



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

MMC의 가변 직류링크전압
제어에 의한 풍력발전단지의
직류 연계 운전

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學專攻

蔡 尙 憲

2017 年 8 月

MMC의 가변 직류링크전압 제어에 의한 풍력발전단지의 직류 연계 운전

指導教授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017 年 8 月

蔡尙憲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2017 年 8 月

Operation of DC Grid Connection for
Wind Farm with the Variable DC Link
Voltage Control of MMC

Sang Heon Chae
(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2017. 8.

- i -

목 차

그림 목차	iv
표 목차	vi
SUMMARY	vii
1. 서 론	1
2. 시스템 제어 이론	4
2.1 PMSG용 컨버터 제어	4
2.1.1 PMSG 측 컨버터 제어	5
2.1.2 정류기 측 컨버터 제어	6
2.2 탭 절환 변압기 제어	8
2.3 MMC 제어	9
2.3.1 유·무효전력 제어	12
2.3.2 직류 링크 전압 제어	18
3. 모델링과 컴퓨터 해석	21
3.1 모델링	21
3.1.1 PMSG 모델링	22
3.1.2 탭 절환 변압기 모델링	23
3.1.3 MMC 모델링	26
3.2 컴퓨터 해석	28
3.2.1 직렬 연결 풍력발전기의 순차적 운전	30
3.2.2 가변 풍속에 따른 풍력발전단지 운전	31
4. 결과 및 고찰	33
4.1 컴퓨터 해석 결과	33
4.2.1 직렬 연결 풍력발전기의 순차적 운전	33
4.2.2 가변 풍속에 따른 풍력발전단지 운전	36
4.2 결과 고찰	39

5. 결론	42
참 고 문 헌	43

그림 목 차

Fig. 1 Conventional grid connection topology of offshore wind farm	1
Fig. 2 Grid connection topology of offshore wind farm based on DC network	2
Fig. 3 Control structure of PMSG for DC series connected wind farm	4
Fig. 4 Schematic diagram of generator side current controller	6
Fig. 5 Schematic diagram of generator side dc link voltage controller	6
Fig. 6 Schematic diagram of rectifier side output voltage controller	7
Fig. 7 Structure of single phase tap changing transformer by using TRIAC	8
Fig. 8 Structure of MMC	9
Fig. 9 Operation of submodule	12
Fig. 10 Schematic diagram of inner current controller	14
Fig. 11 Schematic diagram of outer active and reactive power controller	15
Fig. 12 Schematic diagram of circulating current controller	16
Fig. 13 Algorithm for submodule capacitor voltage balancing	17
Fig. 14 Modified schematic diagram of overall MMC HVDC controller	18
Fig. 16 Proposed operation algorithm of DC series connected wind farm	20
Fig. 17 Simulation model of 120MW DC series connected wind farm in PSCAD/EMTDC	21
Fig. 18 Simulation model of PMSG in PSCAD/EMTDC	22
Fig. 19 Simulation model of MMC side single phase tap changing transformer in PSCAD/EMTDC	23
Fig. 20 Simulation model of PMSG side single phase tap changing transformer in PSCAD/EMTDC	24
Fig. 21 Line to line RMS voltage of tap changing transformer	25
Fig. 22 Simulation model of MMC in PSCAD/EMTDC	27
Fig. 23 DC link voltage of PMSG	28
Fig. 24 Output line to line RMS voltage of PMSG	29
Fig. 25 DC link voltage of MMC	29
Fig. 26 Active power	30
Fig. 27 Wind speed of Udo Island measured at 10m	31
Fig. 28 Active power of wind farm by step up operation	33
Fig. 29 Reactive power of wind farm by step up operation	34
Fig. 30 System control level by step up operation	34
Fig. 31 DC link voltage of MMC by step up operation	35

Fig. 32 Output line to line voltage of MMC by step up operation	35
Fig. 33 Active power of wind farm in variable wind speed	36
Fig. 34 Reactive power of wind farm in variable wind speed	36
Fig. 35 System control level in variable wind speed	37
Fig. 36 DC link voltage of MMC in variable wind speed	37
Fig. 37 Output line to line voltage of MMC in variable wind speed	38

표 목 차

Table. 1 Parameters of PMSG	23
Table. 2 Parameters of the 21 level MMC-HVDC	26

SUMMARY

An offshore wind farm has many advantages such as a high and steady wind speed. However, economically it is hugely problematic. In order to reduce the installation costs of an offshore wind farm, many topologies for high-voltage direct current transmission system (HVDC) have been researched and analyzed by researchers from around the world.

DC series topology is one of the solutions for offshore wind farm about grid connection. In this method, the DC link voltage is created from the output voltage of the combined wind turbines connected to each other by the DC series. Because this method can get rid of the need for an offshore platform, which plays a role as a booster or AC/DC converter, it eliminates the need to spend on the installation costs, operation, and management of an offshore platform. However, the DC link voltage of a DC series connected to a wind farm may not be constant due to the variable wind speed. One wind turbine alone must be able to generate a high DC link voltage in order to transfer wind power to grid stably.

From this perspective, this thesis proposes the operation of a DC series connected wind farm by using a tap changer transformer technique with modular multilevel converter (MMC)-HVDC. In this study, the wind farm would have a variable DC link voltage based on the number of operating wind turbines. In order to verify the proposed method, a simulation will be conducted for two situations :

First, the random step operation of a wind farm.

Second, the operation of the wind farm with variable wind speeds.

The proposed method will be applied to a 120 MW wind farm with forty wind turbines. The simulation will be carried out by using the PSCAD/EMTDC program.

1. 서 론

육상 풍력발전의 지리적, 지형적 한계 극복과 우수한 풍황 조건을 활용하기 위한 대규모 해상풍력발전단지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1],[2]. 그러나 해상 풍력발전단지의 경우 설치와 유지보수 등 비용적 측면에서 육상 풍력발전단지와 비교할 때 단점이 있기 때문에 해상풍력발전단지의 설치 및 운영 비용 저감을 위한 다양한 계통 연계 기술이 연구 중에 있다[3],[4]. 계통 연계 기술 중에서는 크게 초고압 교류 송전 (High voltage alternative current transmission : HVAC)과 초고압 직류 송전 (High voltage direct current transmission system : HVDC) 기술로 나눌 수 있으며 기본적인 HVAC와 HVDC의 연계 해상풍력발전단지의 구조는 그림 1 (a), (b)와 같다[5],[6]. 참고문헌 [7]의 연구 결과에 따르면 400 MW 해상풍력발전단지 기준 52 km 이상 장거리의 송전 시 HVDC가 HVAC보다 경제적 측면에서 유리한 것으로 연구되었으며, 이에 따라 향후 대규모 해상 풍력발전단지의 전력 계통 연계 방안에서는 HVDC의 역할이 중요해질 것으로 전망된다.

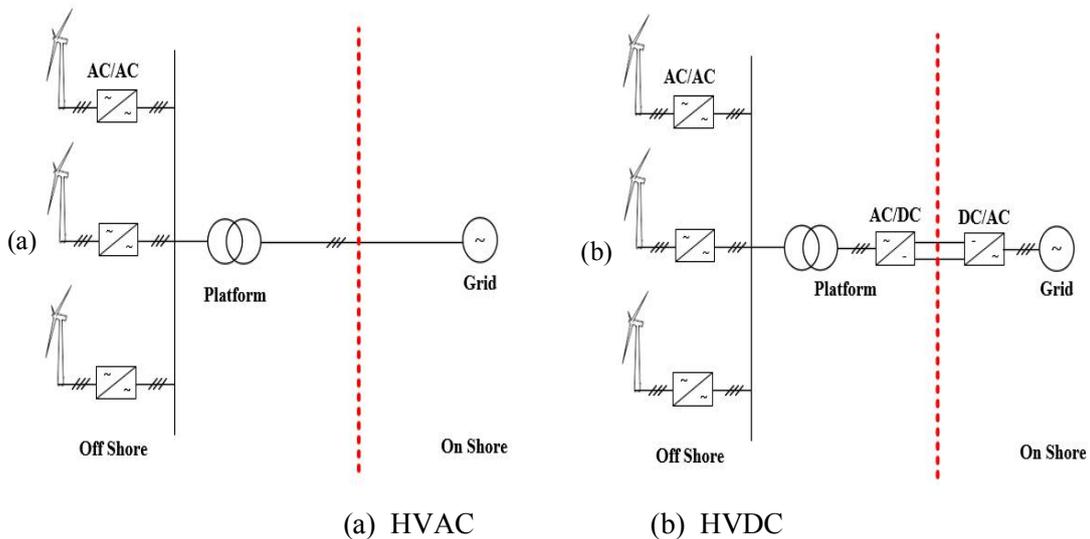


Fig. 1 Conventional grid connection topology of offshore wind farm

HVDC를 이용한 해상풍력발전단지 계통 연계 방안 중에서도 비용 저감을 위한 다양한 연계 방안이 연구 되고 있으며, 기존 Back to Back 구조의 VSC (Voltage source converter)-HVDC 시스템과 달리 풍력발전기가 영구자석 동기발전기 (Permanent magnet synchronous generator : PMSG)로 구성된 경우에 한하여 HVDC의 양방향 전력전송이 불필요하기 때문에 다수 풍력발전기를 교류가 아닌 직류로 연결하여 HVDC의 풍력발전단지 측 컨버터 비용을 저감하는 방법이 해상풍력발전단지의 경제성 확보를 위한 새로운 연계 방안으로 대두되고 있다[8].

그림 2 (a)와 (b)는 다수의 풍력발전기를 직류 병렬 및 직렬로 연결하여 VSC HVDC를 이용해 계통에 연계하는 방법을 각각 나타낸다. 이때 직류-병렬 구조의 경우 다수의 풍력발전기들이 병렬로 연계되어 있어 안정성이 우수하고, 소수의 풍력발전기만 기동할 때에도 전력전송에 문제가 없으나, 직류 전압 레벨이 낮기 때문에 HVDC의 구동을 위해서는 해상에 승압용 DC/DC 변환 플랫폼을 설치해야하며, 이때 대용량 DC/DC 컨버터의 기술적, 비용적 문제가 발생한다.

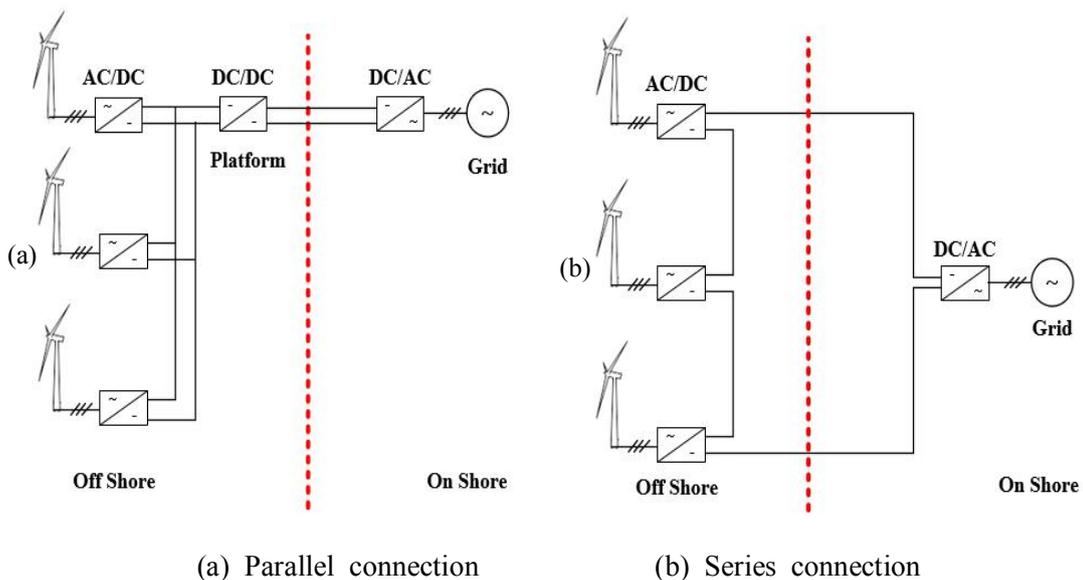


Fig. 2 Grid connection topology of offshore wind farm based on DC network

직류-직렬 구조의 경우에는 해상 플랫폼이 필요 없어 해상풍력발전단지 계통 연계 방안 중 경제적으로 가장 큰 장점을 가지고 있으나, 풍력발전기의 풍속에 따라 HVDC의 직류 링크 전압이 변동될 우려가 있으며, 소수의 풍력발전기가 기동할 경우에는 직류 링크 전압이 충분히 승압이 되지 않아 HVDC의 운용이 불가능한 경우가 발생할 수 있다[9]-[11].

이러한 문제점을 해결하기 위해 DC/DC 컨버터를 사용한 직류-직렬 구조의 풍력발전단지 운용 방안이 제안되어 왔으나, 단 1기의 풍력발전기 운전을 가정하였을 때 풍력발전기 출력 직류 전압은 MMC (Modular multilevel converter)의 직류 전압과 동일해야 한다. 이는 전력용 스위치 반도체 소자의 용량과 설비의 절연 문제 등으로 현실적인 운용이 곤란하며, 가능하더라도 해상 풍력발전단지의 경우 절연 레벨 증가로 인해 설비 간 이격거리 증가 등 추가적인 비용적인 문제가 발생한다[12]-[13].

따라서 본 논문에서는 직류-직렬로 연결되는 해상풍력발전단지의 운용을 위해 VSC-HVDC의 계통 측과 풍력발전기 측에 설치되는 기존의 변압기를 탭 절환 변압기로 대체하여 가변 직류 링크 전압을 갖는 VSC-HVDC에 의한 해상풍력발전단지의 운용을 제안한다.

제안된 방안의 타당성 검증을 위해 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 모델링된 풍력발전단지의 운용에 대한 해석 결과를 나타내고 이를 통해 유용성을 검증하고자 한다.

2. 시스템 제어이론

2.1 PMSG용 컨버터 제어

그림 3은 직류-직렬 연결 풍력발전단지 구성을 위한 1기의 PMSG 풍력발전기의 제어 구조이다. 일반적인 Back to back 컨버터 방식으로 설계하였으나, 추가적으로 승압용 탭 절환 변압기에 출력이 연결되며, 이후 직류 변환을 위한 다이오드 정류기를 통과하여 MMC-HVDC의 직류 링크에 직렬로 연결된다. 이때 컨버터의 구조는 일반적인 구조를 사용하였으나, 계통 연계형 풍력발전시스템과는 달리 직류 연결 풍력발전단지의 경우 컨버터 이후에 출력 전압의 크기, 위상 그리고 주파수의 기준 전압이 없기 때문에 제어 방법을 달리 해야한다. 본 논문에서는 제어기 설계를 관성이 없는 독립형 마이크로그리드에 연계된 PMSG의 제어방법에 대해 연구된 [14]를 참고하여 해당 참고 문헌에 적용된 제어 이론과 동일한 방법을 적용하였다.

