http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2015.20.6.550

전압형 MMC-HVDC에 의한 제주계통의 풍력한계용량 증대 방안

이승민[1], 김일환†, 김호민[1], 채상헌[2], 왓나우딩[3]

A Strategy of Increasing the Wind Power Penetration Limit with VSC Type MMC-HVDC in Jeju Power System

Seungmin Lee[1], Eel-Hwan Kim†, Ho-Min Kim[1], Sang-Heon Chae[2], and Ngoc-Thinh Quach[3]

Abstract

The Jeju Special Self-Governing Province is currently promoting the "Carbon-free Island by 2030" policy, which requires the use of renewable energy instead of fossil fuel so that the island will have no carbon gases generated by 2030. To implement this policy, the island plans to build a wind power plant capacity of 1.09 GW in 2020; this wind power plant is currently ongoing. However, when wind power output is greater than the power demand of the island, the stability of Jeju Island power system must be prepared for it because it can be a problem. Therefore, this study proposes a voltage source-type MMC-HVDC system linked to mainland Korea to expand the wind power penetration limits of Jeju Island under the stable operation of the Jeju Island power system. To verify the effectiveness of the proposed scheme, computer simulations using the PSCAD/EMTDC program are conducted, and the results are demonstrated. The scenarios of the computer simulation consist of two cases. First, the MMC-HVDC system is operated under variable wind power in the Jeju Island power system. Second, it is operated under the predicted Jeju Island power system in 2020.

Key words: MMC-HVDC(Modular multilevel converter-high voltage direct current), Wind power penetration limit, PSCAD/EMTDC, Jeju Island

1. 서 론

제주도는 우리나라에서 평균 풍속이 높아 풍력발전을 하기에 최적조건을 가지고 있는 지역이다. 최근 제주지역에는 제주에너지공사를 비롯한 관련 풍력발전사업자들이 풍력에 대한 투자를 확대하고 있고 또한 풍력발전설비의 규모를 대형화, 단지화하고 있다.

이러한 추세에 따라 제주도에서는 2020년까지 총 1.09GW의 풍력발전단지 조성을 목표로 하는 『Carbon Free Island Jeju by 2030』 계획을 통해 풍력발전 설비의 도입을 지속적으로 추진하고 있다. 하지만 기존 발전설비와 더불어 2018년 준공되는 200MW LNG발전소와 증가되는 풍력발전설비는 제약된 제주도 전력부하에서 제주계통에 잉여전력을 발생시킬 가능성이 있다. 제주도에 따르면 2015년 8월 기준 풍력발전설비용량은 220.56MW(가파도 풍력발전기 제외)이고 접속한계용량은 143.79MW로, 이는 계통의 안정성을 저해하거나 풍력단지의 출력제한을 야기시켜 풍력발전설비의 효율을 감소시킬 가능성이 클 것으로 예견되고 있다. 이에 따라 제주계통의 풍력발전설비 용량 증가에 따른 안정적인 계통 운용을 위한 계통설비 확충이 불가피하다.

이를 해결하기 위해 에너지저장장치나 출력제한설비들을 설치하는 방안들에 대해 검토되고 있으나 중앙정부는 제주 육지간 실시간 양방향 전력전송을 가능하게 하는 HVDC #3을 신설하여 운영하는 것이 가장 현실적인 방안이 될 수 있을 것으로 여겨 제 7 차 전력수급계획에 2025년 준공하여 운용하는 계획을 발표하였다.

Paper number: TKPE-2015-20-6-8
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: ehkim@jejunu.ac.kr, Department of Electrical Engineering, Jeju National University
Tel: +82-64-754-3678 Fax: +82-64-756-5281
[1] Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University
[2] Faculty of Applied Energy System, Jeju National Univ.
[3] Dept. of Electrical Engineering, Can Tho Univ., Vietnam
Manuscript received Sep. 25, 2015; revised Oct. 23, 2015; accepted Oct. 26, 2015
– 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 우수추천논문임

