

# HVRT 기능 요구조건을 만족하는 Type 4 풍력 발전기의 효율적인 직류단 전압 설계

## The efficient DC-link voltage design of the Type 4 wind turbine that satisfies HVRT function requirements

백 승 혁\*, 김 성 민\*★

Seung-Hyuk Baek\*, Sungmin Kim\*★

### Abstract

This paper proposes the DC-link voltage design method of Type 4 wind turbine that minimizes power loss and satisfies the High Voltage Ride Through(HVRT) function requirements of the transmission system operator. The Type 4 wind turbine used for large-capacity offshore wind turbine consists of the Back-to-Back converter in which the converter linked to the power grid and the inverter linked to the wind turbine share the DC-link. When the grid high voltage fault occurs in the Type 4 wind turbine, if the DC-link voltage is insufficient compared to the fault voltage level, the current controller of the grid-side converter can't operate smoothly due to over modulation. Therefore, to satisfy the HVRT function, the DC-link voltage should be designed based on the voltage level of high voltage fault. However, steady-state switching losses increase further as the DC-link voltage increases. Therefore, the considerations should be included for the loss to be increased when the DC-link voltage is designed significantly. In this paper, the design method for the DC-link voltage considered the fault voltage level and the loss is explained, and the validity of the proposed design method is verified through the HVRT function simulation based on the PSCAD model of the 2MVA Type 4 wind turbine.

### 요 약

본 논문에서는 계통망 사업자의 High Voltage Ride-Through(HVRT) 기능 요구조건을 만족하며, 정상상태에서의 손실을 최소화할 수 있는 Type 4 풍력발전기의 직류단 전압 설계 방법을 제안한다. 대용량 해상 풍력 발전에 사용되는 Type 4 풍력 발전기는 전력 계통과 연계된 컨버터와 풍력 발전기와 연계된 컨버터가 직류단을 공유하는 Back-to-Back 컨버터 형태이다. Type 4 풍력발전기에서 HVRT 조건인 계통 고전압 사고가 발생한 경우 사고 전압 크기에 비해 직류단 전압이 부족하다면 과변조로 인해 계통측 컨버터의 전류 제어가 원활하게 동작되지 못한다. 따라서 HVRT 기능을 만족하기 위해서는 고전압 사고의 전압 크기를 기준으로 직류단 전압을 설계해야 한다. 그러나 직류단 전압의 크기의 증가는 정상상태에서의 컨버터 손실 증가를 야기하므로, 직류단 전압을 크게 설계하였을 때 증가될 손실에 대한 고려가 포함되어야 한다. 본 논문에서는 사고 전압의 크기와 발생 손실이 고려된 직류단 전압을 설계하는 방법에 대해 설명하고, 제안하는 설계 방법의 타당성을 2MVA급 Type 4 풍력발전기의 PSCAD 모델 기반 HVRT 기능 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

*Key words* : Grid code, Grid connected wind turbines, Type 4 wind turbine, High Voltage Ride-Through (HVRT), Back-to-Back converter

\* Dept. of Electronics Engineering, Hanyang University, ERICA Campus

\*\* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang University

★ Corresponding author

E-mail : ksminmoon@hanyang.ac.kr, Tel : +82-31-400-5172

※ Acknowledgment

This research was funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy, and supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) (Grant No. 20193010025790)

Manuscript received Jun. 1, 2021; revised Jun. 22, 2021; accepted Jun. 29, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