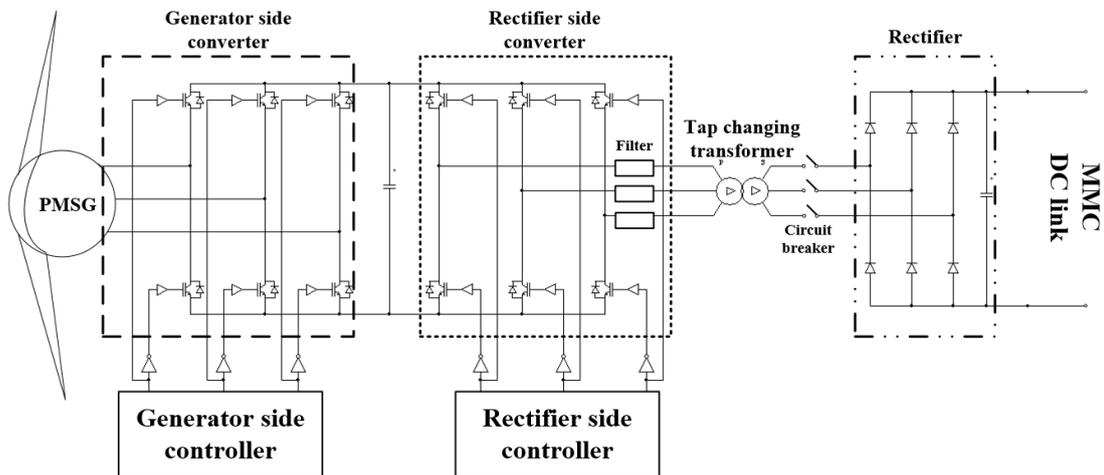


Fig. 3 Control structure of PMSG for DC series connected wind farm

2.1.1 영구자석형 풍력발전기 측 컨버터 모델링

계통에 연계되어 있어 일반적인 제어 방법을 사용하는 PMSG와는 직류-직렬 연계를 위한 PMSG의 제어는 정류기 측 컨버터에서 일정한 크기와 주파수를 갖는 전압을 공급을 해야하기 때문에 PMSG 측 컨버터에서 직류 링크 전압제어를 수행하여 정류기 측 컨버터의 출력 전압 안정화에 기여하여야 한다.

이때 PMSG의 dq 동기좌표계에서의 전압 방정식은 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 그림 4와 같이 전류제어기로 도식화 할 수 있다. 그림 4에서 i_{gq}^* 는 그림 5의 직류 링크 전압제어기와 연결되며, i_{gd}^* 는 0으로 제어된다. 직류 링크 전압 제어기는 직류 링크 전압에 맞춰 PMSG 출력을 제어할 수 있도록 그림 5와 같이 제어기를 설계하였으며, 그림 5에서 V_{dc}^* 는 직류 링크 전압 지령값, V_{dc} 는 직류 링크 전압, P_g^* 는 PMSG 지령값 그리고 P_g 는 PMSG 유효전력과 같다.

$$v_{gd} = R_s i_{gd} + L_s \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_s i_{gq} \quad (1)$$

$$v_{gq} = R_s i_{gq} + L_s \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_g L_s i_{gd} \quad (2)$$

여기서, v_{gdq} : PMSG 고정자 dq 등가 전압

i_{gdq} : PMSG 고정자 dq 등가 전류

L_s : 고정자 인덕턴스

R_s : 고정자 저항

ω_g : PMSG 회전 각속도

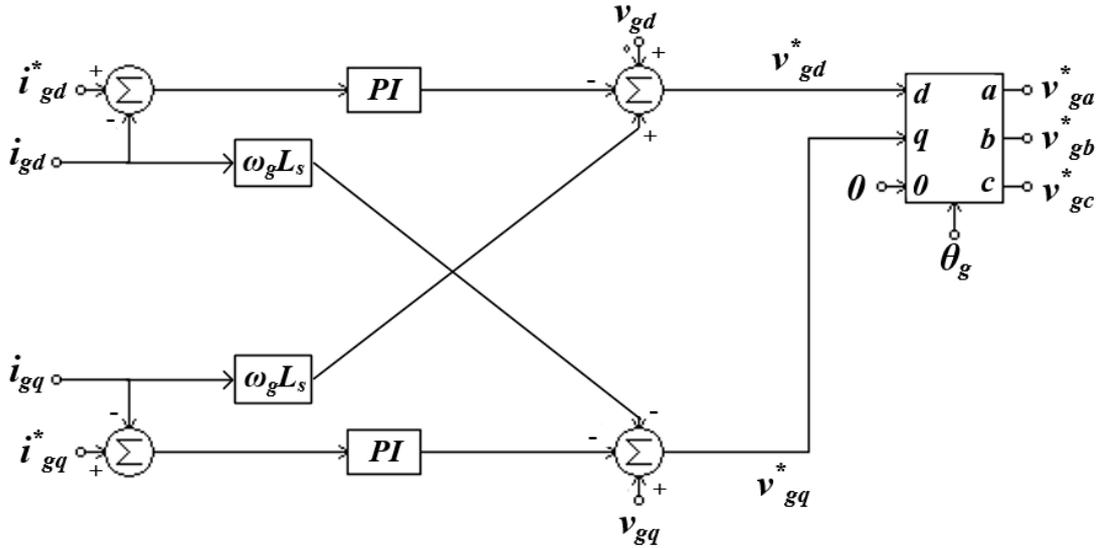


Fig. 4 Schematic diagram of generator side current controller

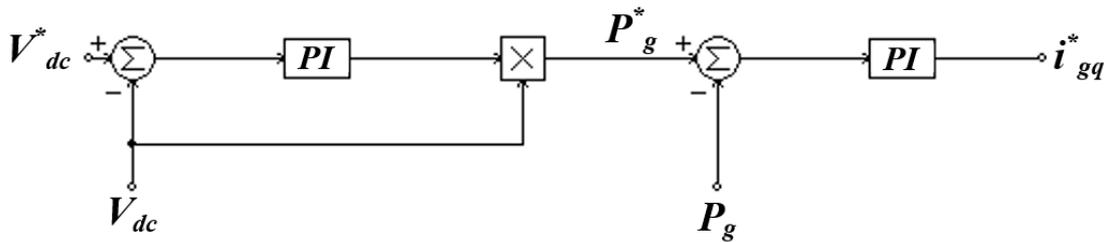


Fig. 5 Schematic diagram of generator side DC link voltage controller

2.1.2 정류기 측 컨버터 제어

일반적인 풍력발전기의 제어 구조와는 달리 직류-직렬 연결 풍력발전기의 정류기 측 컨버터의 경우 일정한 크기, 위상 그리고 주파수 갖는 전압을 발생하여야 한다. 따라서 PWM 신호를 생성하기 위한 전압은 식 (3)-(5)과 같으며 이를 그림 6과 같이 도식화 할 수 있다.

$$v_{ra}^*(t) = |V^*| \cos(\omega t + \delta^*) \quad (3)$$

$$v_{rb}^*(t) = |V^*| \cos(\omega t + \delta^* - \frac{2\pi}{3}) \quad (4)$$

$$v_{rc}^*(t) = |V^*| \cos(\omega t + \delta^* + \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

여기서, $v_{rabc}^*(t)$: 정류기 측 컨버터의 a,b,c 상전압 지령치

$|V^*|$: 출력 전압 지령값의 크기

ω : 출력 주파수

δ^* : 위상각 지령값

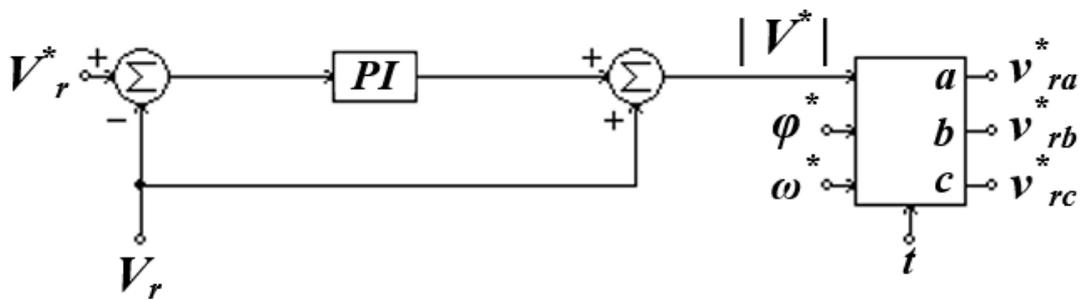


Fig. 6 Schematic diagram of rectifier side output voltage controller

2.2 탭 절환 변압기 제어

그림 7은 트라이악을 사용한 탭 절환 변압기를 나타낸다. 이때 트라이악의 동작으로 일정한 입력전압을 이용하여, 가변의 출력 전압을 생성하거나, 일정한 폭으로 변화하는 입력 전압을 이용하여 고정된 크기의 출력 전압을 얻을 수 있다. 그림 7과 같은 구조에서 트라이악을 이용한 탭 절환 변압기의 2차 측 전압은 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 트라이악이 Turn on 상태일 때 $T_n=1$ 이며, Turn off 상태에서 $T_n=0$ 과 같다[15].

$$v_{out} = \frac{(N_{s1}T_1 + N_{s2}T_2 + N_{s3}T_3 + N_{s4}T_4)}{N_p} v_{in} \quad (6)$$

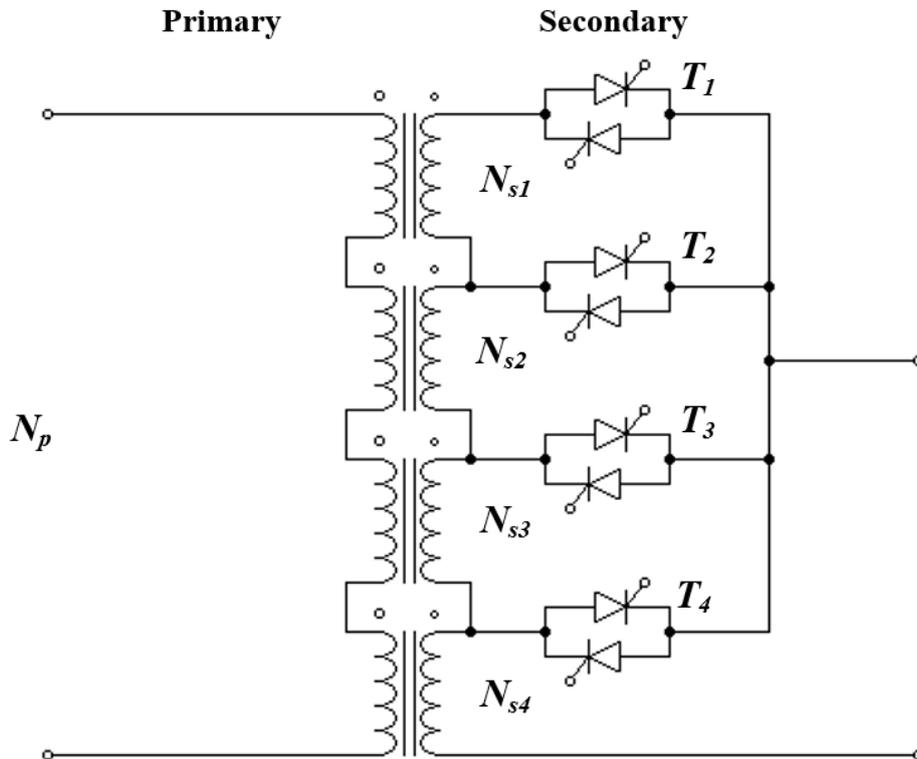


Fig. 7 Structure of single phase tap changing transformer with TRIAC

2.3 MMC 제어

가장 대표적인 3상 N+1 레벨 MMC는 그림 8과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 하프 브릿지 구조의 서브모듈이 직렬로 연결된 구조로 각 상 암에 순환전류 억제와 고장 전류 억제를 위한 암 인덕터(L_0)가 연결되어 있다[16].

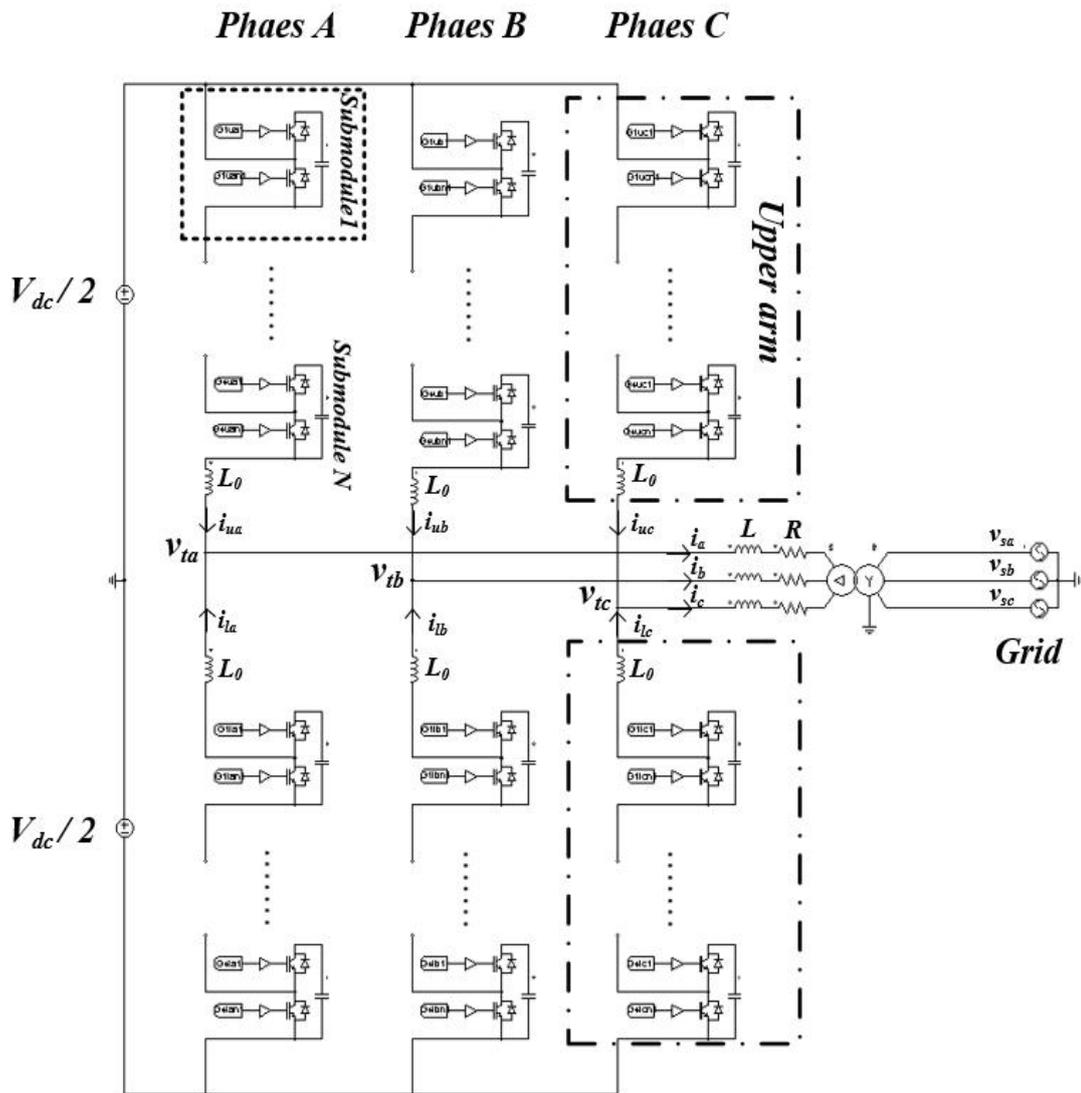


Fig. 8 Structure of MMC

이때 각 암에 흐르는 순환 전류는 식 (7)과 같이 계산할 수 있으며, 이에 따른 순환전류 억제를 위한 암 인덕터 값은 식 (8)로 산정 할 수 있다[17]-[19].

$$I_{cira} = \frac{\sqrt{\left(\frac{3}{64}Nm_v I_{ma} \cos\phi - \frac{1}{48}Nm_v^2 I_{dc}\right)^2 + \left(\frac{3}{64}Nm_v I_{ma} \sin\phi\right)^2}}{\omega^2 L_0 C - \frac{Nm_v^2}{24} - \frac{N}{16}} \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{1}{\omega^2 C} \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{3}{64}Nm_v I_{ma} \cos\phi - \frac{1}{48}Nm_v^2 I_{dc}\right)^2 + \left(\frac{3}{64}Nm_v I_{ma} \sin\phi\right)^2}}{I_{cira}} + \frac{Nm_v^2}{24} + \frac{N}{16} \right] \quad (8)$$

여기서, I_{cira} : a상 순환 전류 [A]

