

VSC-HVDC 적용 기술의 경제성 평가 분석
- HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC (CIGRE WG-B4.46 492 Report를 중심으로) -

여서현*, 선취일*, 김선필*, 박성미**, 유동욱***, 박성준*
 전남대학교*, 한국승강기대학교**, 한국전기연구원***

Economic Analysis of Voltage Source Converter(VSC) HVDC Technologies
- HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC (focusing on CIGRE WG-B4.46 492 Report) -

Seo-Hyun Yeo*, Hwi-il Seon*, Sun-Pil Kim*, Seong-mi Park**, Dong-Wook Yoo***, Sung-Jun Park*
 Chonnam National University*, Korea Lift College**, KERI***

Abstract - 본 논문은 CIGRE 492 보고서를 따른 것으로 최근 해외 선도 기업 및 미국, 유럽, 중국 등에서 도입하고 있는 LCC-HVDC, VSC-HVDC와 기존 송전시스템인 HVAC의 기술 및 경제적 효율성을 비교분석하였다. 분석 방법은 동일한 조건을 설정하여 각 시스템에 모의 적용하였으며, ① HVAC와 VSC-HVDC와의 비교 ② LCC-HVDC와 VSC-HVDC와의 비교를 진행하였다. 그 결과 시간 흐름에 따라 AC보다 DC에서의 경제적 효율성을 확인하였고, 또한 HVDC의 전류형과 전압형의 비용 분석에서는 오차범위, 추가적 편익 등을 고려할 시 전압형의 경제성에 대한 긍정적 측면을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 일반적인 PWM 방식을 택하였으나, 추후 연구에서는 최근 선도 기술이라 평가받는 MMC 방식의 전압형 HVDC를 적용하여 연구하고자 한다.

1. 서 론

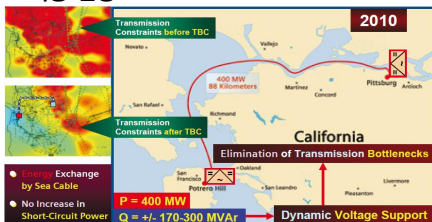
초고압 송전탑 건설에 반대하는 경남 밀양 사태는 주민들의 거센 반발에 부딪혀 아직까지도 이렇다 할 대책을 마련하지 못하고 있으며, 이는 밀양 주민들의 고통 뿐 아니라 국내 전력 공급에 있어서도 큰 문제점으로 여겨지고 있다. 밀양 뿐 만이 아니다. 신울진 원전~경기 간 230km의 송전선로 설치 문제, 삼척 송전탑 문제와 같이 제2의 밀양사태가 우려되는 사건들은 우리 사회에서 꾸준히 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 앞으로 초고압 송전탑이 건설되는 지역마다 발생할 가능성이 있으며, 이는 비용 문제와 직결될 뿐만 아니라 안정적인 전력 공급과 전력 공급 신뢰도를 향상시키는 데 있어 큰 장애물이 된다. 게다가 오늘날 세계 각국에서는 전력 수요 급증에 원활히 대처하고자 국가 간 전력 계통 연계, 원거리 전력 전송 등을 추구하는 중이다. 이와 같은 환경 변화는 미국, 유럽, 중국 등의 국가와 ABB, Siemens, Alstom 등의 기업에 의해 선도적인 HVDC 송전 시스템을 도입하려는 노력으로 이어지고 있으며, 기존 송전시스템의 단점을 보완하는 VSC-HVDC가 그 대안으로 각광받고 있다. 본 논문에서는 기존 기술과의 비교를 통해 VSC-HVDC의 장점에 대해 파악하고자 하며, 특히 모의 적용 사례를 기반으로 한 경제성 분석을 통하여 전압형 HVDC가 가지는 경제적 이점에 대해 알아보하고자 한다.

