https://doi.org/10.21289/KSIC.2020.23.1.65

MMC VSC-HVDC의 경제성평가에 관한 연구

A Study on the Benefit Estimation of MMC VSC-HVDC System

선휘일[1], 박성미[2], 유동욱[3], 박성준[4*]

Hwi-il Sun[1], Seong-Mi Park[2], Dong-Wook Yoo[3], Sung-Jun Park[4*]

〈Abstract〉

Recently, interest in the DC transmission is rapidly increasing worldwide. In many countries and leading companies are prior to the aggressive development of HVDC technology and application. Especially, VSC-HVDC system has been widely applied to transfer power at long distance between power plant and power consumption area. Therefore in this paper, we analyzed the benefit-cost of VSC-HVDC system which has more advantages than existing transmission system. The proposed system is MMC(Modular Multilevel Converter) VSC-HVDC system that have stability of Power Grid, interconnect Large-scale New Power Generation Plants by prevents Blackout. And MMC VSC-HVDC system Reduced the loss importing foreign systems. And the benefits were calculated in four stages, and the costs were applied to the actual project. By evaluating the various avoidance costs compared to the benefit-cost , it was confirmed that MMC VSC-HVDC system was advantageous in system stability and economic and social benefits.

Keywords : MMC VSC-HVDC, Benefit Analysis, Scenario Analysis, BCR(Benefit Cost Ratio)

1 주저자, 전남대학교 전기공학과
E-mail: wheels@keri.re.kr
2 부저자, 한국승강기대학교 승강기공학부 부교수
E-mail: seongmi@klc.ac.kr
3 부저자, 한국전기연구원 멀티터미널 직류송배전추진단 단장 E-mail: dwyoo@keri.re.kr
4* 교신저자, 전남대학교 전기공학과 정교수
E-mail: sjpark1@jnu.ac.kr

1 Main Author, M.S. Course, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University
2 Author, Dept. of Lift Engineering, Korea Lift College, Associate Professor.
3 Author, Dept. of Multi-Terminal T&D System Initiative, Korea Electrotechnology Research Institute, Director.
4* Corresponding Author, Dept. Electrical Engineering, Chonnam National University, Professor.

1. 서 론

우리나라의 전기는 최초 1800년대부터 시작한 이래 지금까지 눈부신 성장을 하였으며, 지금은 없어서는 안 될 에너지로 대규모 전력공급을 필요로 하는 곳이 많게 되었다.

우리나라의 전력 수요의 40%이상은 밀집주거단지가 많은 수도권에 위치해 있으나, 대부분의 발전 단지는 수요지와는 지역적위치가 멀리 분리되어 있으며 특히 수도권내의 부하 밀집으로 정전 등의 불편을 야기하고 있다[1]-[4]. 이러한 상황으로 추가적인 송전망 확충은 필수적이나 지역주민의 저항 및 신규발전 입지의 제약 등으로 어려움을 겪고 있다. 문제를 해결하고자 MMC VSC-HVDC의 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, 북미, 유럽, 및 중국이 대표적이다[1]-[2]-[4]. 고전압직류(HVDC), 특히 VSC (Voltage Source Converter) HVDC는 제어 가능성과 유연성 분야에서 뚜렷한 장점이 있다. 기존 AC 그리드에 VSC-HVDC를 적용하면 얻을 수 있는 이점으로는 유효 및 무효 전력에 대한 독립적인 제어, 매우 빠른 제어 응답, 블랙스타트(Black-start) 기능 및 멀티터미널(multi-terminal)시스템 구축이 가능한 이점이 있는 시스템이다[2].

Modular Multilevel Converter (MMC)는 계단식 연결 논리를 사용하는 새로운 VSC 토폴로지로서 출력 전압의 사인 파형이 양호하고 스위칭 손실이 작은 장점이 있다. 이러한 이유로 제조업체들은 MMC를 기반으로 차세대 VSC를 개발하였고 미국의 실제 프로젝트(Trans Bay Cable, Siemens, 2010)에 첫 번째 상용화되어 현재는 MMC VSC-HVDC 방식이 널리 적용되고 있다[2]. 국내에서는 산업부 국책사업을 통한 MMC VSC-HVDC개발을 통해 전력손실 저감, 계통안정화, 송전선로 건설비용 저감을 위한 연구가 수행 중에 있다[4].