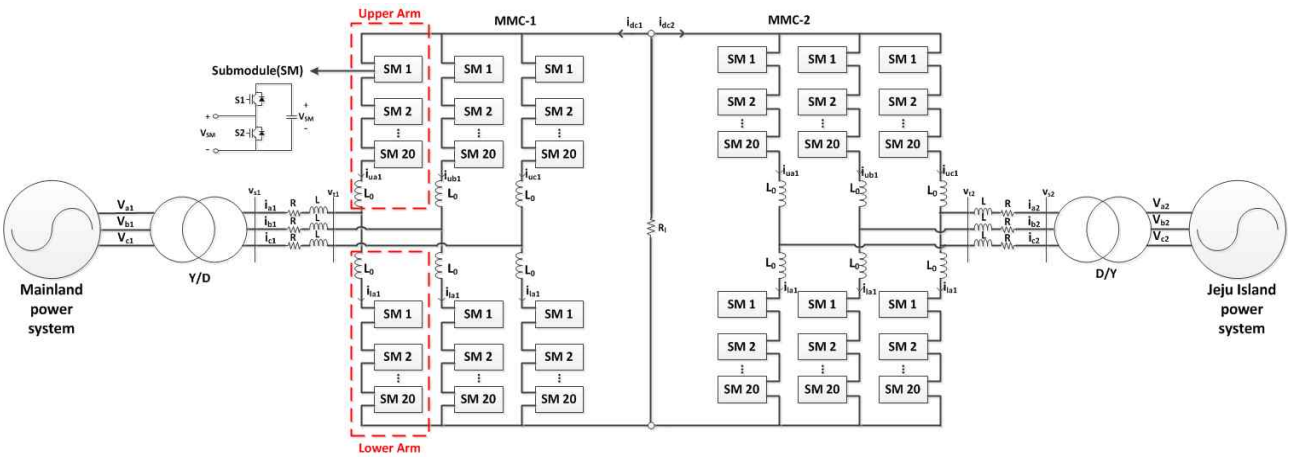

Fig. 1. Schematic diagram of the MMC-HVDC system.

따라서 본 논문에서는 HVDC #3으로 기존 제주계통의 설비인 전류형 HVDC #1, 2와 달리 육지계통과 실시간 양방향 전력송전이 가능하고, 유·무효전력의 독립적인 제어가 가능하며 Black Start 기능 등 동작특성이 우수한 전압형 MMC-HVDC 시스템을 채택하여, 제주계통이 안정적으로 운용될 수 있도록 풍력한계용량 증대 방안을 제안하고자 한다[1],[2].

2. MMC-HVDC 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 모델 시스템으로 채용된, 제주 전력계통과 육지 주계통을 연결하는 21 Level MMC-HVDC의 기본 구성이다. MMC-k (k=1, 2)의 각 상은 Upper arm과 Lower arm으로 구성되고, 각각의 arm은 (Level-1)개인 20개의 Submodule(SM)과 사고전류를 제한하는 역할의 리액터가 직렬로 연결된 형태이다. SM은 하프-브릿지 형태로 2개의 IGBT와 역병렬 다이오드, 캐패시터로 구성된다.

3. MMC-HVDC 제어이론

3.1 MMC-HVDC 전류제어기

위 그림 1의 AC측 전압을 전압방정식으로 나타내면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$v_{sjk} = i_{jk}R + L\frac{di_{jk}}{dt} + v_{tjk} \tag{1}$$

여기서, j는 a, b, c 3상을 나타내며 k는 MMC-k의 1, 2를 의미한다. 식 (1)을 동기좌표계로 변환하면 식 (2), (3)과 같이 나타내어진다.

$$v_{sdk} = i_{dk}R + L\frac{di_{dk}}{dt} + v_{tdk} - \omega L i_{qk} \tag{2}$$

$$v_{sqk} = i_{qk}R + L\frac{di_{qk}}{dt} + v_{tqk} + \omega L i_{dk} \tag{3}$$

v_{sdk}, v_{sqk}, v_{tdk}, v_{tqk}, i_{dk}, i_{qk}는 MMC-k측 AC전압, 전류의 dq변환 값을 나타내며, w는 AC 전압의 각주파수를 나타낸다. 식 (2), (3)을 통해 MMC 전류모델은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{di_{dk}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{dk} + \frac{1}{L}v_{sdk} - \frac{1}{L}v_{tdk} + \omega i_{qk} \tag{4}$$

$$\frac{di_{qk}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{qk} + \frac{1}{L}v_{sqk} - \frac{1}{L}v_{tqk} - \omega i_{dk} \tag{5}$$

MMC-HVDC의 DC링크단의 전압이 일정하다고 가정하면, MMC의 출력 전류인 i_{dk}, i_{qk}는 v_{tdk}, v_{tqk}의 조정으로 제어가 가능해진다[3],[4].

3.2 DC링크 전압 제어

AC측 리액터의 손실이 없다면, DC링크 전압은 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$C_e\frac{dV_{dc}}{dt}V_{dc} = -(P_1 + P_2) \tag{6}$$

C_e는 MMC의 등가 캐패시턴스를 나타내며, P_1과 P_2는 각각의 MMC의 출력 유효전력을 나타낸다.

$$P_1 = \frac{3}{2}(v_{sd1}i_{d1} + v_{sq1}i_{q1}) \tag{7}$$

$$P_2 = \frac{3}{2}(v_{sd2}i_{d2} + v_{sq2}i_{q2}) \tag{8}$$

이때, 동기좌표계에서 $v_{sdk}=0$이고, v_{sqk}는 일정값을 갖게되기 때문에 식 (7), (8)을 식 (6)에 대입하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(\frac{1}{2}C_e V_{dc}^2)}{dt}=-\frac{3}{2}v_{sq}(i_{q1}+i_{q2}) \tag{9}$$

여기서, q축 전류 기준값은 다음과 같이 정의된다[5].

$$i_{q1}^*=-i_q^*+i_{Vdc}^* \tag{10}$$

$$i_{q2}^*=-i_q^*+i_{Vdc}^* \tag{11}$$

식 (10), (11)을 식 (9)에 대입하면 아래와 같이 식 (12)로 표현된다.

$$\frac{dV_{dc}^2}{dt}=-\frac{6v_{sq}}{C_e}i_{v_{dc}} \tag{12}$$

이를 통해 MMC-HVDC의 DC링크전압 제어가 가능해 진다.