2. HVDC 시장동향 및 기술 비교

2.1 HVDC 시장 동향 및 필요성

HVDC의 기존 시장은 주로 장거리 송전을 위한 프로젝트가 대부분이었으나 최근 환경에 대한 관심이 증가하고 신기술이 등장하여 신재생에너지 발전이 가능해짐에 따라 신재생 에너지와 연계하는 HVDC 시장이 빠르게 성장하고 있다. 또한 해상 풍력의 성장, 계통연계의 필요성, 효율 향상 등의 원인은 세계 HVDC 시장 규모 성장에 순영향을 미치고 있다. 기존에는 HVAC에 비하여 높은 초기 투자비용 때문에 AC망을 보완하는 정도에 지나지 않았으나, 전력전자 기술 발전에 따른 가격 인하 및 성능 향상 등으로 점차 HVAC를 대체하는 수준까지 이르고 있다. 국내 또한 선도 기술이 집약된 HVDC가 도입될 경우 전기 관련 전 분야로 기술이 파급될 수 있으며, 이를 지중화할 시 최근 국내에서 나타나는 한전과 초고압송전탑 및 선로 설치로 인한 지역 주민들 간의 갈등 해소 및 비용 절감 등의 효과가 나타날 수 있다. 이러한 효과는 전력 공급지와 수요지 간의 분리로 인하여 대규모 전력 전송이 필요한 국내 전력 시장의 상황을 해결할 수 있는 좋은 대안으로 이어질 수 있다.

2.2 HVDC 적용 현황



자료 : SIEMENS

〈그림 1〉 VSC-HVDC가 적용된 SIEMENS의 Trans Bay Cable Project

현재 국내 HVDC 적용지는 LCC-HVDC 방식의 1호기(전류형, Alstom의 기술 도입, 제주-해남간 180kV), 2호기(전류형, LS산전의 케이블 기술, Alstom의 변환소 기술 도입, 진도-제주간 250kV)만이 도입되어 있다. 반면 미국, 유럽, 중국 및 해외 선도 기업에서는 HVDC 고급 기술의 보유로 인하여 전압형 HVDC를 적극 적용하고 있다.

2.3 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC 비교

HVDC는 교류 전력을 직류로 변환하여 전력을 효율적이고 안전하게 송전하는 전력 송전시스템이다. 전력변환 구성 방식 및 전력반도체 소자에 따라 크게 사이리스터를 이용한 LCC(Line Commutated Converter, 전류형), IGBT를 이용한 VSC(Voltage Sourced Converter, 전압형) 방식으로 구분되며, VSC-HVDC 기술은 PWM, MMC, HML, CTL 등의 방식으로 분류된다. 표1은 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC 간의 비교를 통한 각 시스템별 원리, 구성 및 장단점을 나타낸 것으로, 전압형 HVDC가 가지는 각각의 장점으로 인하여 기존 송전시스템에 비해 비용절감 효과가 나타날 수 있으며, 특히 Blackstart기능 및 지중화가능 등의 장점은 보다 안전하고 신뢰성 있는 전력 시스템을 구성할 수 있다.

〈표 1〉 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC 비교

	HVAC	전류형(LCC) HVDC	전압형(VSC) HVDC
원리	-AC 송전 방식 (DC변환 없음)	-사이리스터 소자 사용 (Turn-on만 가능) -소자의 Turn-On 시간 조절로 흐르는 전류의 크기를 제어 (1초에 120)	-IGBT 소자 사용 (Turn-On/Off 가능) -소자의 Turn-On/Off를 통해 AC전압 크기와 위상 제어 (1초에 수천번)
구성	-변환소, 송전선로, 송전탑, 변압기 가스절연개폐장치 -진단제어장치	-컨버터, 펄스 리액터, 고조파필터, 전극, DC선로,AC회로차단기, 무효전력공급원 -컨버터발생 고조파 및 흡수되는 무효전력 공급위한 고조파필터, 병렬 커패시터 (또는 무효전력보상설비) -접지 위한 전극, AC측 사 고시 권선구간과 사고구간 구분하는 AC회로차단기	-컨버터 스테이션, 변압기, AC필터, 위상리액터, 커패시터, DC차단기, DC 케이블 *MMC방식-200레벨 이상일 경우 일반변압기 사용 가능, AC필터 사이즈가 대폭 감소 가능 -LCC-HVDC와 달리 무효전력 공급을 위한 설비가 필요하지 않아 그만큼 설치면적 감소
장점	-운전경험 축적 (국내대부분) -국내 기술보유 -변전소 건설비 작음 -송전선로 건설비 작음 -손실 감소 -전력흐름제어가능 -고장파급 방지로 계통신뢰도 향상	-철탑규모 작음 -대용량 설비 가능 (최대 800kV, 8GW급) -전력변환손실 작음 (0.7%수준) -컨버터 가격이 저렴함 -긴 상용선로 통한 기술검증 -전압, 전류 변동이 낮아 전자기파 유도 발생 무 -타계통과 연계가능 주파수 -장거리 지중화 가능	-철탑규모 작음 -설치면적이 작음 (전류형의 60%) -Black Start 가능 -교류대비 손실 작음 (60-70%) -무효전력보상설비 불필요 -AC 전압원 불필요 -장거리 지중화 가능 -양방향 송전 자유 -DC Grid 가능 -전압, 전류 변동이 낮아 전자기파 유도 발생 X -타계통과 연계가능한 주파수
단점	-조류제어 불가능 -고장시 계통영향 큼 -철탑 규모 큼 -765kV 지중화 불가 -지중송전계약(30km이내) -장거리 전송시 큰 손실	-설치면적이 큼 (200x120x22m, 600MW) -철탑 비용 고가 -복잡한 운영 -AC전압원 필요 -DC Grid 적용 어려움	-중급용량 (최대 345kV, 1GW급) -설비비용 고가 (전류형대비 10~15%고가) -전력변환손실 상대적으로 큼 (1%수준)
활용 범위	-가공선로와 송전탑 연결 시 장거리 송전 가능 -기술적 제약 적음	-1:1 대용량/장거리 송전에 적합	-기술적 제약이 적어 용도제한 없음 -멀티터미널(1:N)연계 적합
주요 동향	-시장성숙, 기술개발 완성 -국내 송전시스템의 대부분	-제주-해남 HVDC 적용 -시장성숙, 기술개발완성	-세계 각국이 제품개발 출시 중 -경쟁적 기술개발 단계