본 논문에서는 국내 실계통 적용을 위한 MMC VSC-HVDC 시스템 국내 기술 개발 및 설치의 다양한 각도의 편익산정 시나리오를 통해 소비자 관점의 편익과 공급자 관점의 편익을 산정 하였으며, 소비자 편익은 공익적, 사회적 편익으로 산정하였다. 전력시스템의 안정성 확보로 정전피해회피비용, 신규발전단지 인출선로 확보를 통한 송전망 건설지연에 따른 소비자지불비용 절감의 부(-)의 가치 감소와 향후 성장할 시장규모의 예측과 국내 송전망 확충사업 참여를 통한 부가가치편익을 산정함으로써 정(+) 편익을 산정함으로써 국내 MMC VSC-HVDC 설치의 긍정적 효과를 정량적 결과의 제시를 통해 입증하였다.

2. 분석방법

2.1 편익산정 방법

연구개발사업의 경제성 분석방법에는 크게 비용편익분석(Benefit-Cost Rate : BCR)과

비용효과분석(Cost-Effectivess Analysis : CEA)으로 구분한다[6]. 비용편익분석은 투자결정모델을 공공부문에 적용할 때 특정 프로그램이 가져올 영향과 효과를 평가하기 위한 분석틀이며 비용은 초기에 한꺼번에 발생하는데 반해 편익은 여러 해에 걸쳐 나타는 특성을 고려하여 편익의 흐름들을 현재가치로 합산하여 비용과 비교가능하도록 해주는 평가방식이다[2]. 그러나 이 경제적 편익의 측정이 거의 불가능해 평가가 어려운 경우 비용효과분석을 사용하며 이는 주어진 효과를 달성하는데 가장 적은 비용이 들어가는 대안을 선택하는 방법으로서 비용 하에 최대한의 효과를 달성하는 것이다[1]-[7].

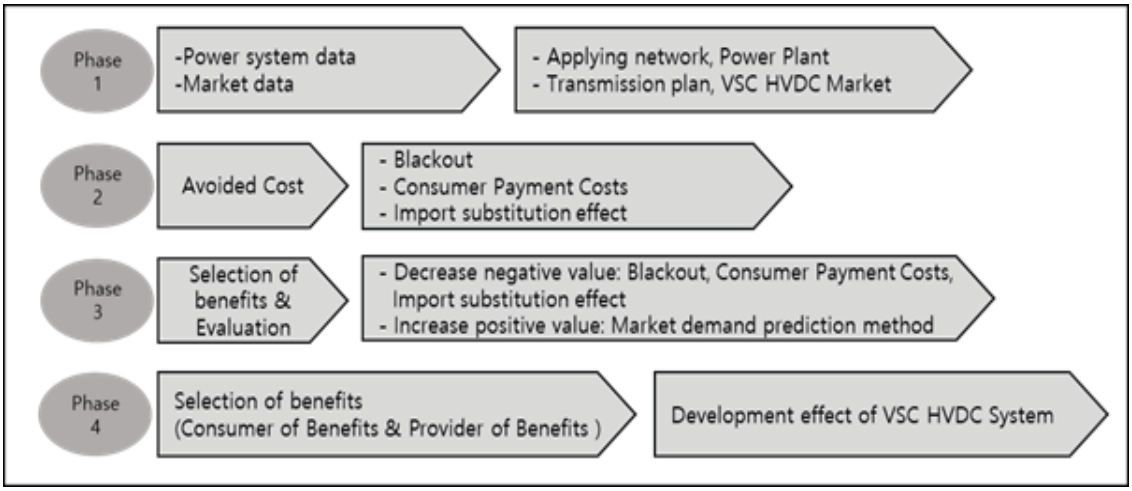

Fig. 1 Flowchart of benefit assessment MMC VSC-HVDC system [3]

본 논문에서는 두 가지 방법 중 비용편익분석법을 적용하여 최대한의 경제적 효과를 측정하고자 하며, 일반적으로는 미래 시장점유와 성장을 측정하는 시장접근법의 부가가치편익만을 반영하나 MMC VSC-HVDC 시스템 적용은 최종 소비자적 접근보다는 전력시스템 안정성 확보로 공익적, 사회적 편익으로 산출하도록 하였다.