N : 서브모듈 수

I_{ma} : a상 전류 최대값 [A]

m_v : 변조비

$\cos\phi$: 역률

I_{dc} : 직류 전류 [A]

$\sin\phi$: 무효율

ω : 위상각속도 [rad/s]

C : 서브모듈 커패시턴스 [F]

L_0 : 암 인덕턴스 [H]

하프 브릿지 구조의 서브모듈은 커패시터, 스위칭 소자 그리고 이에 역병렬 구조로 연결된 다이오드로 구성되어 있으며, 전류 방향에 따른 서브모듈 동작은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 이때 서브모듈의 전압은 식 (9)와 같으며, 이에 따른 서브모듈 커패시턴스는 식 (10)과 같이 산정된다[20].

$$v_{sm} = \frac{V_{dc}}{N} \quad (9)$$

$$C = \frac{S}{3Nm_v\omega\epsilon V_c^2} \left[1 - \left(\frac{m_v \cos\phi}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

여기서, v_{sm} : 서브모듈 전압

V_{dc} : 직류 링크 전압 [V]

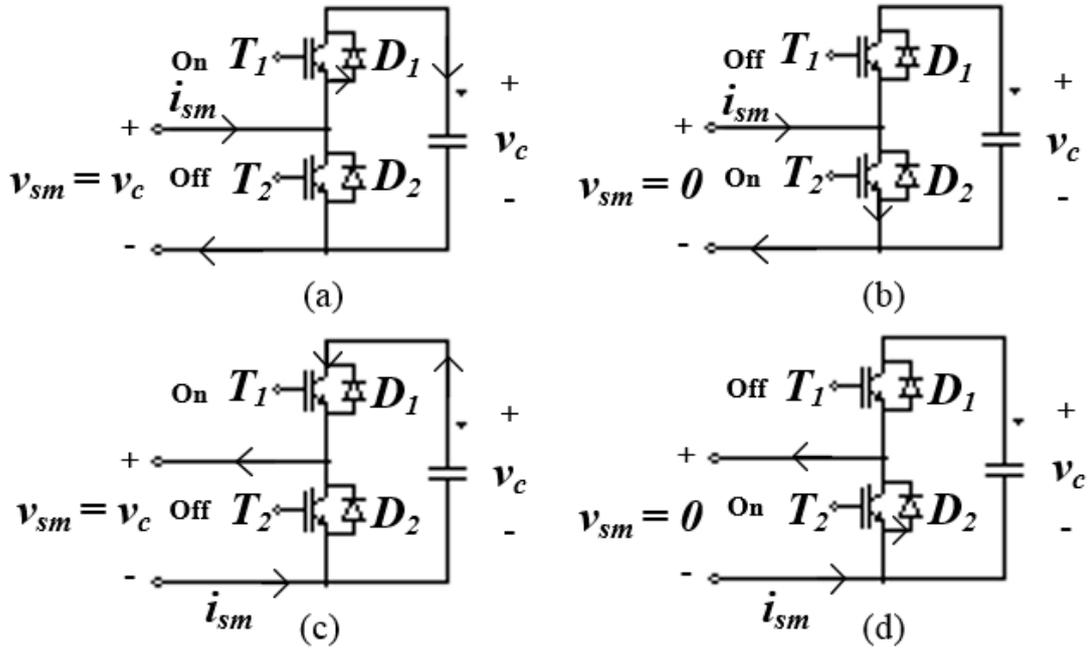
S : 피상전력 [VA]

ϵ : 커패시터 전압 리플율 [%]

V_c : 커패시터 평균 전압 [V]

MMC의 서브모듈은 그림 9와 같이 스위치 T1과 T2의 On-off 동작에 따라 크게 두가지 상태로 나눌 수 있으며, On 상태는 그림 4의 (a)와 (c), Off 상태는 그림 (b)와 (d)로 구분된다. 먼저 On 상태에서 양 전류의 경우 D1 다이오드를 통해 서브 모듈의 커패시터가 충전되며, 음 전류가 흐를 경우에는 T1 스위치의 On 동작으로 서브 모듈의 커패시터는 방전함으로써 On 상태의 서브 모듈 출력 전압은 커패시터 전압과 같게 된다.

Off 상태에서 양 전류가 흐를 경우 T2 스위치의 On 동작으로 서브모듈은 바이패스되며, 음 전류가 흐를 경우에는 D2 다이오드를 통해 바이패스 되어 Off 상태의 서브모듈의 전압은 0과 같다[21].[22].



(a) On-state : positive current (b) Off-state : negative current
(c) On-state : negative current (d) Off-state : positive current

Fig. 9 Operation of submodule

2.3.1 유·무효전력 제어

식 (11)은 컨버터 출력에 대한 전압 방정식을 나타낸다.

$$v_{sj} = Ri_j + L \frac{di_j}{dt} + v_{tj} \quad (j = a, b, c) \quad (11)$$

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\phi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\phi) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\phi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\phi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (\theta = \int_0^t \omega_c dt) \quad (12)$$

이때 식 (11)에 3상 전압방정식을 식 (12)를 이용하여 동기좌표계로 나타내면 식 (13), (14)와 같은 dq 전압방정식을 도출할 수 있다.

$$v_{sd} = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + v_{td} - \omega Li_q \quad (13)$$

$$v_{sq} = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + v_{tq} + \omega Li_d \quad (14)$$

식 (13), (14)을 dq 터미널 전압으로 정리하면 식(15), (16)과 같다.

$$v_{td} = -Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + v_{sd} + \omega Li_q \quad (15)$$

$$v_{tq} = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + v_{sq} - \omega Li_d \quad (16)$$

위 식 (15), (16)을 PI 전류 제어식으로 표현하면 식 (17), (18)과 같고 이는 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{td}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) + v_{sd} + \omega Li_q \quad (17)$$

$$v_{tq}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) + v_{sq} - \omega Li_d \quad (18)$$

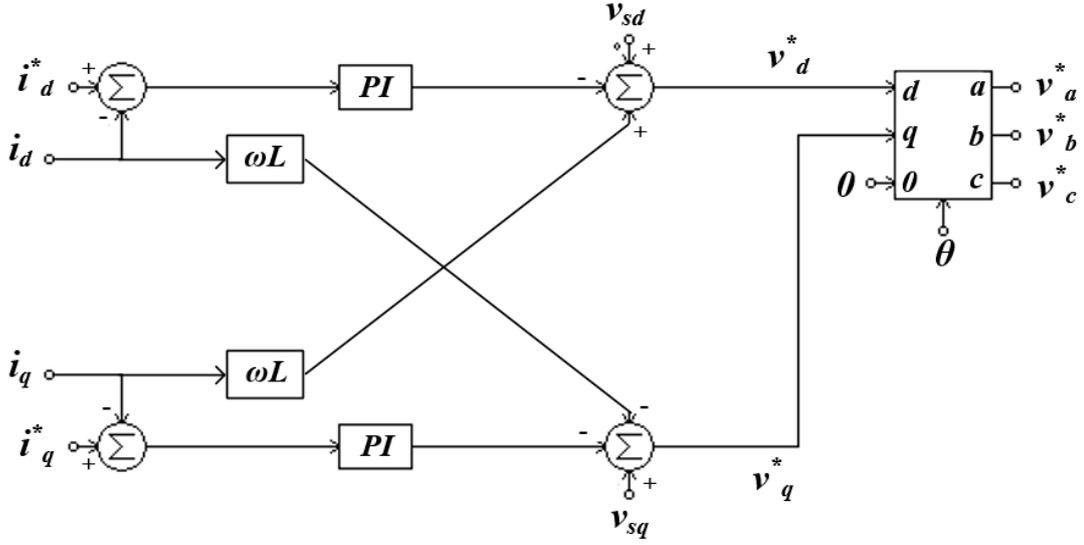


Fig. 10 Schematic diagram of inner current controller

이때 dq축 동기좌표계에서 유·무효전력은 식 (19), (20)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 dq축 전류 지령값은 식 (21), (22)로 계산할 수 있으며, 이에 따른 유·무효 전력 제어기는 그림 11과 같이 표현 할 수 있다[23].

$$P = \frac{3}{2}(v_{sd}i_d + v_{sq}i_q) = \frac{3}{2}(v_{sq}i_q) \quad \text{for } v_{sd} = 0 \quad (19)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_{sd}i_q - v_{sq}i_d) = -\frac{3}{2}(v_{sq}i_d) \quad (20)$$

$$i_d^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(Q^* - Q)\left(-\frac{2}{3v_{sq}}\right) \quad (21)$$

$$i_q^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(P^* - P)\left(\frac{2}{3v_{sq}}\right) \quad (22)$$

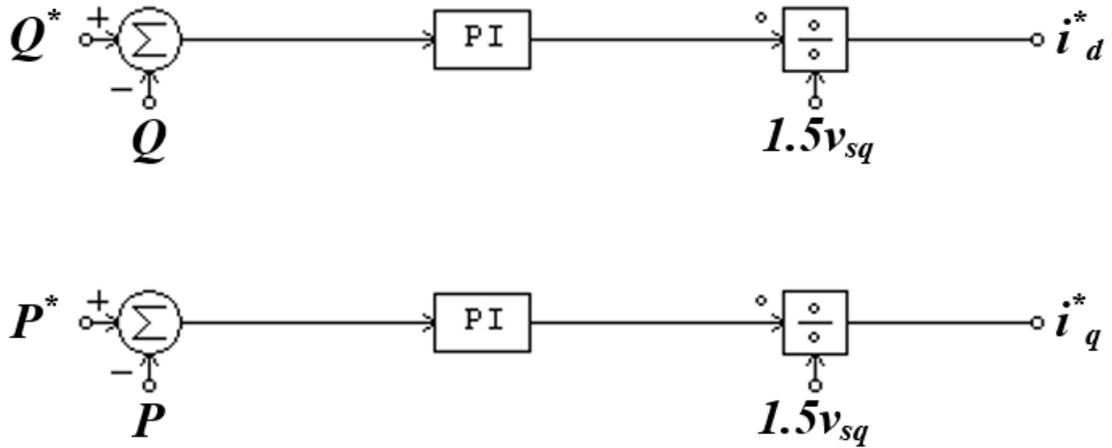


Fig. 11 Schematic diagram of outer active and reactive power controller

여기서 추가적으로 MMC의 경우 내부 순환전류 억제를 위한 제어와 서브모듈 커패시터의 전압 균등 제어를 필요로 한다. 먼저 순환전류에 대한 불평형 전압 방정식은 식 (23)-(25)로 정의되며 이때 각 상의 시퀀스는 a,c,b 순으로 정의된다.

$$v_{diffa} = R_0 i_{diffa} + L_0 \frac{di_{diffa}}{dt} \quad (23)$$

$$v_{diffc} = R_0 i_{diffc} + L_0 \frac{di_{diffc}}{dt} \quad (24)$$

$$v_{diffb} = R_0 i_{diffb} + L_0 \frac{di_{diffb}}{dt} \quad (25)$$

위 식 (23)-(25)를 동기좌표계에서의 전압방정식으로 나타내면 식 (26), (27)과 같다. 이때 순환전류 제어기는 식 (28), (29)와 같으며, 그림 12로 나타낼 수 있다.

$$v_{diffd} = R_0 i_{circd} + L_0 \frac{di_{circd}}{dt} - 2\omega L_0 i_{circq} \quad (26)$$

$$v_{diffq} = R_0 i_{circq} + L_0 \frac{di_{circq}}{dt} + 2\omega L_0 i_{circd} \quad (27)$$

$$v_{diffd}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{circd}^* - i_{circd}) - 2\omega L_0 i_{circq} \quad (28)$$

$$v_{diffq}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{circq}^* - i_{circq}) + 2\omega L_0 i_{circd} \quad (29)$$

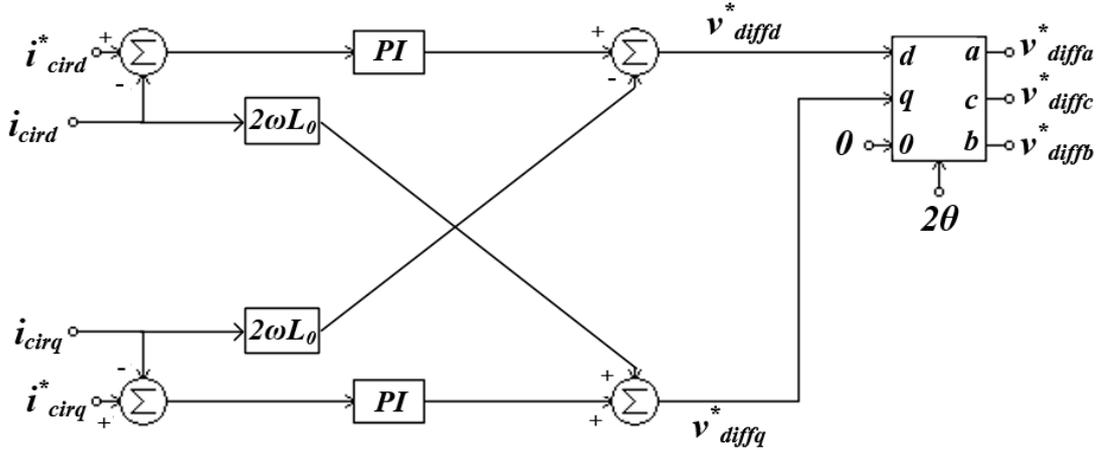


Fig. 12 Schematic diagram of circulating current controller

불평형 전압 방정식은 식 (29)로도 표현 할 수 있으며, 이를 식 (30)과 같은 MMC 출력 상전압 식에 대입하여 각 상의 상, 하단 암 전압에 관한 식으로 정리 하면 불평형 전압 성분을 고려한 상, 하단 암전압 방정식은 식 (31), (32)로 나타 낼 수 있다[24],[25].

$$v_{diffj} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{v_{uj} + v_{lj}}{2} \quad (29)$$

$$e_j = \frac{v_{lj} - v_{uj}}{2} \quad (30)$$

$$v_{uj}^* = \frac{V_{dc}}{2} - e_j^* - v_{diffj}^* \quad (31)$$

$$v_{lj}^* = \frac{V_{dc}}{2} + e_j^* - v_{diffj}^* \quad (32)$$

여기서 그림 13은 서브모듈 전압 균등을 위한 알고리즘으로 상, 하단 암의 서브모듈 커패시터 전압을 전류에 방향에 따라 오름차순 또는 내림차순으로 정렬하여 스위칭 ON, OFF를 수행하는 서브모듈을 결정하는 알고리즘이다[26].