자료 : MMC기반 전압형 직류 송전 시스템 개발, 산업통상자원부, 2014.12 참고

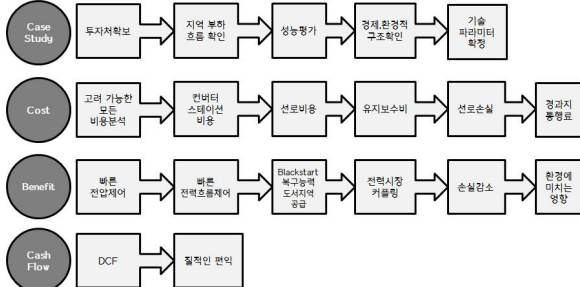
-밀줄 (HVAC에 대비한 VSC-HVDC의 주목할 점)
 -진하게 (LCC-HVDC에 대비한 VSC-HVDC의 주목할 점)

3. HVDC 시스템 모의 적용 및 비교를 통한 경제성 평가

본 3절에서는 CIGRE492 보고서에서 진행한 모의 경제성 평가를 토대로 VSC-HVDC가 가지는 경제적 이점에 대해 파악하고자 한다. 우선 HVAC와 HVDC의 현금 흐름 분석을 통하여 도출한 손익분기점을 비교하여 HVDC의 경제성을 확인할 것이다. 또한 LCC-HVDC와 VSC-HVDC에 동일한 조건을 적용한 경제성 평가를 토대로 전압형 HVDC 시스템이 가지는 경제적 이점에 대하여 확인하고자 한다.

3.1 분석 절차

경제성 분석 절차의 구체적인 흐름은 그림2와 같다.



자료 : CIGRE Technical Brochures 492, April 2012, p.51-55 참고

〈그림 2〉 경제성 평가 분석 흐름

- ① Case Study Analysis - 핵심 기술의 성능 파라미터 확정, 기술의 실현성 확인, 정보수집 및 투자 확정, 정책 검토 등
- ② Cost - 고려 가능한 모든 비용 비교 및 분석
- ③ Benefit - 가치 환산 가능한 기능적, 경제적, 기술적 등 분석
- ④ Cash Flow - 비용편익 분석을 기반으로 NPV에 따른 투자결정