편익항목은 소비자 및 국가 전체에 발생하는 편익, 즉 부(-)의 가치감소와 생산자에게 발생하는 편익으로 정(+)의 가치증가인 2가지로 분류하여 산정하였다.

본 연구에서의 편익 산정의 단계는 총 4단계로 시스템 비용산정, 회피비용산출, 편익선정 및 평가, 최종 편익선정의 과정으로 그림 1과 같다.

2.2 MMC VSC-HVDC 투입비용

국가과제 MMC VSC-HVDC 사업은 2015년부터 총 4년에 걸쳐서 1,860억원(명목비용)이 투입될 예정이며, 2013년 현재가치 기준 비용은 1,548억원이다. 비용 및 연차별 현재가치비용은 표 1, 2 와 같다[8]-[10].

Table 1. Cost of MMC VSC-HVDC system

Investment	Total	Annual Investment(M$)			
		2015	2016	2017	2018
Gov.	71.2	14.0	21.9	25.6	9.6
Private	107	16	37	43	11
Total	178	30	59	69	21

Table 2. Present value of MMC VSC-HVDC system

Investment	Total (PV)	Annual Investment(M$)			
		2015	2016	2017	2018
Gov.	59.3	12.6	18.7	20.6	7.4
Private	88.8	14.2	31.2	35.0	8.5
Total	148.12	26.81	49.84	55.62	15.86

3. 편익산정

3.1 회피비용산정

MMC VSC-HVDC기술 확보로 사용되는 편익지표는 수도권 전력망 운용의 기술적 한계를 완화함

으로써 얻을 수 있는 회피효과를 중심으로 산정하였다.

정전피해를 회피할 수 있는 회피비용, 기존 발전단지 인출선로 확보로 안정성 강화를 통한 순환정전회피비용, 신규발전단지 인출선로 건설지연회피를 통한 소비자 지불비용절감효과, 단기 송전망 확충에 국내 기술의 적용을 통한 설비비 수입대체 효과 즉, 편익의 부(-)의 가치 감소를 고려하여 편익을 산정하였다[9]. 회피비용 항목은 MMC VSC-HVDC 시스템의 개발 및 설치의 경우 발생하는 순환정전회피비용, 한계-기저발전 비용의 차이에 의한 발전비용 차이, 국산 기술개발을 통한 수입대체 효과의 부(-) 가치 감소 비용으로 산정하였으며, 항목은 표 3과 같다.

Table 3. Present value of MMC VSC-HVDC system

항목		영향	평가기법
부(-)의 가치 감소	수도권환산망 안정성 확보	수도권 환산망 보완대안으로 정전피해비용회피	순환정전 회피비용
	기존 발전단지 인출선로 확보	대규모 단지 인출선로 확보로 안정성 확보	순환정전 회피비용
	신규 발전단지 인출선로 확보	송전망 건설지연에 따른 소비자비용 절감	발전비용 차이 (한계-기저)
	수입대체	국내기술 적용으로 해외기술도입 회피 편익	시장수요 x 수입단가

순환정전 회피비용 산정은 우리나라의 수도권 환산망 전력 계통은 수도권 내 발전 설비의 부족으로 대규모 북상전력에 의존하며 북상선로의 고장 시 전압 불안정에 의한 광역정전이 발생하고 이는 국내 전력수요의 40% 이상이다[5]. 이에 수도권 환산망 계통 안정화 편익과 기존발전단지 인출선로 확보에 따른 안정화 편익 추산은 전력 한 단위의 가치 즉 정전수준으로 산정하였다. 계통안정화를 통한 순환정전 회피비용은 두 가지 가정모델로 진행하였다.

1. 전력 한 단위 공급지장에 따른 GDP 감소분
2. 수도권전력 1%정전에 따른 피해비용 산정분

가정 1의 감소분 산정은 GDP 연간 산정율 8.8% (1992~2013), 동기간 전력소비량 연간 7.1% (115.24TWh와 474.85TWh의 차), 전력 한단위 가치 34.6%(1992년 2,234원/kWh에서 2013년 3,007.89원/kWh로 증가)를 이용하여, 2013년 기준 1kWh 공급지장비용은 약 3,008원에 해당한다.