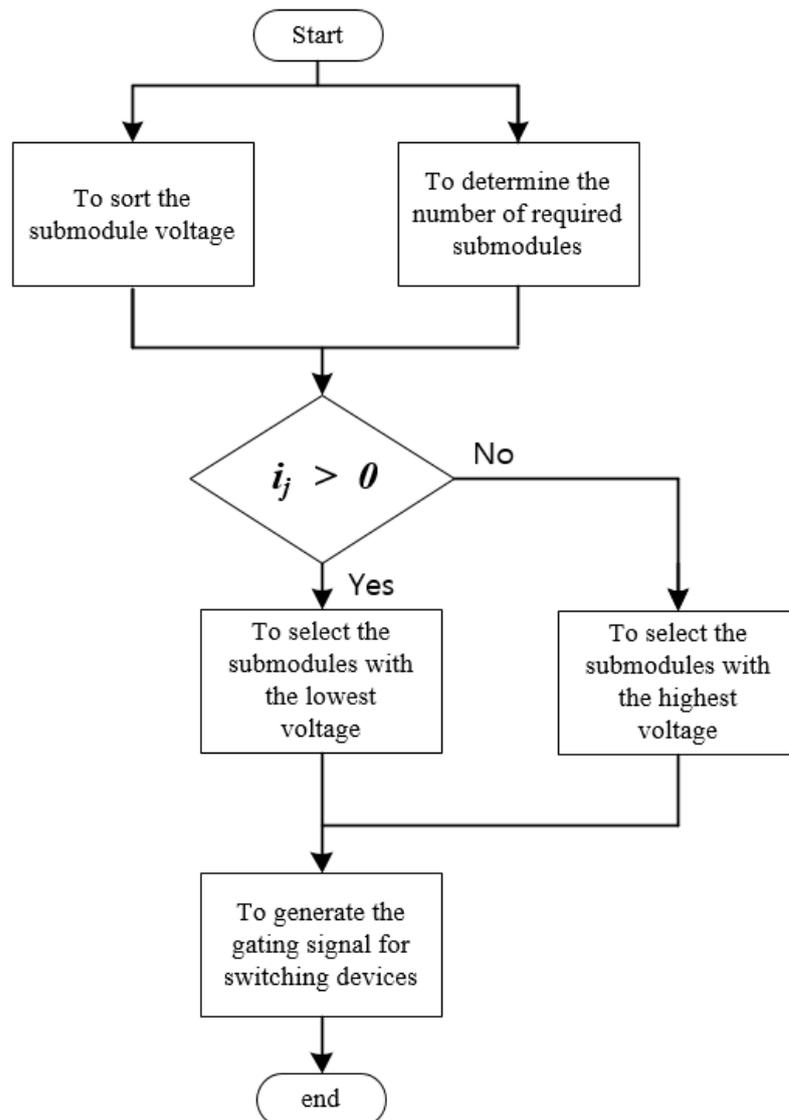


Fig. 13 Algorithm for submodule capacitor voltage balancing

위 수식과 그림 10-13을 종합하면 그림 14와 같은 MMC-HVDC 제어 알고리즘을 도출할 수 있다.

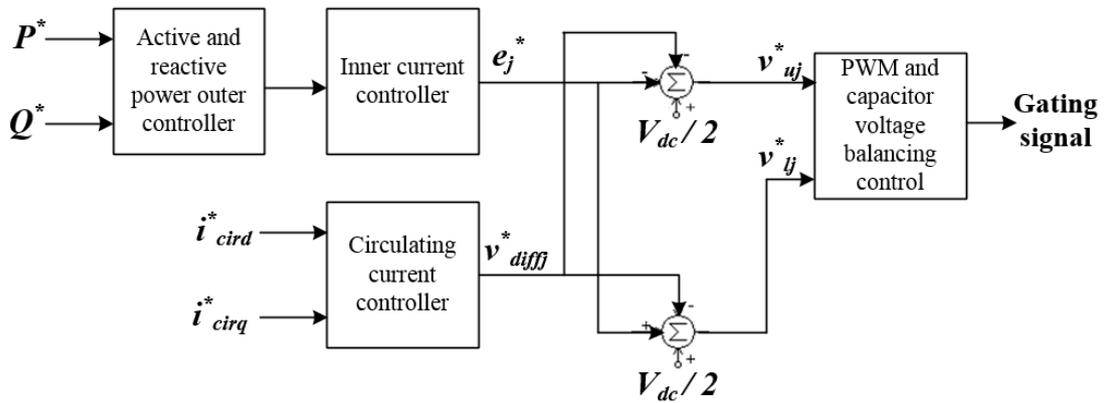


Fig. 14 Modified schematic diagram of overall MMC HVDC controller

2.3.2 직류 링크 전압 제어

본 논문에서는 풍력발전단지의 직류-직렬 연결 운전을 위해서 그림 16과 같은 운영 알고리즘을 통하여 가변 직류 링크를 갖는 MMC-HVDC의 운용을 제안한다. 그림 16에서 $v_{dc,m}$ 은 MMC 초기 직류 링크 전압, N_{set} 은 단위 묶음 풍력발전기 수, i 는 단위 묶음 내 풍력발전기 개수 ($i=1,2 \dots N_{set}$), j 는 전체 풍력발전기 수 ($j=1,2 \dots LN_{set}$), L 은 직류 링크 및 MMC 출력 측 변압기 탭 변환 레벨, $v_{ac,ut}$ 는 풍력발전기 변압기 2차측 출력 교류 전압, $N_{ut,omi}$ 는 단위 묶음 내 Bypass 스위치가 on 되어진 풍력발전기 수, $v_{ac,m}$ 은 MMC 출력 교류 전압, $v_{ac,g}$ 은 MMC 연계 계통 전압, m 은 MMC의 변조비, $v_{dc,wtj}$ 는 j 번 풍력발전기의 직류 출력 전압을 나타낸다.

제안된 알고리즘은 풍력발전기의 특정 대수를 묶음으로 정하고 묶음 단위로 풍력발전기의 승압용 변압기의 탭을 조정하여 직류 링크를 일정하게 유지함과 동시에 소수 풍력발전기의 기동 시에도 전력 전송이 가능하게 한다. 이때 묶음 단위 이상의 풍력발전기가 기동하였을 때는 이를 새로운 묶음으로 제어하며, 이를 통해 직류 링크 전압을 레벨 단위로 승압한다. 이때 직류 링크 전압을 승압하기 때문에 계통과 연계된 MMC 출력 전압도 증가하며, MMC 측 변압기의 탭 또한 레벨에 비례하여 증가된다.

예를 들어, N_{set} 의 5대일 경우, 1대부터 5대의 풍력발전기가 기동할 때 풍력발전기 측의 탭 절환 변압기 탭 조정이 이루어져, 직류 링크 전압을 일정하게 유지한다. 이때 1대의 풍력발전기가 추가로 기동할 경우에는 직류 기존 5대의 풍력발전기의 탭은 그대로 유지하되 1대의 풍력발전기는 가장 상위 탭을 선택하여 직류 링크 전압을 승압하고, 이와 동시에 MMC 출력 측 탭 절환 변압기의 탭을 조정하여 출력 전압을 승압하게 된다.

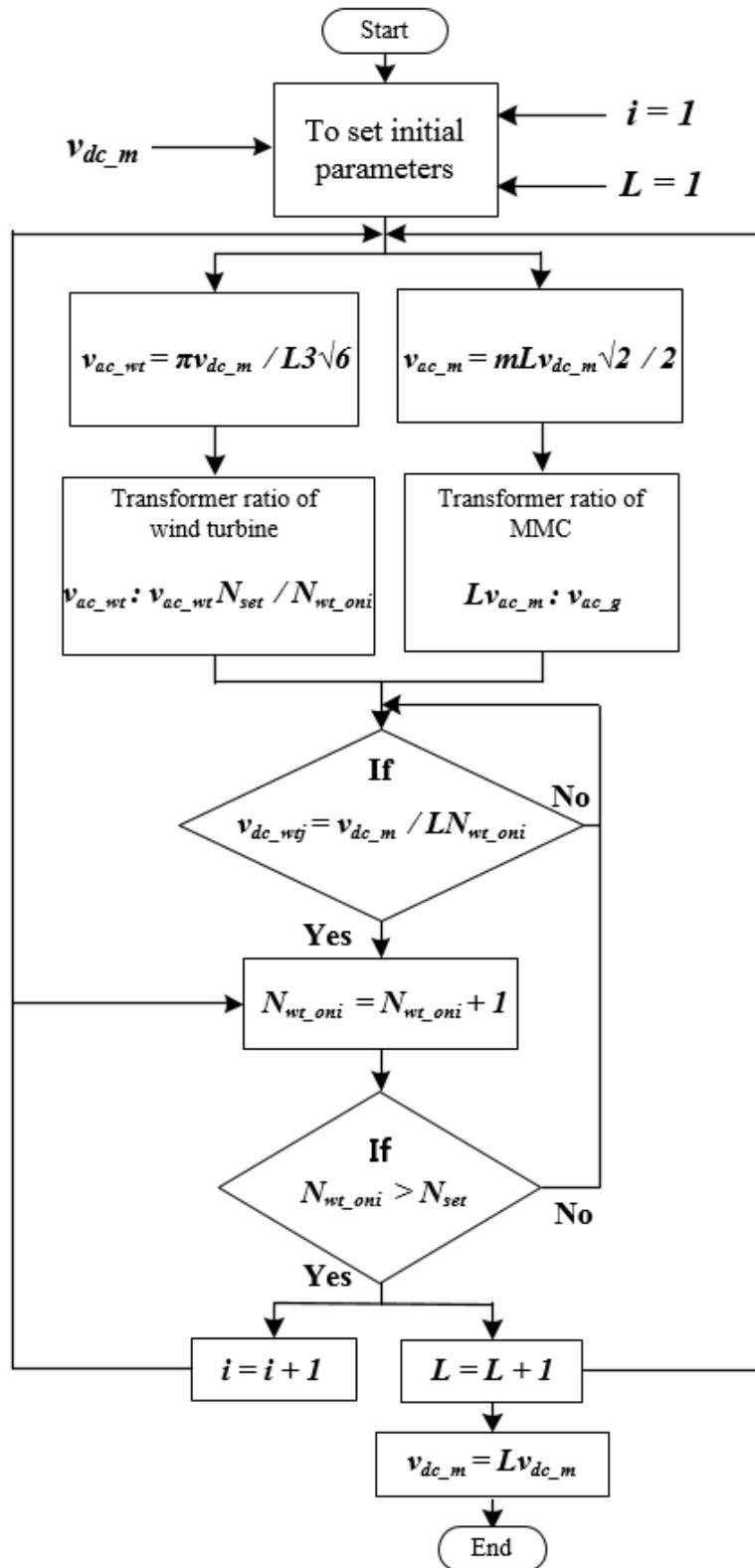


Fig. 16 Proposed operation algorithm of DC series connected wind farm

3. 모델링과 컴퓨터 해석

3.1 모델링

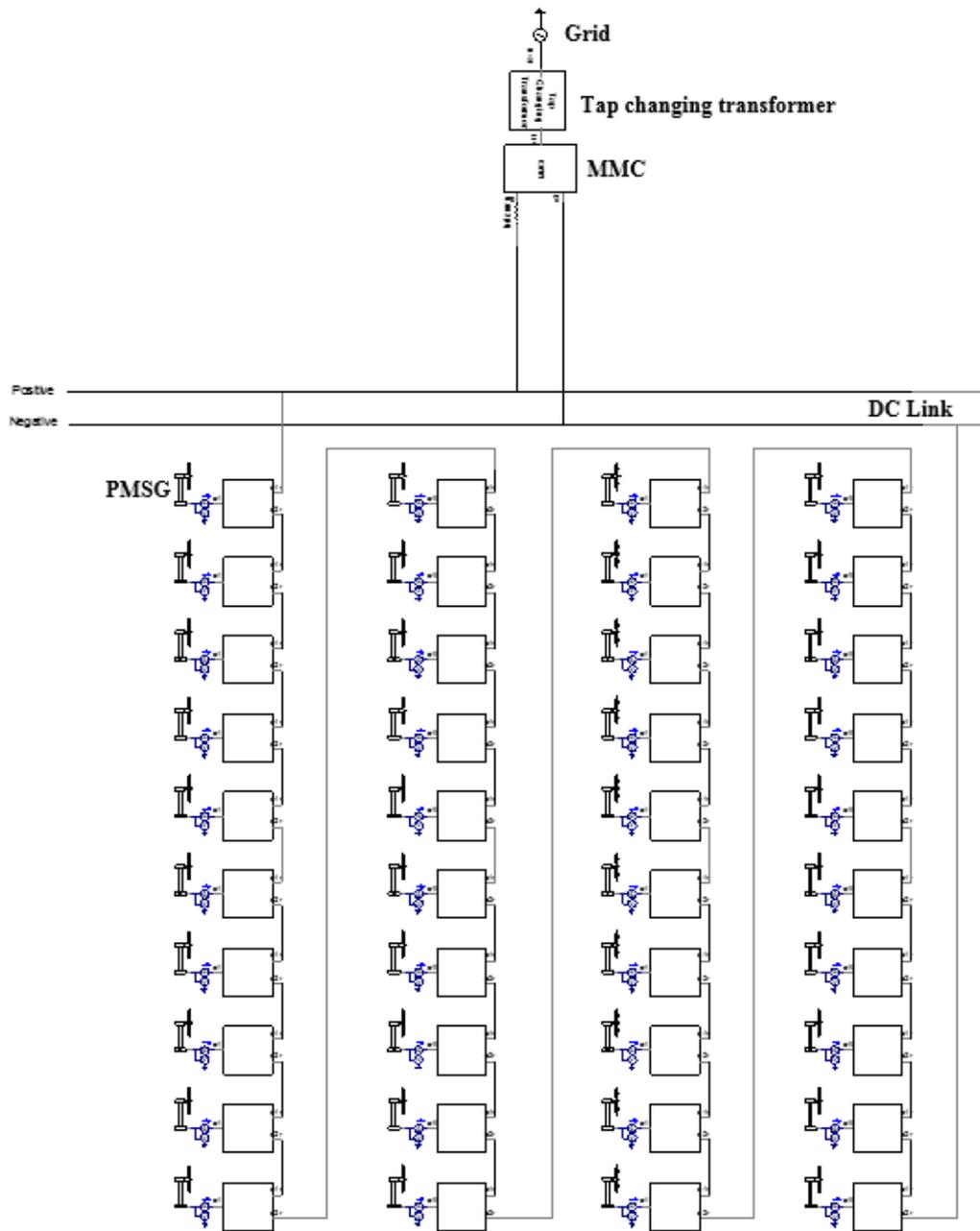


Fig. 17 Simulation model of 120MW DC series connected wind farm in PSCAD/EMTDC

2장의 제어이론을 바탕으로 그림 17과 같이 3 MW PMSG를 40대로 구성된 120 MW의 직류-직렬 연결 풍력발전단지를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다. 그림 16의 제안된 알고리즘처럼 40대의 풍력발전기를 기동 순서대로 5대씩 8개의 묶음으로 탭 절환 변압기를 통해 제어하였으며, 이를 통해 직류 링크 전압 또한 초기 20 kV부터 160 kV까지 순차적으로 8 레벨로 승압되도록 모델링하였다. 그림 17의 상세 모델링은 3.1.1-3.1.3에 기술하였다.

3.1.1 PMSG 모델링

그림 18은 PMSG의 컴퓨터 해석 모델을 나타내며, 구조는 그림 3과 같다. PMSG의 교류 출력은 Back to back 컨버터에 의해 직류로 변환 후 다시 교류로 변환되고, 탭 절환 변압기를 통과한 후 정류 다이오드에 의해 다시 직류로 변환된다. 직류 출력은 평활 콘덴서와 제동 저항에 병렬로 연결되고 타 PMSG와는 직렬로 연결된다. 이때 기존의 DC/DC 컨버터를 사용하였을 때와 차별점은 Bypass 스위치가 불필요하다. 차단기 또한 직류 측이 아닌 탭 절환 변압기의 2차 측에 설치하였으며, 이로 통해 고전압 직류 차단에 대한 기술적 부담을 해소시킬 수 있다.

탭 절환 변압기의 경우 컨버터 출력 측, 즉 1차 측은 고정된 탭을 사용하였으며, 2차 측에서 5단계 탭 절환이 이루어지도록 모델링 되었다. 따라서 1차 측의 일정한 입력 전압을 풍력발전기 기동에 따라 승압된 출력 전압을 5단계로 낮추도록 설계하였다. 사용된 PMSG의 파라미터는 표 1과 같다 [27].