전 세계적 이슈로 대두되고 있는 탄소 배출량 축소를 위한 화석연료의 사용 감축 정책에 따라 태양광, 풍력 등의 재생 에너지를 이용한 분산전원의 부하 부담이 확대되는 추세이다. 국내외 계통망 사업자는 계통 연계형 분산전원 증가에 따른 기존 계통망의 안정성 보장을 위하여 여러 요구 조건을 계통 연계 규정에 명시하고 있으며 이를 지속적으로 개정하고 있다[1]. 국내외의 계통 연계 규정에서 필수적으로 요구하는 기능 중 하나인 Fault Ride-Through (FRT)는 계통에서 사고가 발생한 경우 재생 에너지 지원을 전력 계통으로부터 제거하는 것이 아니라 발생하는 사고 전압 크기 또는 주파수 변동 등에 따라 일정 시간 계통 연계를 유지하는 기능을 말한다. FRT의 요구 기능 중 전압 사고에 대한 항목은 계통 저전압 사고에 대한 연계 유지 기능인 Low Voltage Ride-Through(LVRT)와 고전압 사고에 따른 계통 연계 유지 기능인 High Voltage Ride-Through(HVRT)로 나뉜다. 전력변환장치가 포함된 태양광 또는 풍력발전기 등은 전력 계통 전압에 저전압 혹은 고전압 사고가 발생하였을 때, 전력 계통의 안정화를 돕기 위해 무효전류를 추가적으로 주입해야하는 조건이 명시되어 있다.

그림 1-a)은 미국 서부 전력협회(WECC)에서 풍력발전기의 발전기 형태 및 연결 구성에 따라 구분하고 있는 네 가지의 풍력 발전기 유형 중 Type 4 풍력 발전기의 구조를 나타낸다[2]. Type 4 풍력 발전기는 전력 계통과 풍력 발전기가 Back-to-Back 컨버터를 통해 연결되어 있는 구조로서 계통 사고 발생 시 발전기의 계통 연계를 유지하며 추가적인 무효 전류의 주입이 가능한 풍력 발전기의 유형이다.

Type 4 풍력 발전기의 경우 풍력 발전으로부터 발생하는 모든 전력이 Back-to-Back 컨버터를 통해 전력 계통으로 전달되므로 전체적인 전력 조류는 양측 컨버터가 공유하는 직류단 커패시터에 흐르는 전력을 통해 결정된다. 그림 1-b)는 Type 4 풍력발전기의 일반적인 제어구조를 나타낸다. 블레이드의 주속비, 피치각 등의 여러 조건으로 결정되는 풍력 발전기의 발전 가능 전력값은 인버터(발전기측) 제어기의 전력 지령값으로 입력된다.

인버터는 풍력 발전기에서 입력된 전력 지령 값의 전력을 발전시키기 위해 발전기의 전류를 제어한다. 인버터 제어를 통해 풍력 발전기에서 생성된 전력은 직류단 캐패시터로 전달되며, 직류단 캐패시터는 발전된 전력으로 인해 직류단 전압이 증가한다. 컨버터(계통측)는 직류단 전압을 일정하게 제어하도록 직류단 전압 제어를 수행한다. 인버터에서부터 공급되는 발전 전력이 캐패시터 전압을 증가시키기 때문에, 직류단 전압을 제어하는 컨버터는 인버터에서 공급되는 전력을 전력 계통으로 전달한다. 따라서, 풍력 발전기로부터 발생하는 모든 전력이 Back-to-Back 컨버터를 통해 전력 계통으로 전달되므로, Type 4 풍력발전기는 전력 전달이 자유로우며 계통 사고를 대처하기에 유연한 구조이다.

Type 4 풍력 발전기와 연결된 계통에서 LVRT 상황이 발생한 경우 계통 저전압에 의한 순간적인 출력 전력 감소로 인해, 직류단 전압이 상승하게 된다. 이를 방지하기 위한 방법으로 인버터로부터 출력되는 전력을 소비하는 DC 초퍼를 사용하거나 전압 변동에 따른 인버터의 지령을 감소시키는 등의 제어 방식이 사용된다[3]. 반면에 계통 전압이 증가하는 HVRT 조건의 경우 직류단 전압을 일정하게 유지하도록 동작하는 컨버터 전류제어기에서는 제어기 출력 지령 전압이 상승된 계통 전압만큼