가정 2의 피해비용은 2011년 9월 최초 순환정전 경험에 의해 전력수요대비 전력공급력 부족으로 5시간의 순환정전 있었으며 수도권 전력수요는 시간당 200만kW임을 감안하여 정전시간과 1kWh 공급지장비용의 곱으로 산출하였다. 순환정전회피비용 산출식은 식 (1)과 같다.

$$C_b = 200만kW \times 5H \times 3,008원/kWh \quad (1)$$

발전비용 절감액은 신규발전소의 인출선로 미확보로 인한 소비자가 추가로 지불해야 할 비용 산정을 위해 발전비용차액 부담을 가정하여 산정하였다. 신규발전소의 인출선로를 확보하지 못하면 기저발전 대신 한계발전기인 LNG 복합발전을 대체로 사용하게 되며, LNG 복합 발전의 공급비용과 기저발전기 공급비용의 차는 소비자가 지불해야 한다. 에너지원별 정산단가와 계통한계가격을 결정한 한계발전기의 비중을 보면, 과거 3년(2011~2013)간 평균적으로 정산단가(원/kW)는 원자력 39.22원, 석탄 68.23원, LNG 157.07원으로 원자력간의 정산단가 차이는 117.8원이며, LNG 와 석탄발전가의 정산단가 차이는 88.84원이다. 기저발전기와 한계발전기의 정산단가 차이는 70~110원/kWh, LNG복합발전 SMP 결정회수는 75%로 설정하였다. 또한 인출선로 미확보 피해비용의 설비용량은실제원전설비의 용량을 적용하여, (1)1,000

MW, (2)1,400MW, 설비이용률은 75~95%로 설정하였으며, 건설지연기간은 1개월로 가정하였다.

가정 1. 용량 1,000MW, 설비이용률 95%,
정산단가차이 100원/kWh
가정 2. 용량 1,400MW, 설비이용률 85%,
정산단가차이 80원/kWh

수입대체효과는 원천기술 확보를 통해 관련 시장 즉, 국내 송전망 확충계획에 따른 부가가치 창출로 산정하였으며, 관련 국내시장 누적규모는 2020~2029년까지 약 17.8GW, 약 11조 1900억원 수준이다[3]. 이를 HVDC연구개발 사업의 산출물에 적용할 경우 시장점유율별 시장규모의 추세를 분석할 수 있다. 부가가치창출 편익의 산정 시 목표시장점유, 편익계상기간, 시장규모에 따라 가정하였으며 부가가치 창출 지표로는 부가가치율 31.2%(산업연관표 산업별 부가가치율), R&D기여도 28.1% (연구개발투자의 경제성장 기여도), 사업화성공률 40.8%, 사업기여율 59%를 적용하였다[5]-[6]. 부가가치산출 편익 추정을 위한 분석 모형은 식 (2)와 같다.

$$V = \sum_{n=1}^{n} M_{hvdc} \times S \times C_r \times S_r \times A_r \times PVF \quad (2)$$

M_{hvdc}: 국내시장규모 S: 시장점유율 C_r : RD기여율 n : 편익기간
S_r : 사업화성공률 A_r : 부가가치율 P

3.2 부가가치 창출편익

부가가치 창출 편익의 대상은 관련 시장의 글로벌 시장점유를 목표로 목표시장 점유율, 편익계상기간, 시장규모에 따른 각각의 시나리오를 가정하였으며 MMC VSC- HVDC의 컨버터 중심으로 대상 시장을 분석하고 수요 예측법에 따라 부가가치의 세계시장 점유의 목표, 실증사업을 포함한 사업임을 고려하여 편익회임기간이 없는 편익계상기간, 연평균 성장률(CAGR)에 따른 각각의 시나리오를 설정하였다[5]-[7].