3.3 유·무효전력 제어

유효전력과 무효전력제어의 경우, 아래의 식(13), (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_k=\frac{3}{2}(v_{tdk}i_{dk}+v_{tqk}i_{qk})=\frac{3}{2}v_{tdk}i_{qk} \tag{13}$$

$$Q_k=\frac{3}{2}(v_{tdk}i_{qk}-v_{tqk}i_{dk})=-\frac{3}{2}v_{tqk}i_{dk} \tag{14}$$

위 식 (13), (14)를 기반하여 도출된 식(15), (16)을 통해 i_{dkref}, i_{qkref}가 결정된다. 이를 이용하여 유효전력과 무효전력의 제어가 가능하다.

$$i_{qkref}=\frac{P}{3/2v_{tqk}} \tag{15}$$

$$i_{dkref}=\frac{Q}{3/2v_{tqk}} \tag{16}$$

위 언급된 제어이론을 통해 구성된 MMC-HVDC의 제어도는 그림 2와 같다. d축 제어기에서는 무효전력제어가 수행되며, q축 제어기에서는 유효전력 및 DC링크 전압제어의 수행이 가능하다.

본 논문에 채용된 MMC-1의 Outer controller에서는 유효전력, 무효전력이 제어되며, MMC-2의 Outer controller에서는 DC링크전압과 무효전력제어가 수행된다. 각 MMC-k의 Inner controller에서는 전류제어를 수행한다. 즉, Inner controller의 출력값인 전압 지령치는 PWM방법을 통하여 MMC-k의 Gating signal로 생성된다[6].

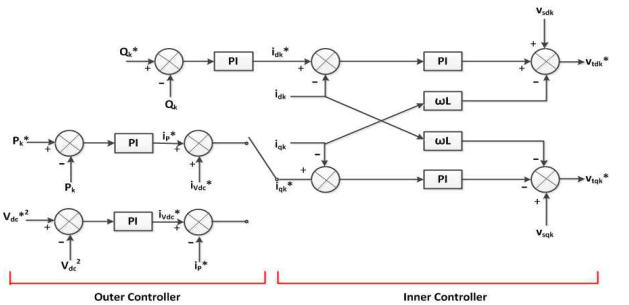

Fig. 2. Control diagram of MMC-HVDC system.

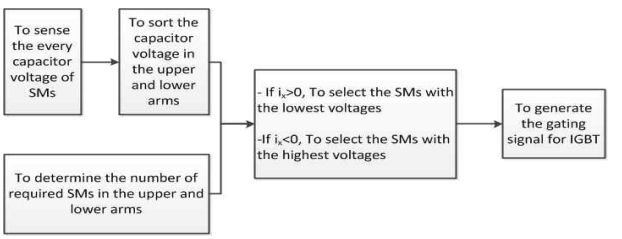

Fig. 3. Block diagram of the capacitor voltage balancing control for the MMC.

3.4 캐패시터 전압 밸런싱 제어

MMC의 각 Arm에 있는 SM의 캐패시터 전압이 균등하지 못하면, Arm사이에 순환전류가 흐르게 되어 Arm에서의 손실을 증가시키는 원인이 되고, 또한 출력전압의 THD가 증가하게 된다.

이를 해결하기위해 그림 3과 같이 각 SM의 전압값을 실시간으로 센싱하여 오름차순과 내림차순으로 정렬하는 알고리즘이 적용된 전압밸런싱 제어를 수행한다. 이를 통해, Arm으로의 전류i_x의 방향에 따라 캐패시터의 충전 시, 가장 낮은 서브모듈의 캐패시터부터 순차적으로 충전시키고 방전 시, 가장 높은 서브모듈의 캐패시터부터 순차적으로 방전시켜 각 서브모듈의 캐패시터 전압을 균등하게 한다.

4. 제주계통의 현황

4.1 제주 전력계통 현황

그림 4는 제주지역의 전력계통도를 나타낸다. 제주 전력계통의 주 송전망은 154kV 가공·지중선로로 구성되며, 전압강하를 고려하여 60Hz의 160kV로 운용중에 있다.

제주 전력계통은 다양한 형태의 부하와 발전원이 운전중에 있으며, 표 1과 같이 크게 3가지 전력설비를 통해 제주지역의 수요전력을 충당한다. 제주-해남간 300MW, 진도-서제주간 400MW의 설비용량을 갖는 2개

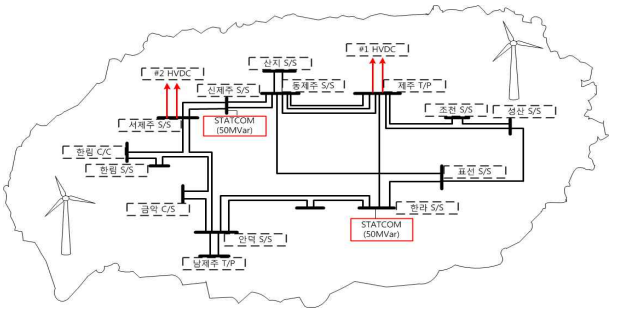

Fig. 4. Structure of Jeju Island power system.