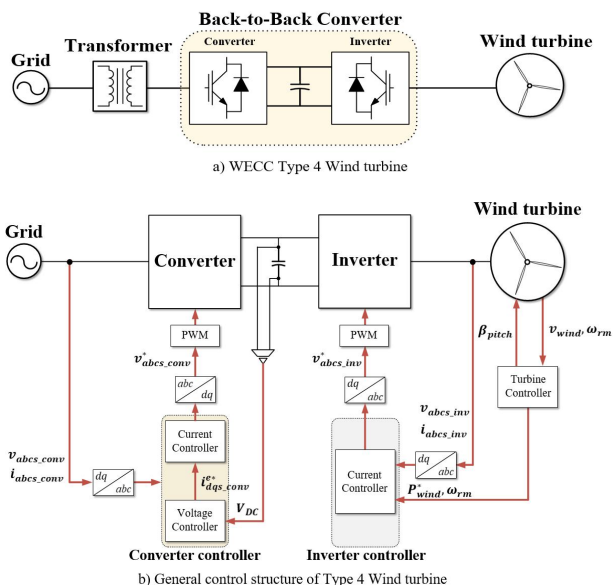


Fig. 1. WECC Type4 wind turbine and general control structure of Type4 wind turbine.

그림 1. WECC Type 4 풍력발전기와 Type 4 풍력발전기의 일반적인 제어 구조

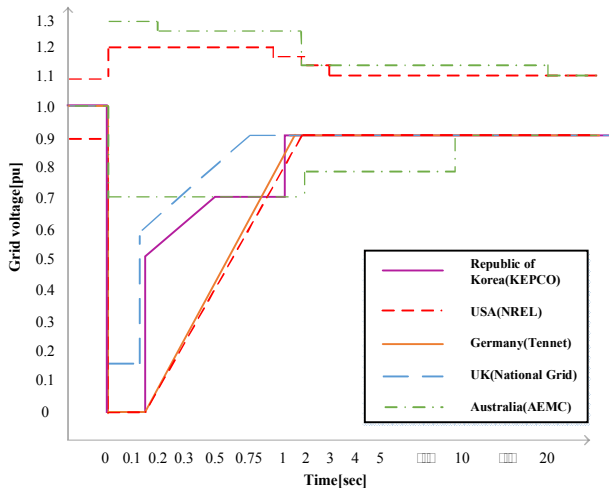


Fig. 2. LVRT/HVRT requirements in grid codes.  
그림 2. 계통연계규정에서 LVRT/HVRT 요구조건

증가하게 된다. 이 경우 컨버터에서 출력하도록 요구되는 전압에 비해 직류단 전압의 여유가 충분하지 못하면 컨버터의 과변조 현상이 나타나 컨버터의 전류 제어가 불가능하게 된다.

HVRT 기능은 전력 계통과 풍력발전기의 연계가 우선시 되어야 하므로 계통 사고 중에도 컨버터의 제어기가 원활하게 동작되어야 한다. 따라서 계통 고전압 사고에도 컨버터의 제어기가 원활하게 동작할 수 있도록 직류단 전압의 여유가 충분해야 한다. 그러나 계통 고전압 사고를 고려하여 직류단 전압의 여유를 높게 설계하는 경우 직류단 전압 크기가 증가함에 따라 커패시터의 열 손실과 인버터 및 컨버터 스위치의 스위칭 손실이 증가하므로 이에 대한 고려를 포함하는 직류단 전압 여유분의 설계가 필요하다.

본 논문에서는 Type 4 풍력발전기의 HVRT 기능 요구 조건을 만족하고 손실을 최소화하는 직류단 전압의 설계 방법을 제안한다. 제안하는 직류단 전압 설계 방법은 계통 고전압 사고에 따른 컨버터 전류제어기 지령 전압의 증가를 고려한 전압 여유와 HVRT 기능 요구 조건인 무효전류 주입에 대한 컨버터 출력단 필터의 전압 강하를 이용해 전류제어기의 지령 전압을 감소시켜 직류단 전압을 최소화하는 방법이다.

제안된 설계 방법의 타당성을 검증하기 위해 제안된 방법으로 설계된 직류단 전압을 2[MVA] 급 Type 4 풍력발전기에 적용하여, PSCAD 시뮬레이션 툴을 이용해 계통 고전압 사고에 대한 시뮬레이션 응답을 확인한다.