가정 1. 시장점유 50% 단일목표 (A1)
단계별점유 10~20% (A2)
단계별 점유 5~15% (A3)
가정 2. 편익계상기간은 4년 사업종료 직전
2019년~2028년 산정 (B1)
사업종료 직후 2020년~2029년 (B2)
가정 3. 사업종료 5년후 2024년~2029년
CAGR의 변화에 따른 (C1)~(C8)

모든 편익 분석은 직전년도인 2013년도 말 기준, 할인율 5.5%, 환율 1,045.00원 / $ (2013. 12. 31.일 매매기준율), 편익 발생시점 선정은 기술수명주기를 감안하며, 2019이후, 2020년 이후 각기 10년으로 기본 가정하였다. 가정에 따른 48개의 시나리오의 부가가치 산출식은 식 (3)과 같으며, 시나리오 구성은 표 4와 같다.

Table 4. Scenario of market forecasting

구분	정의	시나리오 구성
시장점유목표	Share (A1)50%	A1-B1-C1 A2-B1-C1 A3-B1-C1 A1-B1-C2 A2-B1-C2 A3-B1-C2
	Share(A2) 10~20%	A1-B1-C3 A2-B1-C3 A3-B1-C3 A1-B1-C4 A2-B1-C4 A3-B1-C4
	Share(A3) 5~15%	**A1-B1-C5** A2-B1-C5 A3-B1-C5 A1-B1-C6 A2-B1-C6 A3-B1-C6 A1-B1-C7 A2-B1-C7 A3-B1-C7
편익계상기간	2019-2028 (B1)	A1-B1-C8 A2-B1-C8 A3-B1-C8 A1-B2-C1 A2-B2-C1 A3-B2-C1
	2020-2029 (B2)	A1-B2-C2 A2-B2-C2 A3-B2-C2 A1-B2-C3 A2-B2-C3 A3-B2-C3 A1-B2-C4 A2-B2-C4 A3-B2-C4
시장규모	(C1-C8) (C5) CAGR 0%	**A1-B2-C5** A2-B2-C5 A3-B2-C5 A1-B2-C6 A2-B2-C6 A3-B2-C6 A1-B2-C7 A2-B2-C7 A3-B2-C7 A1-B2-C8 A2-B2-C8 A3-B2-C8

$$V=\sum_{n=1}^{n} M_{hvdc}\times S\times C_r\times S_r\times A_r\times PVF\times E_r \quad (3)$$

M_{hvdc}: 국내시장규모 S: 시장점유율 C_r : 기여율 n : 편익기간
S_r : 사업화성공률 A_r : 부가가치율 PVF: 현가계수, E_r : 환율

3.3 전체 편익 산정

수도권 환상망 안정성을 통한 순환정전 회피비용 산정은 수도권이 국내 전력수요의 40%이상을 차지하므로 2013년 총 전력판매량 474.85TWh대비 약 190TWh(1GW급 원전 25기 85%이용률, 1년 생산량)를 적용하여, 1kWh 당 3,008원을 곱해 5.7조원을 산정하였다. 인출선로 확보를 통한 순환정전 회피비용은 수도권 순환정전 피해액은 300억원이며, 원전 1기가(100Kw) 5시간동안 전출력으로 전력 공급을 못할 시 편익은 150억원이 된다.

Table 5. Benefit of MMC VSC-HVDC system

번호		항목	편익	
1	부(-) 가치 감소	순환정전 회피 비용(수도권 환산망 안정성)	5.7조원	
2		순환정전 회피비용 (기존발전단지 인출선로확보	150.39억원	
3		발전비용차이 (신규발전단지 인출선로 확보)	1,000MW	1,400MW
			2,203억원	3,084억원
4		수입대체 효과	1,341억원	
5	정(+) 가치 증가	부가가치창출	20.5조원	

인출선로 미확보 피해비용의 설비용량은 실제 발전원의 용량을 적용하여 (1)1,000MW, (2)1,400 MW, 설비이용률은 75~95%로 설정하였으며, 건설지연기간은 1개월로 가정하여 용량 (1), (2) 의 인출선로 미확보로 인한 6개월 지연 피해비용은 2,203억원, 3,084억원으로 계산하였다. 송전선로 확충계획에 따른 시장수요예측법을 적용하여 부가가치 창출 가치를 분석기간인 2020년부터 2029년(10년)평가는 시장 점유율의 변동에 따라 명목가치 236~2,359억원, 현재가치 131~1,341억원의 수입대체를 산정하였다. 세계시장 점유를 통한 부가가치 창출은 A1-B2-C5 시나리오에 따라 20.5조원의 부가가치 편익을 산정하였으며, 시장접근법에 의한 부가가치 창출 뿐 아니라 회피비용을 고려한 편익이 많이 발생하였다.