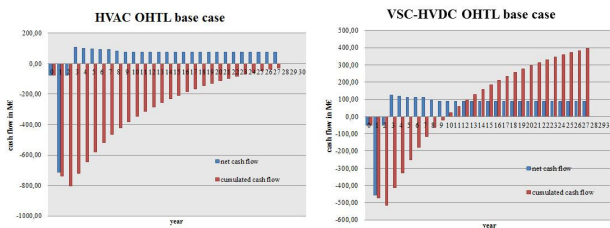
3.2 고려 대상 분석 요소

- 비용: 컨버터스테이션 설치비용, AC제어설비(GIS, 차단기) 구성비용, 토지 면적, 토목/건축공사비, 가공·지중전선/케이블 단가, 컨버터스테이션·전선/케이블 연평균 유지보수비, 수명기간, 전류형 추가시 무효전력보상설비 설치비
- 편익: VSC-HVDC만의 기능인 계통전압유지, Black-Start, 독립전원 공급 등의 제어기능 및 컨버터스테이션 부지비용, 지중화에 따른 편익계산 등

3.3 경제성 평가

3.3.1 HVAC와 HVDC간 손익분기점 비교

동일한 조건 하에서 대용량 원거리 계통을 연결한 모의 사례 분석으로서, 거리 1000km, 용량 1500MW, 계통 연계에 따른 규제는 없으며 두 시스템 모두 연간 8,300시간 사용, 총 30년을 운전한 것으로 가정한다. 또한 3.2에서 언급한 분석 factor를 고려하여 경제성 평가를 진행하였을 때, 그림3과 같은 현금흐름 그래프를 도출할 수 있었다. 파란색은 순현금흐름, 빨간색은 누적현금흐름으로 좌측 HVAC의 경우 두 지점의 비용편익이 상쇄하는 부분은 약 27년로 나타난 반면 우측 VSC-HVDC의 경우 손익분기점이 9년으로 나타났다. 즉, VSC-HVDC의 시간흐름에 따른 비용우위를 확인하였다.



자료 : CIGRE Technical Brochures 492, April 2012, p.98-100

〈그림 3〉 HVAC와 HVDC의 현금 흐름

3.3.2 LCC-HVDC와 VSC-HVDC의 모의 조건 적용

본 연구에서는 다음의 모의 조건을 LCC-HVDC, VSC-HVDC에 각각 적용하여 경제적 분석을 진행하였다.

- 임의의 두 국가, 거리 190km, PTP타입, 2016년 시운전
- 용량 1000MW(단일용량, 500MWx2)
- 1년(8,300시간) 운영, 지중 케이블 사용 및 최대 4개의 케이블 사용
- 단상 변압기 사용 (과부하용량 비교)
- 사고 후 15분 내 500MW 회복, 컨버터스테이션은 제한된 지역에 위치

3.3.3 LCC-HVDC와 VSC-HVDC의 투자 비용 분석

표2에 따르면 비용 분석에서 단일용량 시 LCC-HVDC는 891.8M€, VSC-HVDC는 980.2M€의 비용을, 500MW 2대의 병렬 운전 시에는 LCC-HVDC가 1035.6M€, VSC-HVDC는 1040.4M€의 비용 계산이 도출

되었다. 하지만 비용의 ±30%의 오차한계범위를 고려하였을 시 두 시스템의 비용 소요액은 비슷할 것으로 예상할 수 있으며, 비용 계산에서 제외된 기술 및 질적인 추가 이익 부분도 고려한다면 두 시스템간의 비용차를 줄일 수 있을 것이다.

〈표 2〉 모의 사례 적용에 따른 전류형HVDC와 전압형HVDC 비교

	LCC-HVDC-500 kV		VSC-HVDC	
	1x1000MW Symm. Monopole (단일용량) 단위: M€ (유로화)	2x500MW Bipole (2대병렬)	1x1000MW ±320 kV (단일용량)	2x500MW ±320 kV (2대병렬)
변환소 비용	180 M€	220 M€	220 M€	220 M€
케이블 비용	160 M€	170 M€	180 M€	155 M€
토목 및 케이블 설치비용	438M€	510M€	430 M€	520 M€
총 설치비용	778 M€	900 M€	830 M€	895 M€
손실비용	67.8M€	89.6M€	150.2M€	145.4M€
무효전력 보상비용	46 M€	46 M€	-	-
총비용	891.8 M€	1035.6 M€	980.2 M€	1040.4 M€