TABLE I
POWER GENERATING SOURCES IN THE JEJU ISLAND POWER SYSTEM

Generation source		Installed capacity [MW]	Operating range	
			Min [MW]	Max [MW]
HVDC #1 (Haenam-Jeju)		300	50	150
HVDC #2 (Jindo-Jeju)		400	40	250
Jeju thermal power plant	Jeju T/P #2	75	46	79
	Jeju T/P #3	75	46	79
	Jeju D/P #1	40	28	40
	Jeju D/P #2	40	28	40
	Jeju G/T #3	55	16	44
Namjeju thermal power plant	Namjeju T/P #1	100	56	103
	Namjeju T/P #2	100	56	103
Hallim thermal power plant	Hallim S/T	105	41	90
	Hallim G/T #1			
	Hallim G/T #2			
Wind farm		221		
Total		1,511		

의 전류형 타입인 HVDC를 통해 육지계통과 연계되어, 제주 수요전력의 약 60%를 공급받는다. 전류형 타입의 HVDC는 설비 특성상 전력의 실시간 역송이 어려워 육지 주계통으로부터 제주 전력계통에 전력을 공급함을 주목적으로 한다. 화력발전으로는 제주화력 285MW, 남제주화력 200MW, 한림복합 105MW의 발전설비용량을 갖는 총 3개소 발전소가 운전중에 있으며, 풍력발전설비는 육·해상을 포함하여 총 220.56MW의 용량이 구축되어 있다. 발전설비 이외에 제주화력발전소에 55MW G/T #1, 2는 계통안정도 향상을 위해 동기조상기로서 운용중에 있다. 또한, 무효전력 보상장치인 50MVar STATCOM이 한라변전소, 신제주변전소 각각에 설치되어, 계통의 전압안정도 향상을 위해 운용중에 있다.

제주지역의 2014년 최소부하는 373MW이고, 최대부하는 715MW를 나타낸다. 또한, 제주도 전기자동차 정책 및 제 2 공항의 도입과 더불어 관광객의 증가 등으로 전력소비량이 크게 증가할 것으로 예상된다.

TABLE II
WIND FARM PLANNING, MINIMUM LOAD, WIND POWER PENETRATION LIMIT AND OUTPUT LIMIT OF WIND FARM IN THE JEJU ISLAND POWER SYSTEM

Year	Wind farm planning [MW]	Minimum load [MW]	Wind power penetration limit [MW]	Output limit of wind farm [MW]
2015	221	390	144	77
2016	290	407	161	129
2017	310	426	180	130
2018	606	445	199	407
2019	846	465	219	628
2020	1,090	486	240	850

4.2 2020년 제주계통의 풍력 한계용량

풍력발전 점유율이 증가할 경우 제주계통 내의 발전량이 증가하여 수요보다 공급이 많아지는 경우가 발생할 수 있으며 이 경우, 주파수와 전압이 불안정해져 계통에 악영향을 미치게 되므로 제주계통의 최소부하를 고려한 한계용량의 산정이 요구되고 이에 따른 풍력발전설비의 출력제어 및 계통설비 확충 등이 요구된다.

제주계통의 풍력 한계용량은 식 (17)과 같이 나타내어진다.

$$P_{\text{풍력한계용량}} \le P_{\text{제주지역 최소부하}} - P_{\text{제주지역 최소 발전용량}} + P_{HVDC\,3\text{역송가능용량}} \quad (17)$$

제주지역의 2020년 최소 부하는 2010~2014년간 평균 증가율 4.5%를 적용하면 표 2와 같이 486MW로 예측되며, 최소 발전용량은 전류형 HVDC #1, 2와 제주기력 #2, 남제주 기력 #3, 4의 최소 운전용량만이 운전된다고 가정할 때, 총 246MW로 산정할 수 있다. 이에 따라 2020년의 풍력 한계용량은 240MW로 제한되며, 이는 표 2와 같이 한전 제주지역본부의 "중장기 제주계통 전력수급 전망"을 기반으로 인허가 및 법적 절차 등 현상황을 고려하여 2020년 예측 풍력설비용량을 1,090MW로 산정할 때, 850MW의 풍력 출력 제한이 요구됨을 확인할 수 있다[7].

5. 모의실험 결과

200MW 21 Level MMC-HVDC의 동작 특성 분석을 위해 풍력발전 출력 변동 시와 2020년 제주전력계통 모의 시의 두 가지 시나리오를 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 이용해 모의실험하였다. 본 모의실험에 적용된 제주전력계통의 각 발전원은 그림 6과 같이 전류원 등가모델로 모델링하였으며, MMC-HVDC 시스템의 MMC는 그림 5와 같이 모델링하였다. MMC-HVDC의 내부 파라미터는 표 3과 같다.