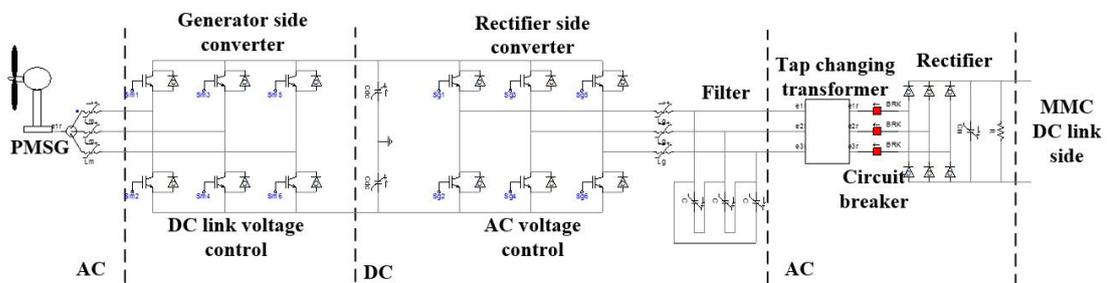


Fig. 18 Simulation model of PMSG in PSCAD/EMTDC

Table. 1 Parameters of PMSG

Quantity	Value
Rate power	3.0 MW
Rate voltage	1.0 kV
Frequency	10.0 Hz
Stator resistance	0.01 pu
d-axis reactance	1.0 pu
q-axis reactance	0.7 pu
Field Flux	1.4 pu

3.1.2 탭 절환 변압기 모델링

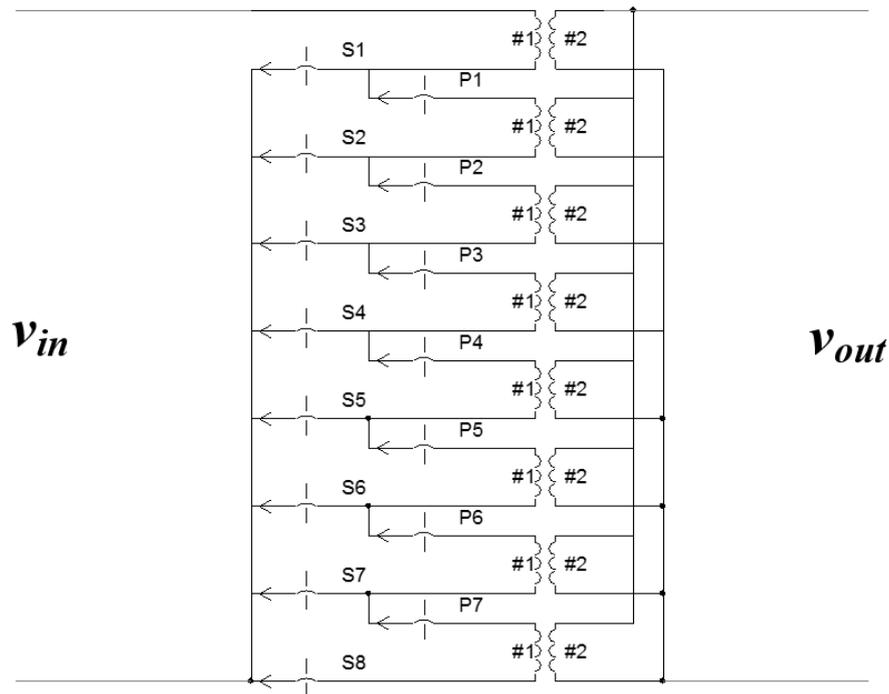


Fig. 19 Simulation model of MMC side single phase tap changing transformer in PSCAD/EMTDC

그림 19는 MMC 측 탭 절환 변압기의 PSCAD/EMTDC 모델을 나타내며, 3상 델타 결선 중 단상 부분만 나타내었다. 이때 탭 절환은 2.2장에서 기술하였듯이 트라이악 등 전력용 반도체 스위칭 소자를 사용하여 빠른 탭 절환이 가능하도록 실제 설계가 이루어지나, 본 논문에서는 컴퓨터 해석의 간소화를 위해 PSCAD/EMTDC Library의 스위치를 사용하여 모델링 하였다. 이때 MMC 측 탭 절환 변압기는 8단계로 탭을 구성하였으며, 그림 19와 같이 1차 측에서 탭 절환이 이루어져 단계적 가변 전압을 2차 측에서 계통 전압인 154 kV로 일정하게 유지시켜주는 역할을 한다.

스위칭 동작은 S_N 과 P_N 은 상보적으로 동작하며, P_N 과 S_{N+1} 은 항상 같이 동작하도록 설계하였다.

그림 20은 PMSG 측 탭 절환 변압기를 나타내며, 그림 19와 마찬가지로 3상 중 단상만 나타내었다. PMSG 측 탭 절환 변압기의 경우 MMC 측과 달리 2차측에서 탭 절환이 이루어지도록 설계하였다. 즉 일정한 1차 측 입력전압이 2차 측에서는 단계적으로 가변된 전압을 출력되도록 모델링하였다.

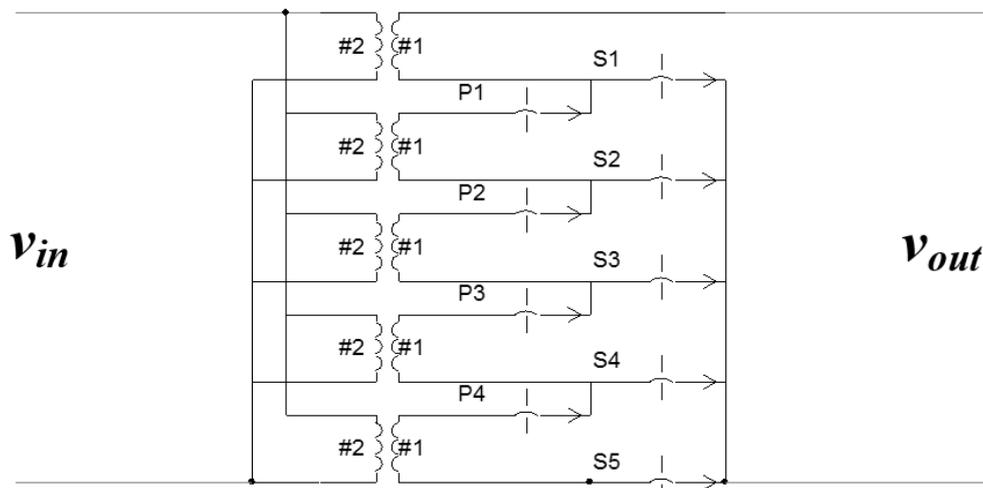
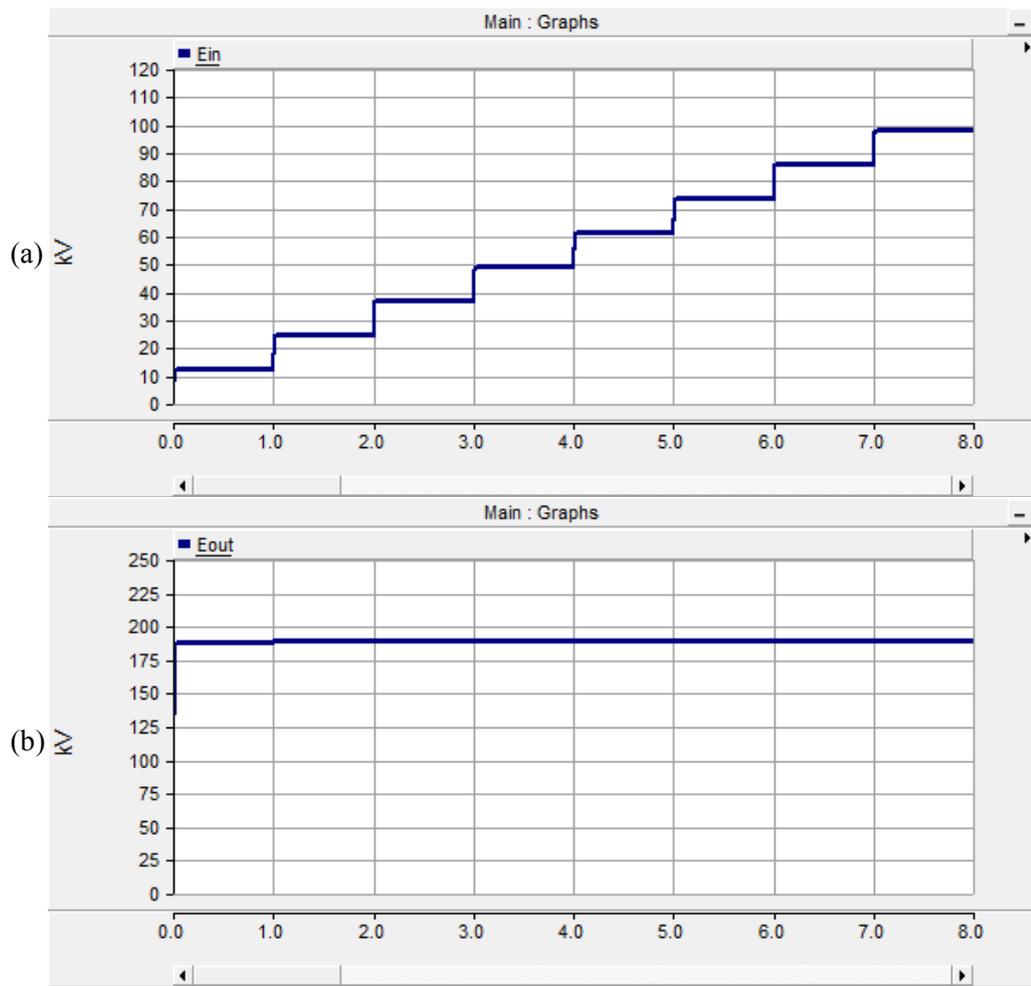


Fig. 20 Simulation model of PMSG side single phase tap changing transformer in PSCAD/EMTDC



(a) Input (b) Output

Fig. 21 Line to line RMS voltage of tap changing transformer

그림 21는 그림 19의 탭 절환 변압기에 대한 컴퓨터 해석 결과로 그림 21 (a)의 입력 전압이 단계적으로 증가하더라도 그림 21 (b)의 출력 전압이 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있다.

3.1.3 MMC 모델링

표 2는 앞서 기술된 MMC의 제어이론을 바탕으로 산정된 21 레벨 MMC의 파라미터를 나타낸다. 그림 22는 MMC의 PSCAD/EMTDC 컴퓨터 해석 모델을 나타내며, 2.3.1에 기술된 MMC의 제어부와 커패시터 전압 균등 제어를 기반으로 모델링 되었다.

Table. 2 Parameters of the 21 level MMC-HVDC

Quantity	Value
Active power	120 MW
Reactive power	90 MVar
Apparent Power	150 MVA
AC voltage	154 kV
Nominal frequency	60 Hz
Transformer ratio	154/Variable
DC link voltage	Variable
Number of submodules per arm	20
Arm inductance	9 mH
Submodule capacitance	2200 uF
Modulation method	Phase shift PWM
Modulation index	0.81

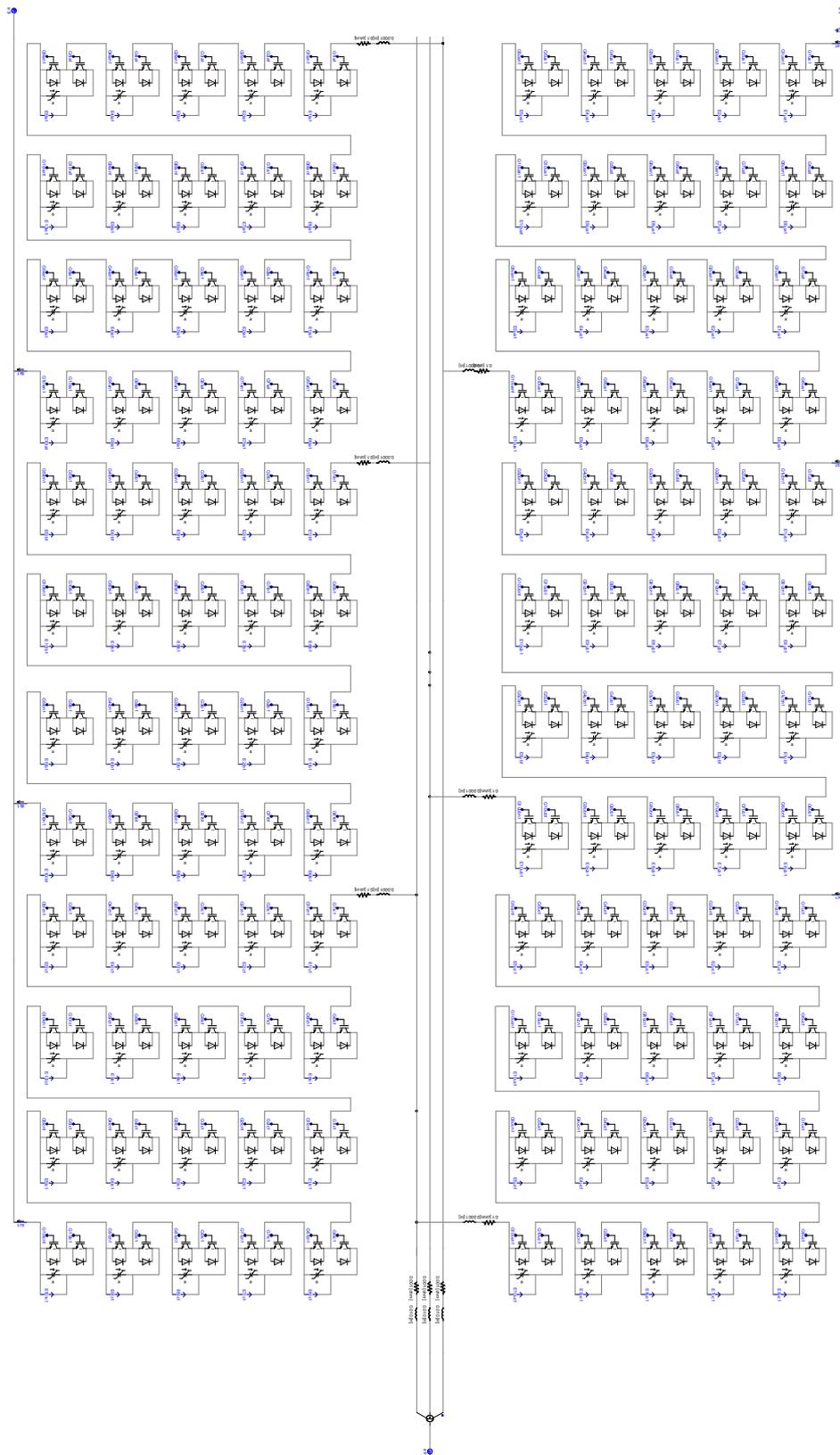


Fig. 22 Simulation model of MMC in PSCAD/EMTDC

3.2 컴퓨터 해석

위 모델링을 바탕으로 PMSG 1기와 MMC-HVDC를 도입하여 컴퓨터 해석한 결과는 그림 23-26과 같다. 그림 23은 PMSG의 직류 링크 전압으로 그림 26의 과란선과 같이 PMSG의 출력이 변화하여도 발전기 측 컨버터의 DC링크 제어로 인해 전압이 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 24는 PMSG의 변압기 2차 측 출력으로 그림 25의 MMC 직류 링크 전압을 20kV로 유지되는 것을 확인 할 수 있으며, 정류기 측 컨버터 제어로 인해 3상 전압이 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있다.

