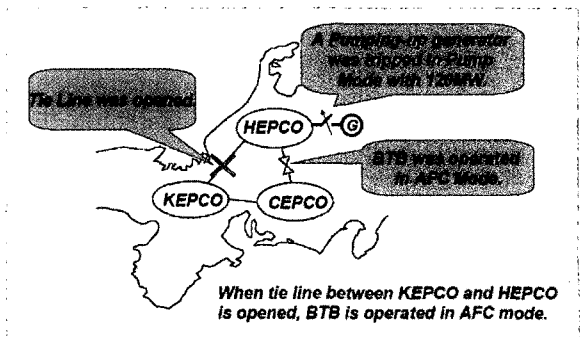


그림 13 Minami-Fukumitsu BTB HVDC 시스템의 역할

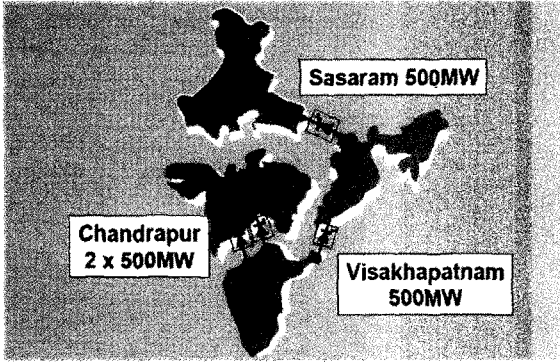


그림 14 BTB HVDC를 이용한 인도의 비동기 연계

을 연계하는 Sasaram(500MW)를 BTB HVDC 시스템들을 설치하여 운영하고 있다.

④ GCCIA(Gulf Cooperation Council Interconnection Authority) 프로젝트

Areva는 걸프 만의 인접 국가들을 지나는 400kV AC 연계선에 1,800MW(600MW×3) 용량의 BTB HVDC 시스템을 설치할 예정이다. 이 AC 연계선은 UAE에서 시작하여 사우디아라비아를 지나 쿠웨이트까지 연결되는

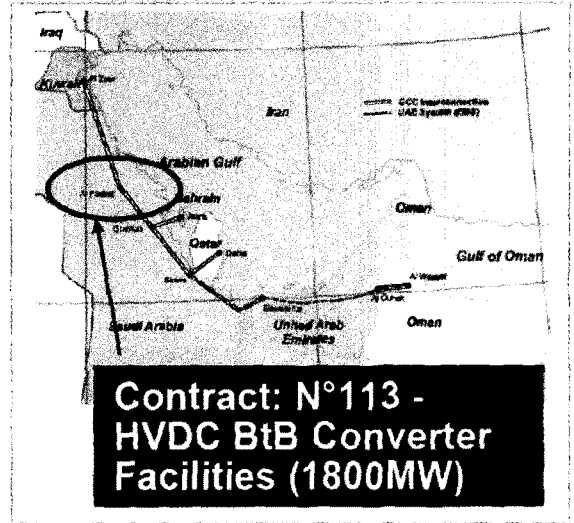


그림 15 GCCIA BTB HVDC 프로젝트

장거리 송전선으로써 사우디아라비아에서 바레인과 카타르로 연결되어 이들 국가에 전력을 공급한다. 이 시스템은 사우디아라비아에서 쿠웨이트로 전달되는 전력을 제어함으로써 송전선의 손실과 오차를 보상하는 역할을 한다.