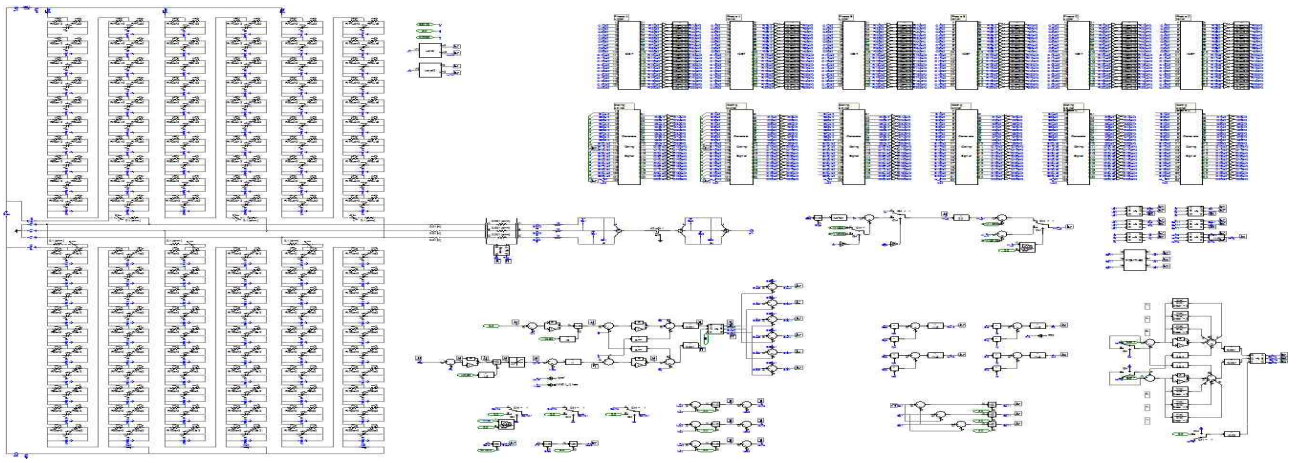

Fig. 5. PSCAD/EMTDC model of the MMC.

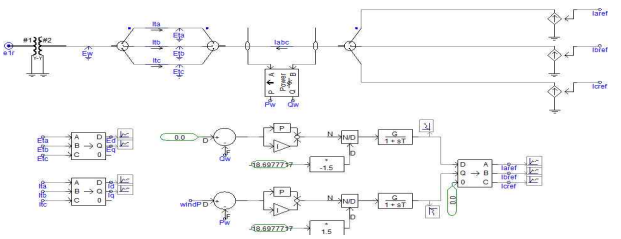

Fig. 6. PSCAD/EMTDC model of the generation source.

TABLE Ⅲ
PARAMETERS OF THE MMC-HVDC SYSTEM

Quantity	200MW HVDC
Rated capacity [MVA]	200
DC-link voltage [kV]	±50
Sub-module capacitor [μF]	7800
Norminal frequency [Hz]	60
AC system voltage [kV]	160
Transformer ratio [kV]	160/50
Number of SMs per arm	20
MMC switching frequency [Hz]	250

제주전력계통의 조건에 따라 60Hz, 160kV의 AC전압을 구성하고 MMC와 스위칭소자와 캐패시터의 용량 등을 고려하여 DC링크 전압을 선정하였다. 그리고 Modulation index에 따라 계통 주변압기의 변압비를 산정하였다. Submodule의 캐패시터의 용량은 Reference[8]에 준하여 산정되었다.

5.1 풍력출력 변동에 따른 MMC-HVDC 동작 특성

그림 7은 예측된 2020년 제주계통의 최소 486MW의 전력부하와 앞 절에서 언급된 제주지역내의 최소발전용량 246MW를 적용하였을 때, 풍력발전출력의 40~440MW 가변에 따른 200MW 설비용량의 HVDC #3의 동작을 나타낸다.