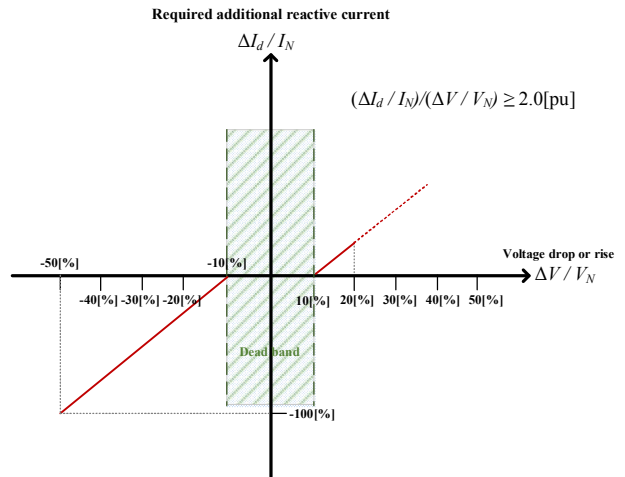


Fig. 3. Additional reactive current injection requirements when the voltage drop or rise.  
그림 3. 전압 변동에 따른 추가적인 무효전류 주입 조건

## II. 국내외 LVRT/HVRT 기능 요구조건

그림 2는 국내외 계통망 사업자가 요구하는 LVRT/HVRT 전압 프로파일을 나타낸다[4-8]. 전압 프로파일은 해당하는 사고 전압 크기에 따라 요구되는 계통 연계 유지 시간을 의미한다. 국내 계통망 사업자인 한국전력공사의 '19 송배전용 전기 설비 이용규정에서는 계통 연계형 분산전원에 대해 LVRT 기능을 요구하고 있으며, 0[pu]의 사고 전압 크기에 대해 150[ms]의 연계 유지 시간을 요구한다. 또한, 호주의 계통망 사업자인 Australian Energy Market Commission(AEMC)의 '19 National Electricity Rules Version 124에 명시된 HVRT 기능 요구 조건에서는 1.3[pu]의 전압 상승에 대하여 200[ms]의 연계 유지를 요구한다. 과거에는 지락, 단락 등으로 발생하는 계통 저전압 사고가 상대적으로 많이 발생하므로 LVRT 규정만 포함된 규정이 대부분이었으나, 최근 무효전력 보상장치의 증가로 인한 유도 부하 감소 기간 동안의 고전압 사고를 대비하여 HVRT 기능 요구도 더해지고 있는 추세이다.

그림 3은 계통 사고 발생 시 계통의 안정화를 위한 독일의 계통망 사업자인 Tennet의 추가적인 무효전류 주입 요구 조건 그래프이다. Dead band라고 표기된 0.9~1.1[pu]의 전압 변동률 영역을 제외한 전압 변동률에 대하여 추가적인 무효전류의 주입 요구를 나타낸다. 요구되는 무효전류의 크기는 식 (1)로 결정된다.

$$k = (\Delta I_d / I_N) / (\Delta V / V_N) \geq 2 [pu] \quad (1)$$

식 (1)에서  $\Delta I_d$ 는 무효전류의 변화량,  $I_N$ 은 공칭 전류,  $\Delta V$ 는 계통 전압의 변화량,  $V_N$ 은 공칭 전압을 나타내며,  $k$ 는 전압 변동률에 대한 무효전류 주입 비율을 의미한다. 따라서 계통 사고 발생 시 전압 변동 비율에 대한 무효전류 주입의 비율은 최소 2[pu]가 되어야 한다.

그림 3에 따르면 계통과 연계된 컨버터는 50[%]의 전압 강하가 발생한 경우 100[%] 정격전류 이상의 무효전류를 공급하며, 20[%] 전압 상승의 경우 40[%] 이상의 무효전류를 소비해야 한다. 이외에도 Tennesse의 계통 연계 규정에서는 필요한 경우 연계된 풍력발전기는 정격 전류보다 높은 무효전류를 주입이 가능해야 한다는 조건이 명시되어 있다[6].

### III. 제안하는 직류단 전압 설계 방법

2장에서 설명한 계통망 사업자들의 계통 연계 규정 중 가장 높은 사고 전압에 대해 HVRT 기능이 요구되는 규정은 호주 계통망 사업자인 AMEC의 규정이다. AMEC의 가장 높은 사고 전압의 요구 조건은 1.3[pu]의 사고 전압에 대해 200[ms] 동안 연계를 유지하는 조건이다.