자료 : CIGRE Technical Brochures 492, April 2012, p.92

3.3.4 LCC-HVDC와 VSC-HVDC의 편익 분석

3.3.3에서 VSC-HVDC는 LCC-HVDC에 비해 더 많은 비용을 소요하였으나 비용 외 기능적, 경제적, 기술적 등의 측면에서 편익을 분석한다면 더 구체적인 경제성을 고려할 수 있다. VSC-HVDC는 전류형에 비하여 계통전압 유지 및 사고 후 재가동, 독립전원 공급 등의 제어 기능이 가능하다. CIGRE492 보고서에서 언급된 전압형 HVDC의 추가적 이익에 따른 가치환산가에 의하면 전압제어기능의 경우 3.07M€, Black-start 및 독립전원 공급 기능의 경우 0.87M€ 만큼의 경제적 편익을 고려할 수 있다. 컨버터 스테이션 부지 비용이 적용된 전압형의 부지 비용은 전류형 부지의 60~70%이므로 추가적인 비용 절감을 고려할 수 있으며, 도심과 같이 부지비용이 비싼 곳에 입지할수록 VSC-HVDC가 가지는 편익은 더욱 올라갈 것이라 예상된다.

3.3.5 경제성 평가를 통한 결론

3.3.1은 동일한 조건을 적용할 때 HVAC와 HVDC간의 현금흐름 누적치의 손익분기점을 비교하는 분석으로서, HVAC는 약 27년 후, HVDC는 약 9년 후에 경제적 이익을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 3.3.2부터 HVDC 시스템 간(LCC-HVDC와 VSC-HVDC)의 경제성 분석을 진행하였으며, 결과적으로는 전류형 HVDC가 비용분석에서 단일용량(88.4M€)과 500MW급 2대 병렬운전(4.8M€) 모두 긍정적이었으나, 오차한계범위의 비용차와 전압형 HVDC의 추가적 이익에 따른 가치환산가 및 컨버터 스테이션 부지 비용 등을 고려한다면 VSC-HVDC의 경제적 효율의 긍정성을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 VSC-HVDC와 기존 송전시스템(HVAC, LCC-HVDC) 간 비교 및 CIGRE 492 보고서에 따른 모의 조건 적용에 의한 경제성 평가를 통하여 VSC-HVDC가 가지는 이점에 대해 분석하였다. VSC-HVDC는 HVAC에 비하여 시간 흐름에 따른 누적비용 NPV에서 DC가 AC보다 약 20년 정도 앞설음을 확인할 수 있었다. 또한, PWM 방식의 LCC-HVDC와 VSC-HVDC의 비용 차는 오차한계범위에 있었으며, 추가적인 이익 부분을 고려할 시 경제성 분석에서 긍정적 결과를 도출할 수 있었다. 즉, 질적인 측면인 전압형 HVDC 도입 시 지중화에 의해 밀양상태와 같은 초고압송전탑의 설치에 따른 갈등의 해소와 지역 간 대규모 전력 거래의 가능성으로 전력 수급을 안정화 시킬 수 있으며, Super-Grid의 국내 및 다른 나라와의 계통 연계를 통해 더 큰 편익을 추구할 수 있다. 이러한 기타 편익까지 고려할 시 분명 VSC-HVDC 방식은 전류형에 비해 경제적 이점을 가지게 될 것이라 예상된다. 또한 본 연구는 VSC-HVDC 중 일반적으로 도입되고 있는 PWM방식으로 경제성 평가를 진행하였으나 최근 선도 기업을 중심으로 MMC방식의 새로운 전압형 HVDC 시스템이 떠오르고 있는 바, MMC-VSC-HVDC시스템과 LCC-HVDC 간의 경제성 재평가가 요구된다. CIGRE492에서 언급하듯이 PWM-VSC 방식보다 MMC-VSC 방식의 손실은 50% 낮아질 수 있다. 즉, MMC 기반의 전압형 HVDC를 적용한 기존 시스템간의 경제성 평가를 통하여 전압형 HVDC의 경제적 효율성의 우위를 확인할 해 볼 가치가 있음을 시사하였다. 따라서 추후 연구에서는 MMC-VSC-HVDC의 경제적 효율성의 영향에 대해서 확장 연구해 볼 필요가 있다.

이 논문은 산업통상자원부 산업엔진 프로젝트_멀티터미널 직류 송배전시스템 추진단 지원에 의하여 연구되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Working Group B4.46, "Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission - Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies", Cigre, 492, All Pages, April 2012
- [2] 산업통상자원부 산업통상지원R&D전략기획단, "MMC기반 전압형 직류 송전 시스템 개발", 2014.12