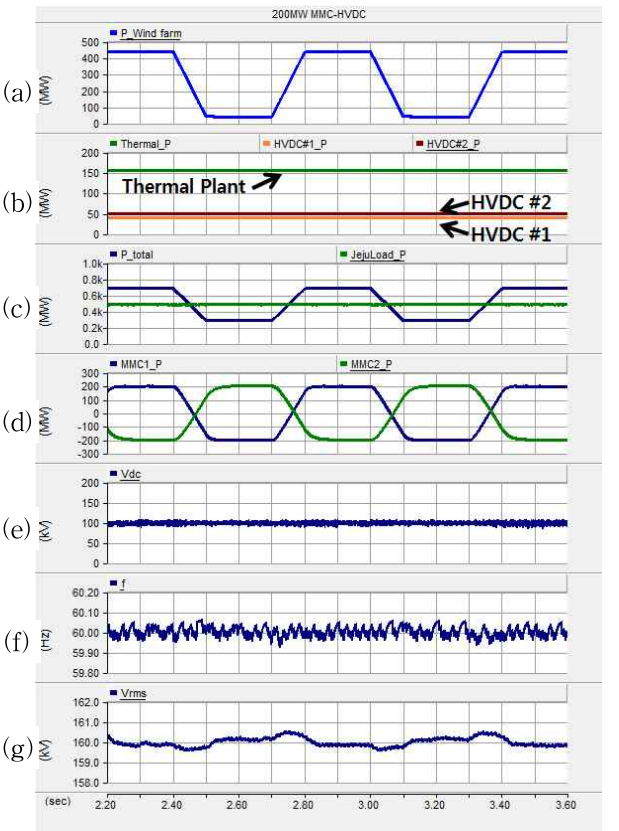

Fig. 7. The operation on 200MW MMC-HVDC system under variable wind power in Jeju Island power system.

그림 7-(a), (b)와 같이 풍력발전 출력이 변동하고 타 발전원이 최소운전을 함에 따라, 그림 7-(c)와 같이 제주지역 요구전력과 비교하여 부족 혹은 과잉전력이 발생되게 된다. 그림 7-(d)와 같이 풍력발전 출력이 40MW일 때 육지계통에서 제주전력계통으로 200MW의 전력송전이 수행되며, 풍력발전 출력이 440MW일 때 제주도계통에서 육지계통으로 -200MW의 전력역송이 수행된다. 이러한 육지계통으로의 역송이 가능함으로써 제주 전력계통의 풍력발전 출력이 MMC-HVDC 설비 용

TABLE Ⅳ
STANDARDS OF KOREA GOVERNMENT FOR VOLTAGE AND FREQUENCY

Quantity	Value
Voltage	139~169 [kV]
Frequency	60 ± 0.2 [Hz]

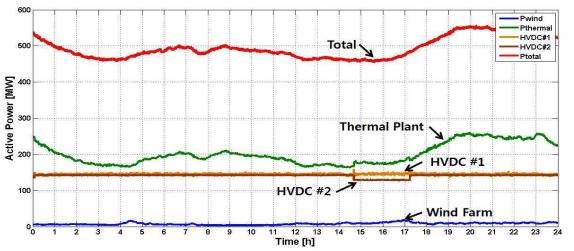

Fig. 8. Measured active power of the Jeju Island power system in April. 12, 2014.

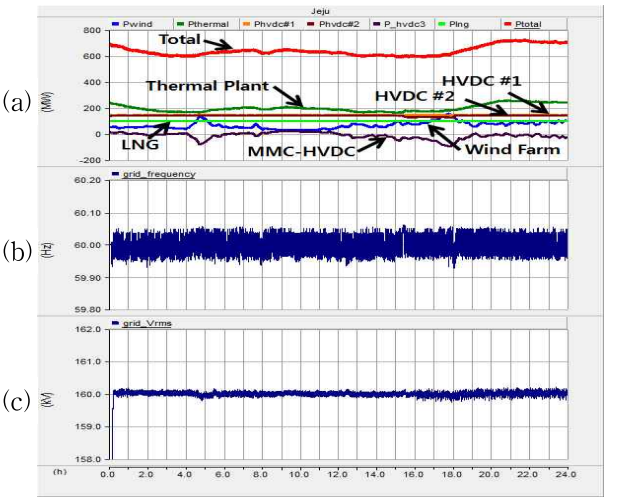

Fig. 9. Simulation results in April. 12, 2020.
(a) Active power (b) Grid voltage (c) Grid frequency

량만큼 증가하고, 이는 풍력한계용량이 200MW만큼 증가함을 말한다. 또한, 그림 7-(e)와 같이 시스템의 DC링크 전압이 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

풍력출력 변동 시, 계통의 주파수와 전압은 그림 7-(f), (g)와 같이 표 4에 언급된 산업통상자원부 "전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준"에 명시된 전압, 주파수 허용범위 이내에서 안정적으로 유지된다.

5.2 2020년 제주계통의 200MW MMC-HVDC 동작

그림 8은 2014년 4월 12일의 실제 측정된 제주계통의 발전원 출력파형이다. HVDC #1, 2 연계선이 정출력으로 전력을 공급함을 확인할 수 있으며, 풍력과 HVDC #1, 2의 출력에 따라 내연발전소에서 제주지역의 부족한 전력을 공급한다.

그림 9는 그림 8의 2014년 4월 12일 제주계통의 실제 발전원 출력과 부하 데이터를 기반으로 하여 2020년의 풍력발전설비용량과 부하를 예측하여 수행된 모의실험 결과이다. 2020년 4월 12일 예측을 위해 실제 전력부하와 풍력발전량을 2020년에 맞도록 Scale-up하였으며, 기타 발전원은 2014년과 동일하게 운전한다고 가정하였다. 또한, 2018년 준공예정인 200MW LNG 발전소 또한 100MW 정출력을 공급한다고 가정하였다.

전력부하와 풍력설비의 Scale-up계수는 표 5와 같이 2014년과 2020년의 최대부하와 풍력설비용량을 고려하여 각각 1.30(=934/716), 8.862(=1,090/123)로 산정하였다.