3.4 비용-편익분석

편익의 항목 중 수입대체 효과는 국내 송전망 확충계획에 따른 시장 점유를 기준으로 산정한 편익으로 국가 사업의 경우 국내시장 점유를 중심으로 비용 편익을 산정하며 국내 시장 점유에 따른 BCR(Benefit-Cost Ratio)을 산출하였다.

Table 6. BCR of MMC VSC-HVDC system
(present value)

국내시장 점유율	편익 (억원)	비용 (억원)	BCR
10%	131	1,548	0.08
20%	263	1,548	0.17
30%	394	1,548	0.25
40%	526	1,548	0.34
50%	657	1,548	0.42
60%	789	1,548	0.51
70%	920	1,548	0.59
80%	1,051	1,548	0.68
90%	1,183	1,548	0.76
100%	1,314	1,548	0.85

피해저감 비용방식의 다양한 편익 접근법에 따라 표 5의 (1),(2),(3),(4)편익을 산출하였으며, 이러한 편익들은 실제 시장수요접근법에 따라 (5)의 부가가치편익만을 적용했을 때보다 MMC VSC- HVDC

적용의 경제적 효과를 높일 수 있다. 회피비용 반영 전 총 시장점유율에 따른 부가가치창출 편익 20.5조원보다 회피비용 및 수입대체효과 반영 후 총 편익은 6.2조가 더 증가했음을 알 수 있다.

4. 결 론

비용 편익 분석에는 상황과 조건을 고려한 다양한 편익을 산정할 수 있으며 본 논문에서제안한 경제성평가 알고리즘을 기반으로 MMC VSC-HVDC의 시스템의 국산화 개발과 국내 계통에 투입시 효과를 분석하였다. MMC VSC-HVDC 시스템의 국내 계통 적용 시 고려할 수 있는 계통안정화 편익, 발전비용 소비자 비용 저감편익, 수입대체효과, 다양한 부가가치 창출 편익을 제시함과 동시에 BCR을 산출하였다. 비용편익 대비 다양한 부(-)의 가치 감소효과의 편익을 산출함으로써 MMC VSC-HVDC국산화 개발과 설치가 국내 계통안정화 및 경제적, 사회적 편익에서의 유리함을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20179310100600)

참고문헌

[1] Wang Feng, Le Anh Tuan, Lina Bertling Tjernberg, Anders Mannikoff, Anders Bergman, “Cost-Benefit Analysis of a Multi-Terminal VSC-HVDC System Using a Proposed Mixed AC/DC Optimal Power Flow”, IEEE, 2013.
[2] Wang Feng, Lina Bertling, Tuan Le, “An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems ”,CIGRE, 2011.
[3] Working Group B4.46, “Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies”, CIGRE, 2012.
[4] “제 7차 전력수급기본계획”, 한국전력, 2017.
[5] 김동우 외4, “전압형 Back-to-Back HVDC를 이용한 수도권 전력 계통의 혼잡 비용 절감 방안 연구”, 대한전기학회, 2010.
[6] “HVDC Tranmission Market” Visiongain, 2014-2024.
[7] “연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침”, KISTEP, 2016.
[8] 산업통상자원 R&D전략기획단, “MMC 기반 전압형 직류 송전 시스템 개발”, 산업통상자원부, 2014.
[9] 김희진, 허건, 윤민한, 장길수, “전압형 컨버터 HVDC 기술 동향과 사례 분석”, 대한전기학회-전기의세계,p.34-40, 2012.
[10] HVDC 2015, 2015 International High Voltage Direct Current Conference 발표 자료, 2015.

(접수: 2019.12.09. 수정: 2020.01.31. 게재확정: 2020.02.03.)