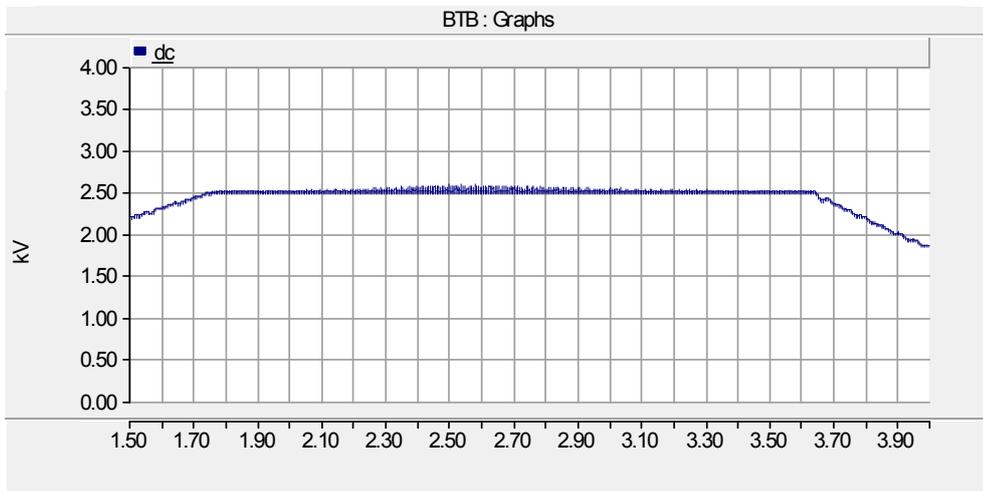


Fig. 23 DC link voltage of PMSG

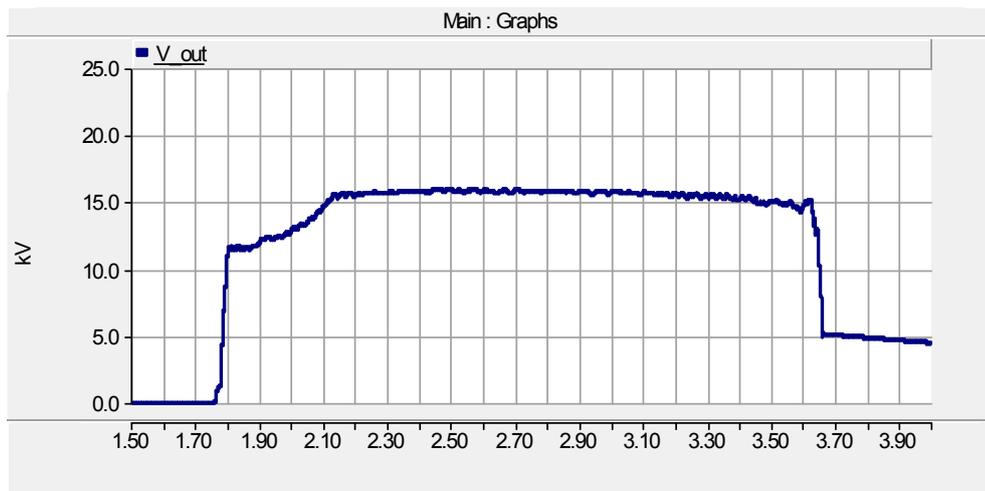


Fig. 24 Output line to line RMS voltage of PMSG

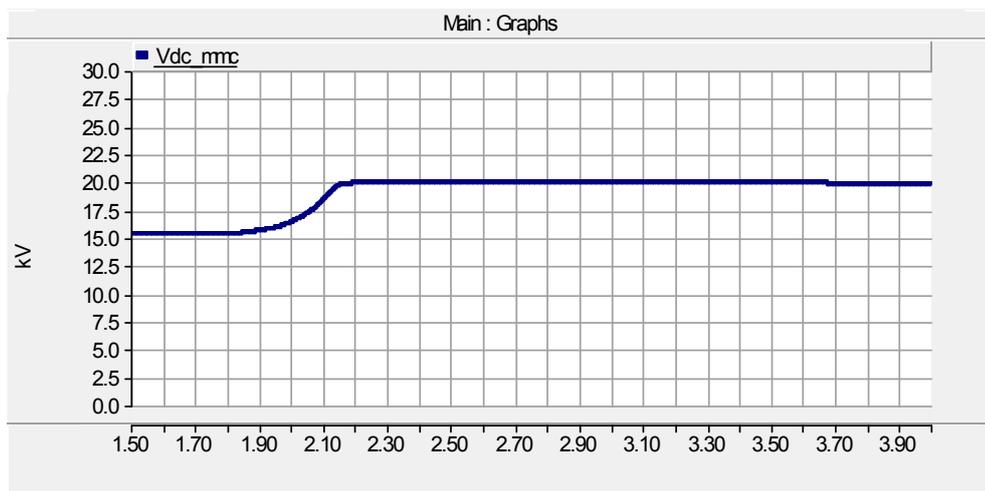
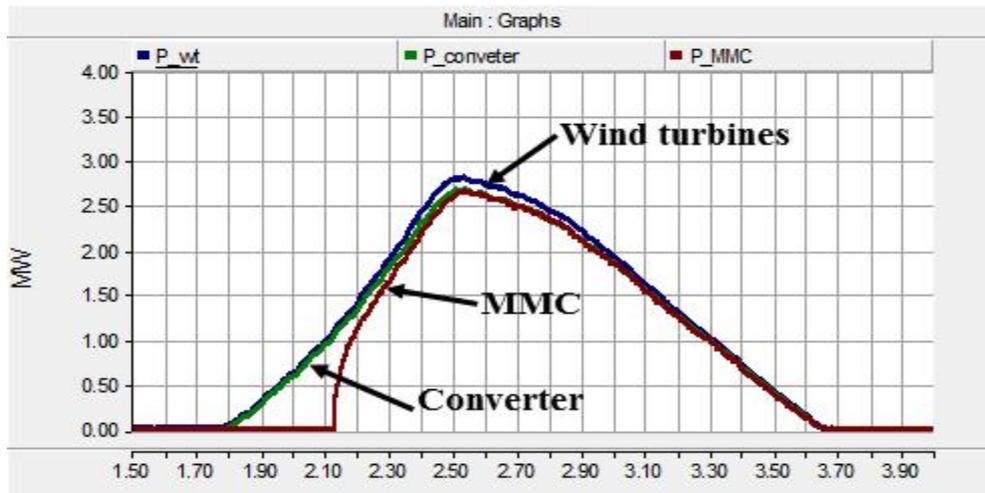


Fig. 25 DC link voltage of MMC



(Blue line : PMSG, Green line : Converter output, Red line : MMC output)

Fig. 26 Active power

그림 26은 PMSG 출력, PMSG 컨버터 출력, MMC 출력을 파란선, 초록선, 노란선으로 각각 나타낸다. MMC 출력의 경우 그림 25와 같이 직류 링크 전압 승압을 위해 출력이 지연되는 것을 확인 할 수 있으며, 링크전압이 20 kV에 도달한 후 PMSG의 모든 출력이 연계 순으로 전달되는 것을 확인 할 수 있다.

이를 바탕으로 제안된 알고리즘 적용된 직류-직렬 연결 풍력발전단지의 두 가지 운전 사례에 따른 타당성을 검증하였다.

3.2.1 직렬-연결 풍력발전단지의 순차적 운전

첫 번째 사례에서는 직류-직렬 연결 풍력발전단지에서 풍력발전기 1대씩 기동하여 정격인 120 MW까지 출력이 순차적으로 상승하도록 모델링하였다. 이때 각 풍력발전기의 동작은 순서에 상관없이 무작위로 이루어졌다. 첫 번째 시나리오는 제안된 알고리즘을 통하여 소수의 풍력발전기 기동 시 전력 전송뿐만 아니라 직류 링크 전압과 MMC 출력 전압이 안정적으로 가변되는 것을 확인하기 위해 모델링 되었다.

3.2.2 가변 풍속에 따른 풍력발전단지 운전

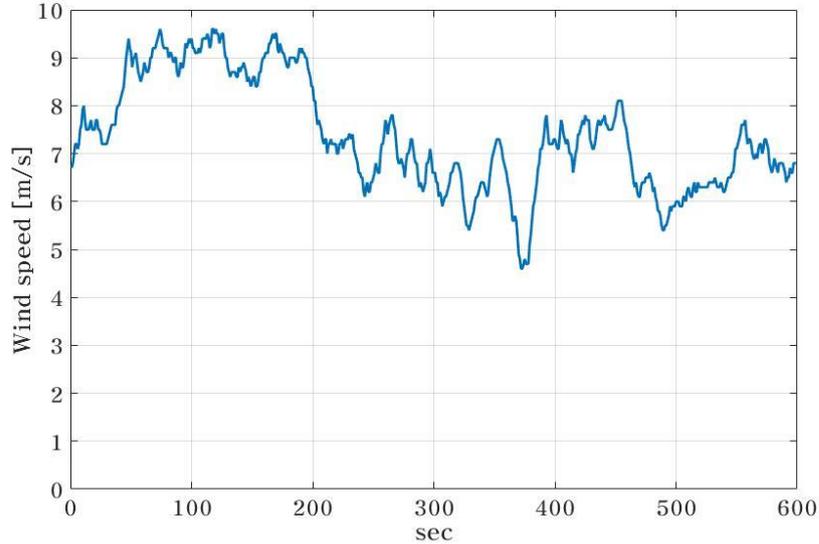


Fig. 27 Wind speed of Udo Island measured at 10m

두 번째 사례에서는 그림 27과 같은 2014년 제주 우도지역 10 m 높이에서 실측된 1초 단위의 풍속 데이터를 적용하여 가변 풍속에 따른 풍력발전단지의 동작을 확인하였다. 이때 기준 풍속의 경우 10 m 높이의 풍속을 식 (33)과 같은 베키 법칙을 사용하여 실제 3 MW 풍력발전기의 허브 높이와 같은 95 m의 풍속으로 환산하여 적용하였다[28].

$$V_z = V_h \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (33)$$

여기서, V_z : 지상 z 높이에서의 풍속

V_h : 지상 h 높이에서의 풍속

$1/n$: 베키지수

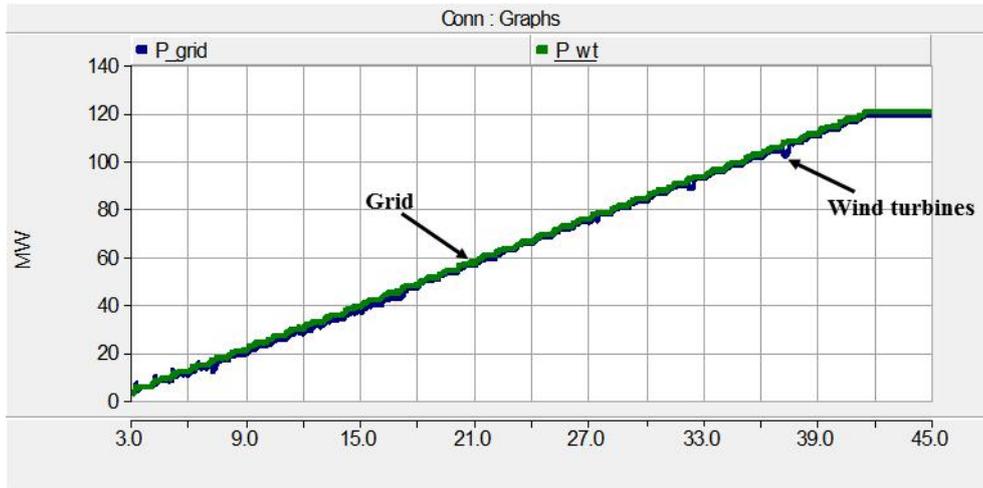
제안된 방법의 신뢰성 있는 검증을 위해 95 m로 환산된 기준 풍속을 기반으로 각 기준 데이터별 40개의 난수를 생성하여 기준 데이터와 최대 40% 오차가 난수에 비례하여 발생하도록 하였다. 따라서 각 40개의 풍력발전기 입력 풍속을 모두 달리하여 각 풍력발전기의 출력이 다르도록 하였으며, 두 번째 사례는 가변 출력에서 생산된 전력 전송과 직류 링크 전압의 변동을 확인하기 위해 모델링되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 컴퓨터 해석 결과

4.1.1 직렬 연결 풍력발전단기의 순차적 운전

그림 28은 첫 번째 사례에 대한 유효전력을 나타낸다. 이때 총 40개 구간으로 3 MW씩 출력이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 최종적으로 풍력발전단지 정격 용량인 120 MW에 도달하는 것을 확인할 수 있다.



(Green line : PMSG, Blue line : MMC)

Fig. 28 Active power of wind farm by step up operation

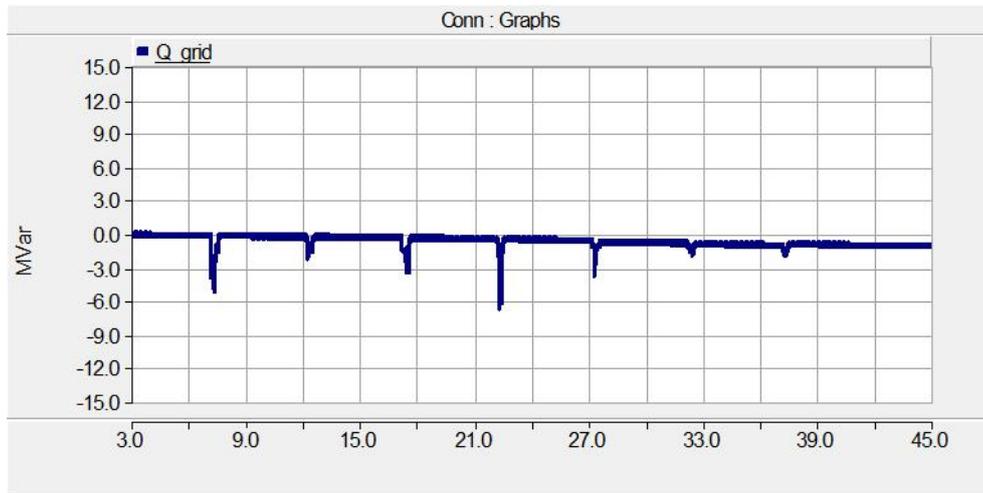


Fig. 29 Reactive power of wind farm by step up operation

그림 29는 풍력발전단지의 무효전력 출력을 나타내며, MMC의 직류링크가 승압되는 구간에서 다소 흔들리는 경향이 있었으나, 지령값은 0으로 단 시간 내에 회복하는 것을 확인 할 수 있다.