그림 9-(a)와 같이 4시, 12시경 2020년 제주계통의 풍력발전설비 출력이 증가함에 따라 잉여전력이 발생되고, 이에 따라 도입된 200MW MMC-HVDC는 발생되는 잉여전력을 계통의 안정을 위해 육지계통으로 실시간 역송한다. 이때, 4~6시, 12~19시 동안 발생된 잉여전력의 역송을 통해 풍력발전설비의 풍력출력제한을 방지하여 풍력발전설비의 효율을 높임을 확인할 수 있다.

TABLE Ⅴ
LOAD AND WIND FARM CAPACITY FOR SCALE-UP FACTORS

Quantity	Year	
	2014. 4	2020
Maximum load (MW)	716	934
Wind farm capacity (MW)	123	1,090

또한, 풍력발전 출력 급변과 실시간 역송 시에도 그림 9-(b), (c)와 같이 제주계통의 전압과 주파수가 표 4에 언급된 허용범위 이내에서 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있다.

5.2.1 제주계통측 MMC 제어 : P, Q 제어

그림 10은 예측된 2020년 4월 12일의 HVDC #3 제주계통측 MMC동작을 나타낸다. 제주계통측 MMC는 유·무효제어를 수행하며 유효전력 지령치는 제주계통의 수요전력에 대한 발전원 공급의 부족, 잉여량이 입력되며, 무효전력 지령치는 0으로 하여 역률을 1로 제어한다. 역률제어를 통해 제주계통과 육지 주계통간의 유효전력 송·수전량을 최대로 한다. 그림 10-(a)는 MMC의 d-q축 전류를 나타내며, 그림 10-(b), (c)는 이에 상응하는 유·무효전력을 나타낸다. 이를 통해 유·무효전력 지령값에 따라 설계된 MMC-HVDC 시스템의 출력이 잘 응동함을 확인할 수 있다. 그림 10-(d)는 제주계통측 MMC의 SM 캐패시터 전압을 나타낸다.

5.2.2 육지 주계통측 MMC 제어 : V_{dc}, Q 제어

그림 11은 예측된 2020년 4월 12일의 HVDC #3의 육지 주계통측 MMC 동작을 나타낸다. 육지 주계통측 MMC는 DC링크전압과 무효전력 제어를 수행한다. 그림 11-(a)는 MMC의 d-q축 전류를 나타내며 그림 11-(b)

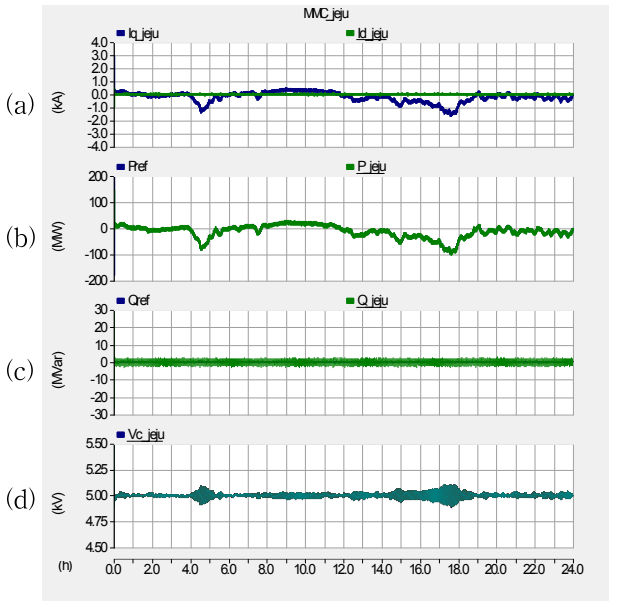

Fig. 10. The operation of the MMC in Jeju grid side
(a) dq-axis current of MMC; (b) Active power of MMC; (c) Reactive power of MMC; (d) Capacitor voltage of MMC.

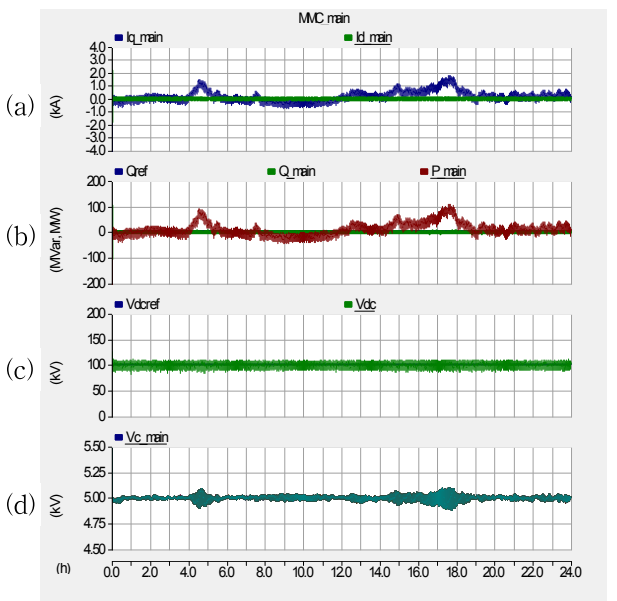

Fig. 11. The operation of the MMC in main grid side
(a) dq-axis current of MMC; (b) Active and reactive power of MMC; (c) DC link voltage of MMC; (d) Capacitor voltage of MMC.

는 이에 상응하는 유·무효전력 출력을 나타낸다. 이를 통해 무효전력이 지령치를 따라 우수한 성능으로 제어됨을 확인할 수 있다. 또한, 그림 11-(c)는 DC링크 전압 제어를 통해 DC링크 전압이 일정값으로 유지됨을 확인할 수 있다. 그림 11-(d)는 육지 주계통측 MMC의 SM 캐패시터 전압을 나타낸다.

6. 결 론

본 논문은 한전 제주지역본부와 인허가 및 법적절차 등 현상황을 고려하여 예측한 2020년 제주계통의 풍력설비 용량에 따른 2020년 제주 전력계통의 안정적인 운용 및 풍력한계용량 증대를 위한 전압형 HVDC 기반의 MMC-HVDC 시스템 도입에 대해 연구하였다.

200MW 용량을 갖는 21 Level MMC-HVDC 시스템 도입의 타당성을 위해 두 가지 시나리오를 통해 MMC-HVDC 시스템의 운전특성을 분석하였다. 첫째로, 풍력발전 변동 시를 모의하였으며 둘째로, 2014년 4월 12일 실제 출력데이터를 기반하여 풍력출력 제한이 발생되는 2020년 4월 12일의 제주전력계통을 모의하였다. 이러한 시나리오는 PSCAD/EMTDC 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 진행하였다.

모의실험 결과를 통해 MMC-HVDC가 계통의 전력평형을 위하여, 발생되는 잉여전력을 육지계통으로 실시간 역송함으로써 풍력발전 변동 시에도 제주계통의 전압, 주파수를 허용범위 이내로 유지하며 안정적인 운용에 기여함을 확인하였고, 잉여전력의 역송을 통해 풍력한계용량이 MMC-HVDC 시스템의 설비용량만큼 증가함을 확인하였다. 이 때, 풍력출력 제한을 방지하여 풍력발전설비의 효율이 증대됨을 알 수 있었다.

이를 통해, 풍력한계용량 증대를 위한 방안으로 실시간 양방향 전력전송이 가능한 전압형 HVDC 기반의 MMC-HVDC의 적절성을 확인하였으며, 향후 2020년에 더 큰 설비용량의 MMC-HVDC 설비의 도입 시 풍력한계용량의 증대 및 풍력발전설비의 효율 향상에 더욱 기여할 것으로 사료된다.

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호:20094020200020) 및「풍력발전설비 평가용 실증단지 확장개발」과제(과제번호:2012T100201731)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

[1] Jeju Special Self-Governing Province, "Low carbon green growth in jeju-carbon free island jeju by 2030," May 2012.

[2] S. Korea, "7th electricity supply and demand planning," July 2015.

[3] N. T. Quach, "Application of MMC-HVDC system for regulating grid voltage based on jeju island power system," *The Transaction of the Korean Institute of Power Electronic*, Vol. 19, No. 6, pp 494-502, Dec. 2014.

[4] Q. Tu, "Reduces switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 3, pp. 2009-2007, Jul. 2011.
[5] J. Qin, "Predictive control of a modular multilevel converter for a back-to-back HVDC system," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 27, No. 3, pp. 1538-1547, Jul. 2012.
[6] R. Z. Chai, "Control strategies of MMC-HVDC connected to passive networks," *TENCON 2013-2013 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1-4, Oct. 2013.
[7] Y. H. Kim, "Increasing effect analysis of the wind power limit using energy storage system in jeju-korea," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 34, No. 1, pp. 81-90, Jan. 2014.
[8] R. Marquardt, "Modulares stromrichterkonzept fur netzkupplungsanwendung bei hohen spannungen," *ETG Conference 2002*, Bad Nauheim, 2002.

이승민(李承玟)
1989년 12월 15일생. 2014년 제주대 전기공학과 졸업. 2014년~현재 동 대학원 풍력공학부 석사과정.

김일환(金一煥)
1962년 3월 29일생. 1985년 중앙대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1996년 오하이오주립대 전기공학과 박사 후 과정. 2004년~2005년 와싱턴대 전기공학과 객원 연구원. 1991년~현재 제주대 전기공학과 교수.

김호민(金鎬民)
1970년 8월 23일생. 1995년 제주대 전기공학과 졸업. 1998년 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공박). 2011년~현재 제주대 전기공학과 부교수.

채상헌(蔡尙憲)
1989년 12월 13일생. 2015년 제주대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 에너지응용 시스템학부 석사과정.

Ngoc-Thinh Quach
1984년 4월 20일생. 2007년 Can Tho University 전기공학과 졸업. 2012년 제주대 대학원 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2014년~현재 Lecturer at Can Tho University.