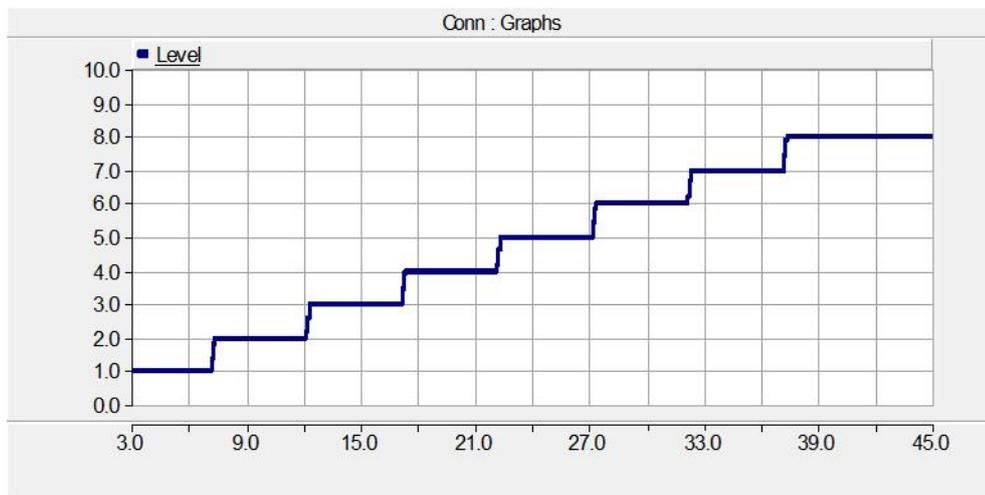


Fig. 30 System control level by step up operation

그림 30은 제안된 알고리즘 따라 증가하는 레벨을 나타낸다. 그림 28에서 풍력발전기 5대가 기동하는 순간, 즉 15 MW 출력을 보내는 지점에서 레벨이 1단계씩 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

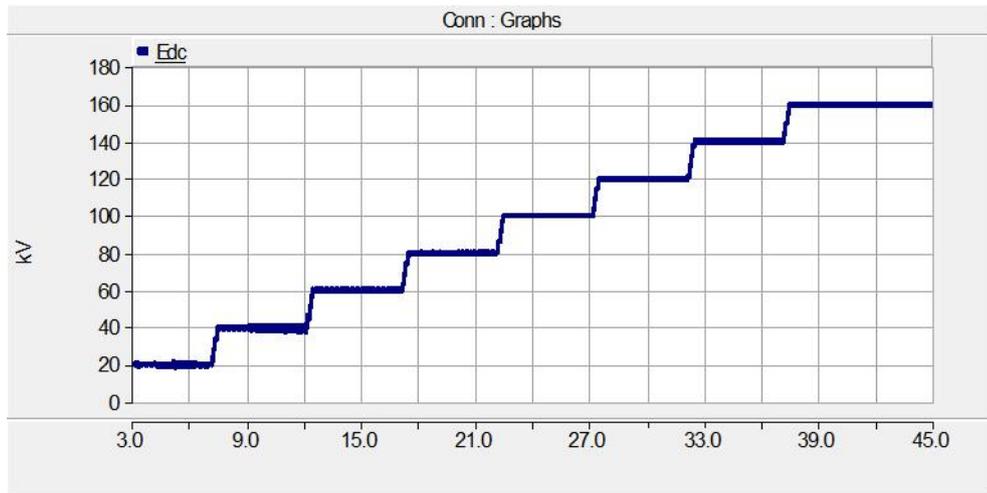


Fig. 31 DC link voltage of MMC by step up operation

그림 31은 MMC의 직류 링크 전압으로 그림 24의 레벨이 증가할 때 마다, 즉 풍력발전기가 5대 씩 기동할 때마다 20 kV씩 증가되는 것을 확인 할 수 있다. 이때 MMC 출력 전압은 그림 32와 같으며, 출력 전압 역시 레벨 수에 따라 변압기 탭 조정을 통해 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

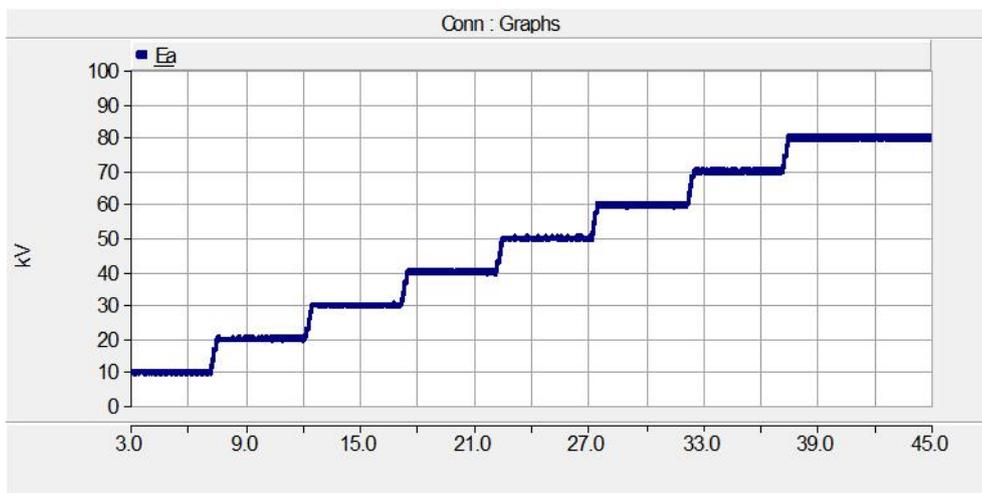


Fig. 32 Output line to line voltage of MMC by step up operation

그림 33은 27초 때에 MMC 출력 상전압을 나타내며, 그림 34는 전류를 나타낸다. 그림 33과 34로 비교하였을 때 동상으로 무효전력 제어가 원활하게 이루어지는 것으로 확인할 수 있다.

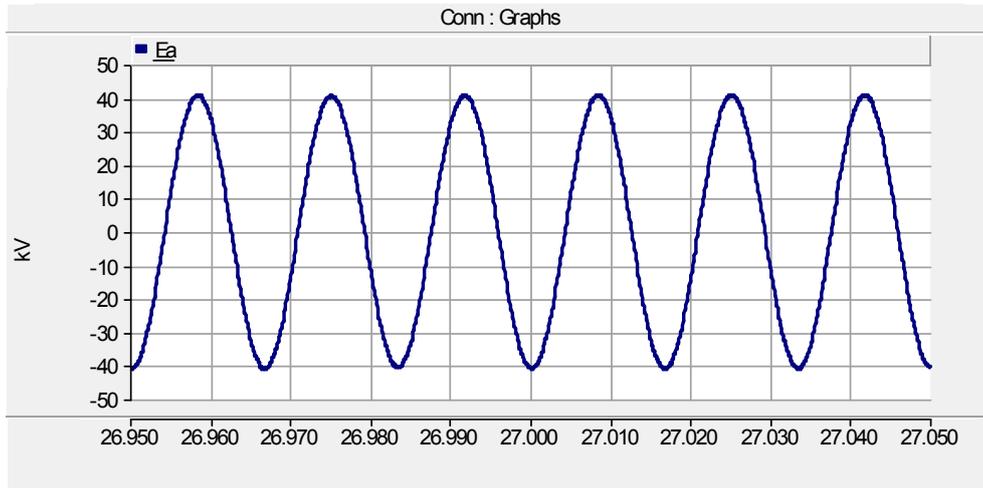


Fig. 33 Output phase voltage of MMC at 27 s

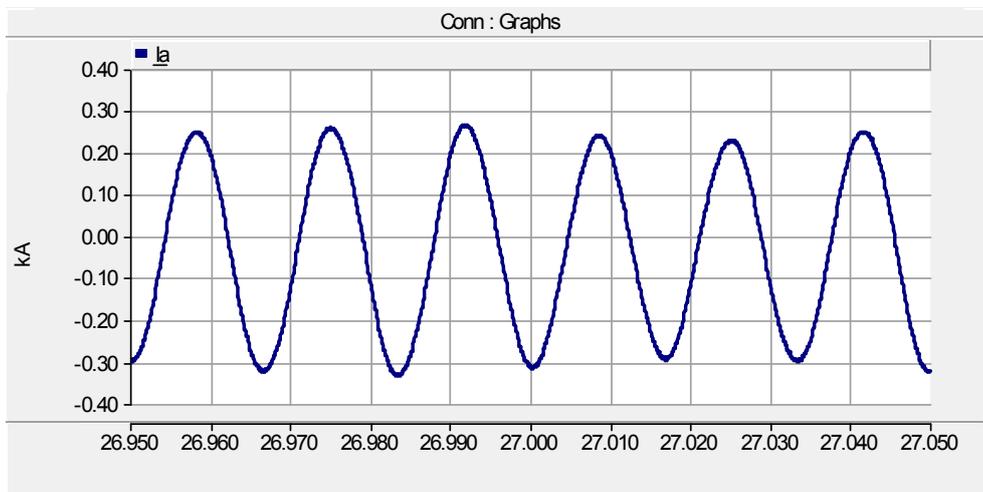
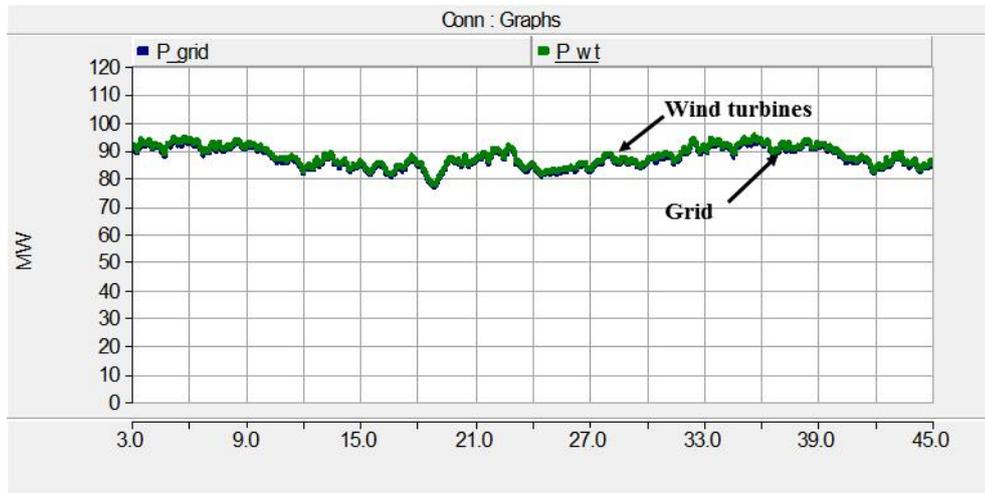


Fig. 34 Output current of MMC at 27 s

4.1.2 가변 풍속에 따른 풍력발전단지 운전



(Green line : PMSG, Blue line : MMC)

Fig. 35 Active power of wind farm in variable wind speed

그림 35는 두 번째 사례에 대한 유효 전력 파형이며, 각 풍력발전기의 출력의 합은 초록선으로, 계통 측에 전달된 유효전력은 파란선으로 나타내었다. 이때 각 풍력발전기의 출력이 다름과 동시에 풍속에 의해 유효전력이 변동함에도 불구하고 풍력발전기의 출력이 계통 측으로 안정적으로 전달되는 것을 확인 할 수 있다.

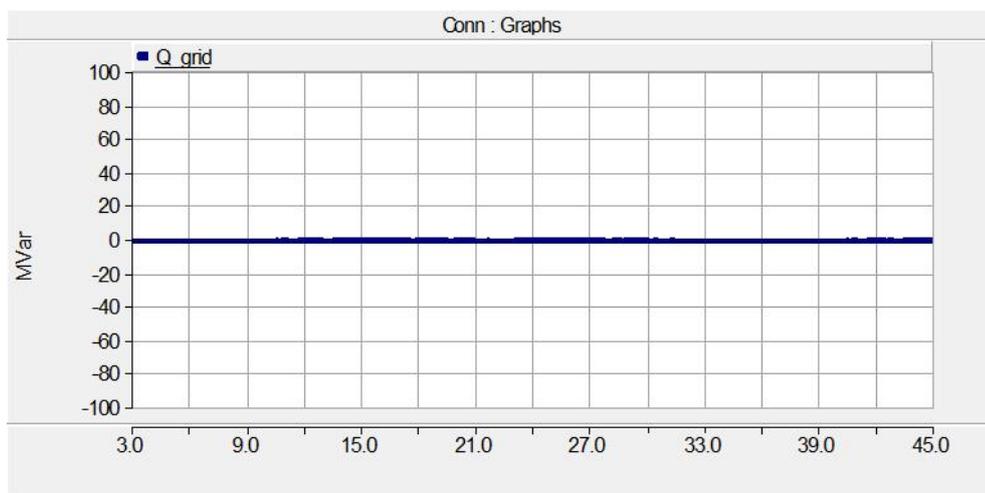


Fig. 36 Reactive power of wind farm in variable wind speed

그림 36은 두 번째 사례에 대한 무효 전력을 나타내며 풍력발전기 출력 변동에도 불구하고 MMC의 무효전력 제어를 통해 무효전력이 지령치인 0 MVar를 안정적으로 추종하는 것을 확인 할 수 있다.

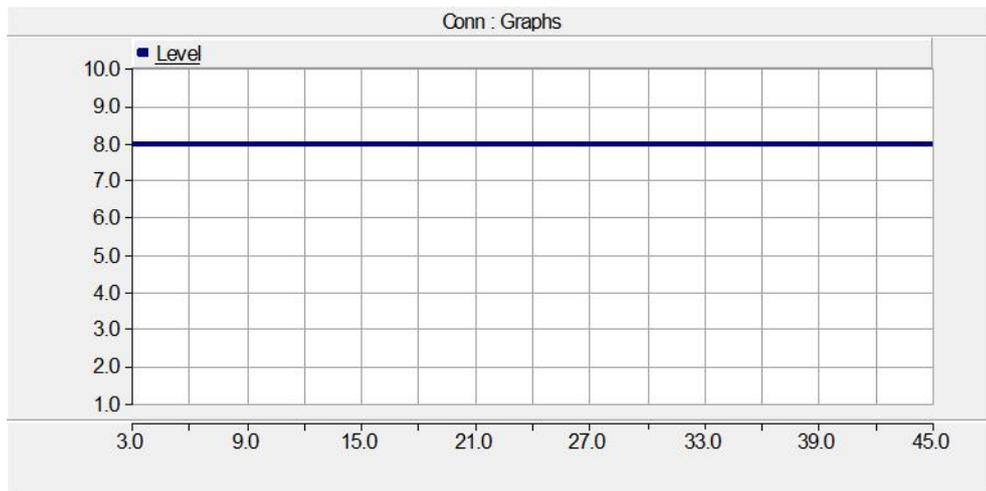


Fig. 37 System control level in variable wind speed

그림 37은 제안된 알고리즘의 레벨을 나타낸다. 이때 모든 풍력발전기가 가동중에 있으므로 레벨은 최대인 8을 계속 기록하는 것을 확인 할 수 있다.

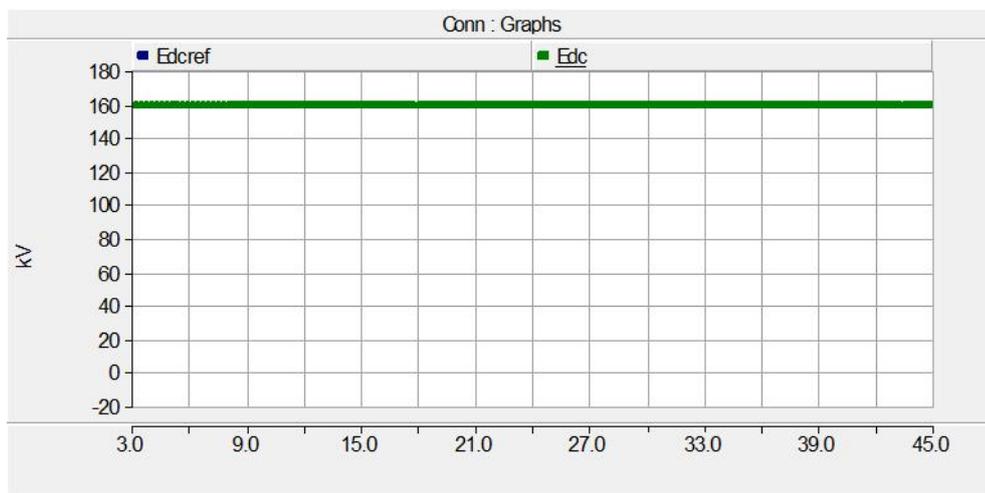


Fig. 38 DC link voltage of MMC in variable wind speed

그림 38은 MMC의 직류 링크 전압을 나타낸다. 이때 풍력 출력의 변동에도 불구하고 제안된 알고리즘의 동작으로 인해 직류 링크 전압은 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 39은 MMC의 출력 전압으로 직류 링크 전압이 일정하기 때문에 MMC의 출력 전압도 안정적으로 제어되는 것을 확인 할 수 있다.

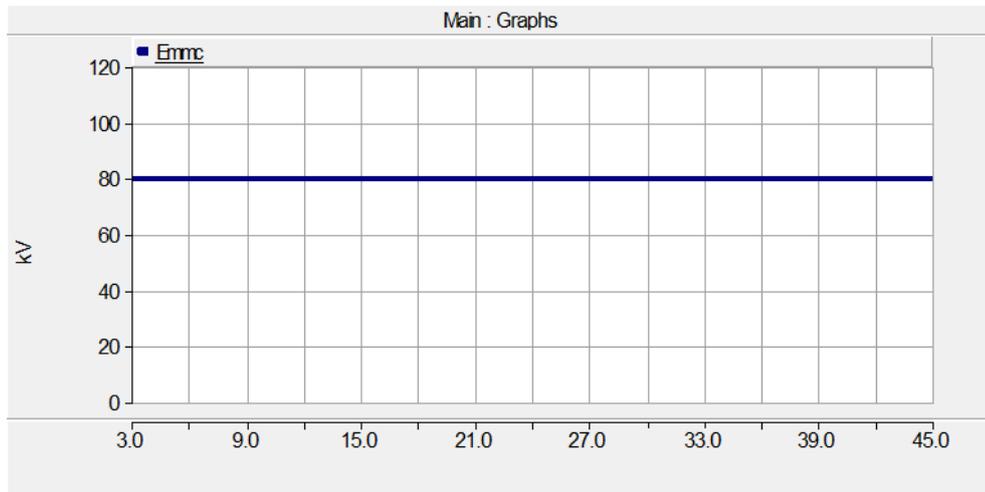


Fig. 39 Output line to line voltage of MMC in variable wind speed

그림 40은 27초 때에 MMC 출력 상전압을 나타내며, 그림 41은 전류를 나타낸다. 그림 40과 41로 비교하였을 때 동상으로 무효전력 제어가 원활하게 이루어지는 것으로 확인할 수 있다.

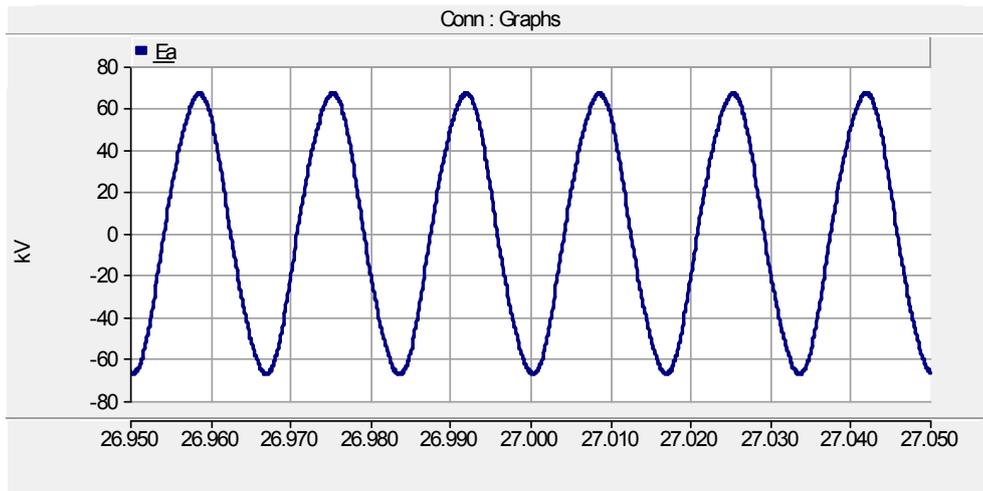


Fig. 40 Output phase voltage of MMC at 27 s

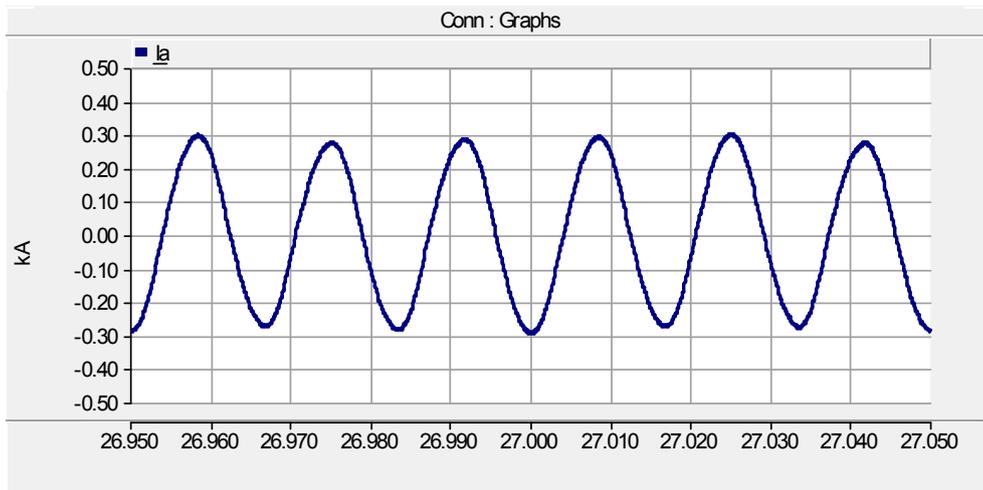


Fig. 41 Output current of MMC at 27 s

4.2 결과 고찰

두 가지 사례를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증한 결과, 첫 번째 사례에서 풍력발전기의 기동에 관계없이 생산된 전력이 원활히 계통 측으로 전달되는 것을 확인하였으며, 직류 링크 전압과 MMC 출력 교류 전압 또한 안정적으로 가변되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 레벨이 증가하는 순간, 즉 직류 링크와 MMC 출력 전압이 승압되는 순간에 무효 전력이 최대 -6.5 MVar 까지 변동되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 MMC의 제어기를 포함한 모든 설계가 120 MW 용량에 맞추어 설계되어 순간적인 승압 시 순간적인 무효전력 변동이 발생된 것으로 사료된다. 이러한 무효전력 변동은 직류 링크 전압 승압 시에 적응 제어 알고리즘을 도입하여 개선 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

두 번째 사례에서 역시 가변 출력에 대한 전력 전송이 원활이 이루어 지는 것을 확인할 수 있었다. 이때 40대의 풍력발전기가 모두 기동하여 레벨이 8단계로 일정하게 유지되기 때문에, 직류 링크전압과 MMC 출력 전압 모두 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 해상 풍력발전단지의 해상 변전소 플랫폼을 제거할 수 있는 직류-직렬로 연결되는 풍력발전단지의 계통 연계를 위해, 채용되는 MMC의 직류 링크 가변 전압 제어를 통해 단위용량 3 MW를 갖는 PMSG형 풍력발전기가 40기가 연계된 120 MW 용량의 모델 단지에 적용하여 제안한 알고리즘을 PSCAD/EMTDC 프로그램으로 컴퓨터 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 단 1대의 풍력발전기부터 풍력발전단지 정격 출력까지 순차적으로 기동하더라도 가변 직류 링크 전압 제어가 제안한 방법으로 잘 되어 모든 출력 전달이 안정적으로 전달되는 것을 확인 할 수 있었다.
- (2) 40대의 모든 풍력발전기에 각각 다른 풍속을 입력으로 사용하여 각 발전기의 출력을 달리 하였으나, 제안된 알고리즘의 운용으로 MMC의 직류 링크 전압이 안정적으로 유지되고 출력 전력 또한 안정적으로 전달되는 것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 제안된 방법을 이용하여 두가지 사례를 통해 탭 절환 변압기를 사용한 직류 직렬 풍력발전단지의 안정적 전력 전송여부에 대해 검증한 결과 해상 MMC 플랫폼이 없음에도 불구하고 풍력발전 출력이 계통 측으로 원활히 전달되어 풍력발전기 측 삼상 정류기와 탭 절환 변압기의 설치로 해상 플랫폼의 설치와 운영 비용이 절약 가능한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 향후 대규모 해상 풍력발전단지 운용에 제안된 가변 직류 링크 운용 알고리즘을 도입한다면, 해상 플랫폼의 제거에도 불구하고 안정적인 전력전송이 가능할 것으로 판단된다. 또한 직류 링크의 가변적인 운용으로 각 풍력발전기 절연 레벨을 낮출 수 있어 이는 설비의 비용 감축 뿐만 아니라 설비 내 이격거리 또한 감소 시킬 수 있기 때문에 향후 해상풍력발전단지 도입 시 경제성 확보에 이바지 할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Thanh Hai Nguyen and Dong-Choon Lee, "A Series-Connected Topology of a Diode Rectifier and a Voltage-Source Converter for an HVDC Transmission System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 1579-1584, April, 2014
- [2] Tor Martin Iversen, "Multilevel Converter for a 10MW, 100kV Transformer-less Offshore Wind Generator System," Norwegian University of Science and Technology, Thesis for the degree of Master, June, 2012
- [3] Navid Ghardash Khani, Mehrdad Abedi, Gevorg B. Gharehpetian and Gholam Hosein Riahy, "Offshore Wind Farm Power Control Using HVdc Link," Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 39, no. 2, pp. 168-173, 2014
- [4] Amir Parastar and Jul-Ki Seok, "High-Power-Density Power Conversion System for HVDC-Connected Offshore Wind Farms," Journal of Power Electronics, vol. 13, no. 5, pp. 737-745, September, 2013
- [5] G. Shi, X. Cai, C. Sun, Y. Chang and R. Yang, "All-DC Offshore Wind Farm with Parallel Connection : An Overview," AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), 12th IET International Conference, May, 2016
- [6] K. Musasa, M. N. Gitau and R. C. Bansal, "Comparative Analysis of DC Collection Grid Based Power Converter Topologies for Offshore Wind Farm," International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), October, 2015
- [7] Gregory F. Reed, Hashim A. Al Hassan, Matthew J. Korytowski, Patrick T. Lewis and Brandon M. Grainger, "Comparison of HVAC and HVDC Solutions for Offshore Wind Farms with a Procedure for System Economic Evaluation," 2013 IEEE Energytech, 2013
- [8] Marco Liserre, Roberto Cardenas, Marta Molinas and Jose Rodriguez,

- “Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1081-1095, April, 2011
- [9] Mihhail Alifanov, “Power Electronics design of a Multi MW dc/dc Converter,” Chalmers University of Technology, Thesis for the degree of Master, 2013
- [10] Trondheim, “Analysis and Control of a Modular Series Connected Converter for a Transformerless Offshore Wind Turbine,” Norwegian University of Science and Technology, Thesis for the degree of Ph.D, October, 2013
- [11] Haibo Zhang, Diana Florez, Christophe Saudemont and Francois Gruson, “Control Strategies of a DC based Offshore Wind Farm with Series connected Collection Grid,” 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 2016
- [12] Etienne Veilleux and Peter W. Lehn, “Interconnection of Direct-Drive Wind Turbines Using a Series-Connected DC Grid,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 1, pp. 139-149, January, 2014
- [13] Shivam and Ratna Dahiya, “An Approach to Reduce the Fluctuation of HVDC Link Current in Series Connected Wind Turbines,” 2015 International Conference on Energy, Power and Environment : Towards Sustainable Growth (ICEPE), 2015
- [14] Jae Ik Yoo, Jaewoo Kim and Jung-Wook Park, “Converter Control of PMSG Wind Turbine System for Inertia-Free Stand-Alone Microgrid,” 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. , October. 2016
- [15] Gautham Ram Chandra Mouli, Pavol Bauer, Thiwanka Wijekoon and Ara Panosyan, “Design of a Triac OLTC for Grid Voltage Regulation,” 2013 IEEE. vol.2, no.4, Issue.6, pp. 2277-7970, December. 2012
- [16] A. Lesnicar and R. Marquardt, “An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range,” Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, vol. 3, June. 2003
- [17] K. Ilves, S. Norrga, L. Harnefors, and H.-P. Nee, “Analysis of arm current harmonics in modular multilevel converters with main-circuit filters,” 2012 9th

- International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD), pp. 1-6, March. 2012
- [18] K. Ilves, A. Antonopoulos, S. Norrga, and H.-P. Nee, "Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 57-68, January. 2012
- [19] Q. Song, W. Liu, X. Li, H. Rao, S. Xu, and L. Li "A steady-state analysis method for a modular multilevel converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 3702-3713, August. 2013
- [20] Y. Zhang, G.P Adam, T.C. Lim, Stephen J. Finney and B.W. Williams, "Analysis and Experiment Validation of a Threelevel Modular Multilevel Converters," 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia, 2011
- [21] Q. Tu, Z. Xu, Y. Chang, and L. Guan, "Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1332-1338, July. 2012
- [22] M. Guam and Z. Xu, "Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 12, pp. 4858-4867, December. 2012
- [23] B. R. Andersen, L. Xu, P. J. Horton, and P. Cartwright, "Topologies for VSC transmission," *Power Engineering Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 142-150, June. 2002
- [24] M. P. Bahrman, "HVDC transmission overview," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D*, pp. 1-7, April. 2008
- [25] Y. Li, L. Luo, C. Rehtanz, S. Ruberg, and F. Liu, "Realization of reactive power compensation near the LCC-HVDC converter bridges by means of an inductive filtering method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3908-3923, September. 2012

- [26] S. Rohner, S. Bernet, M. Hiller, and R. Sommer, "Modulation, losses, and semiconductor requirements of modular multilevel converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2633-2642, August. 2010
- [27] S. M. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata and J. Tamura, "Multi-Converter Operation of Variable Speed Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator during Network Fault," International Conference on Electrical Machines and System 2009 (ICEMS 2009), November. 2009
- [28] J. S. Rohatgi and V. Nelson, "Wind Characteristics," Alternative Energy Institute, Wese Texas A&M University, pp. 172-173, 1994

감사의 글

4학년 2학기 때에 얼떨결에 결심하여 시작한 석사과정 생활이 뒤돌아보니 너무 빠르게 지나갔고 너무나 많은 일들이 있었습니다. 3년간 연구실에서 생활하며 전공 뿐만 아니라 삶에 필요한 너무나도 많은 것을 느끼고 배우게 되었고 이에 논문에 마지막 장으로 지난 3년 간의 고마움을 표현하고자 합니다.

먼저, 제 삶에서 가장 큰 가르침을 주신 김일환 교수님께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 저의 박사과정 진학의 결심은 다른 이유가 아닌 교수님께 더 많은 가르침을 받고 싶어서입니다.

그리고 항상 좋은 말씀해주시고, 아낌없는 조언을 해주신 전기공학과와 의 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 김세호 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님, 진영규 교수님 너무나도 감사합니다.

정말 자랑스럽고, 항상 든든한 버팀목이 되주시는 재홍이형, 진홍이형, 대현이형, 명석이형, 승현이형, 왓나우덩형, 경민이형, 동완이형, 지한이형, 도현이형, 승민이 전력전자 연구실 선배님들 감사합니다.

또한 본 업이 있음에도 불구하고 연구실 일에 내 일처럼 도와주신 산업대학원 윤태섭 차장님과 살아가는데 중요한 것들을 정말 많이 가르쳐 주신 상현이형, 전기공학과 평강이형, 상호, 태형이에게도 감사의 말씀을 전하고 싶고 처음과 끝을 함께한 동기 승용이에게도 수고했다는 말을 전하고 싶습니다. 초진도 응용기기 연구실의 창주, 레탄등형, 후릉형, 그리고 저의 멘토 지형이형 너무 고맙습니다.

연구실에서 동거동락하고 있는 양승무 박사님, 김아선 연구원님, 성훈이, 기훈이에게 고맙다는 말을 하고 싶고 졸업 논문 작성을 핑계로 소홀해진 연구실 일에 많은 도움을 준 민혁이에게 든든하게 잘해준 덕분에 형이 논문에만 매진할 수 있었다는 말을 하고 싶습니다.

그리고 정신없이 살아 술 한잔 함께 먹기 힘들어진 친구가 되어버려 미안하다는 말을 내 죽마고우 수호에게 전하고 싶습니다.

아들을 끝까지 믿어주신 우리 부모님에게 정말 최고의 부모님이시고 최고의 아들이 되겠다고 말을 전하고 하고 싶습니다. 아프신 할머니 빨리 나아지시길 손주

가 매일 기도하고 있습니다. 투병 중이신 장인어른, 옆에서 보필하시는 장모님
조금만 더 힘내셨으면 합니다.

마지막으로 매일 약속 안 지키는 남편과 같이 살아주는 나의 아내 이동연에게
도 고맙고 사랑한다는 말을 전하며, 나의 분신 같은 아들 범규에게 멋진 아빠가
되겠다는 다짐으로 이 글을 마칩니다.

2017년 7월 1일

채상헌 드림