본 장에서는 AMEC의 HVRT 기능 요구조건에 따라 사고 유지 기간 동안 연계된 풍력발전기의 컨버터가 원활하게 동작하며, 고전압 사고 시의 무효전류를 주입을 고려한 직류단 전압 설계 방법을 제안한다.

직류단 전압( $V_{DC}$ )은 컨버터 출력 상전압의 첨두값( $V_{P,peak}$ )과 변조방식, 전압 변조 지수(Modulation Index,  $MI$ )로 결정되며, SPWM의 변조 방식을 사용한 경우 식 (2)로 계산된다.

$$V_{DC} = 2V_{P,peak} / MI \quad (2)$$

$MI$ 는 변조 방식에 따른 컨버터의 최대 출력 전압과 컨버터 출력 전압의 비율을 나타내며 0~1의 크기를 갖는다.  $MI$ 가 1인 경우 최대 전압 이용률을 갖지만 실질적으로 스위치의 최소 스위칭 폭을 고려하여 1보다 낮은 값으로 설계되어야 한다.

표 1은 본 논문의 시뮬레이션에서 적용한 풍력발전 시스템의 제정수를 나타낸다. 표 1의 제정수

Table 1. Simulation parameters.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value	Unit	remarks
Rated power, $S_{BASE}$	2	[MVA]	-
Rated line voltage H/L, $V_{LL,rms}$	22900/690	[V]	$V_{P,peak} = 563.38[V]$
Rated current, $I_{rms}$	1673.5	[kA]	-
Output L filter, $L_f$	95	[uH]	$X_{f,pu} = 0.15[pu]$
Converter modulation format	SPWM	-	-

를 갖는 풍력발전기 컨버터의  $MI$ 가 0.95인 경우 직류단 전압은 약 1185[V]이다.

그림 4는 1185[V]의 직류단 전압을 적용하였을 때, 1.3[pu] 고전압 사고가 200[ms] 동안 발생한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 4-a)는 계통 고압 측 선간전압 파형으로 200[ms] 동안 계통 전압이 30[%] 증가하였다.

그림 4-b)는 컨버터 전류제어기의 출력인 3상 전압 지령과 컨버터에서 출력 전압을 합성하기 위해 생성하는 반송파(Carrier signal)를 나타내고 있다. 컨버터는 전압 지령과 반송파를 비교하여 스위칭 소자의 PWM을 구현하게 되는데, 전압 지령이 반송파보다 크다는 것은 컨버터의 직류단 전압으로 출력 전압을 합성할 수 없다는 의미이다. 그림 4-b)로부터 정상상태의  $MI$ 가 0.95인 조건에서는 1.3[pu]의 계통 고전압 사고 시 해당 전압을 합성하기에 직류단 전압 여유가 부족함을 알 수 있다.

그림 4-b)와 같이 사고 구간 동안 컨버터 전류제어기의 출력 전압 지령이 반송파보다 커지게 되면 컨버터에서는 과변조 현상이 나타난다. 그림 4-c)와 4-d)는 컨버터 전류제어기의 d-q축 전류 지령과 d-q축 전류를 나타내며, 과변조로 인해 전류제어기가 지령을 추종하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 계통 고전압 사고 시에도 연계 유지 상태인 풍력발전기의 원활한 제어 동작을 위해서는 고전압 사고 시의 사고 전압에 대해 전압 여유를 충분히 갖는 직류단 전압의 설계가 필요하다.

본 장에서는 아래 조건에 따라 직류단 전압을 설계하고, 각 조건에 대해 설계된 직류단 전압을 적용하여, 1.3[pu] 사고 전압을 갖고, 200[ms] 동안 유지되는 고전압 사고에 대한 풍력발전기의 시뮬레이션 응답을 확인한다.

- ① 사고전압 크기만을 고려한 직류단 전압 설계
- ② 추가적인 무효전류 보상을 고려한 직류단 전압 설계
- ③ 컨버터의 순간 최대 전류를 고려한 직류단 전압 설계

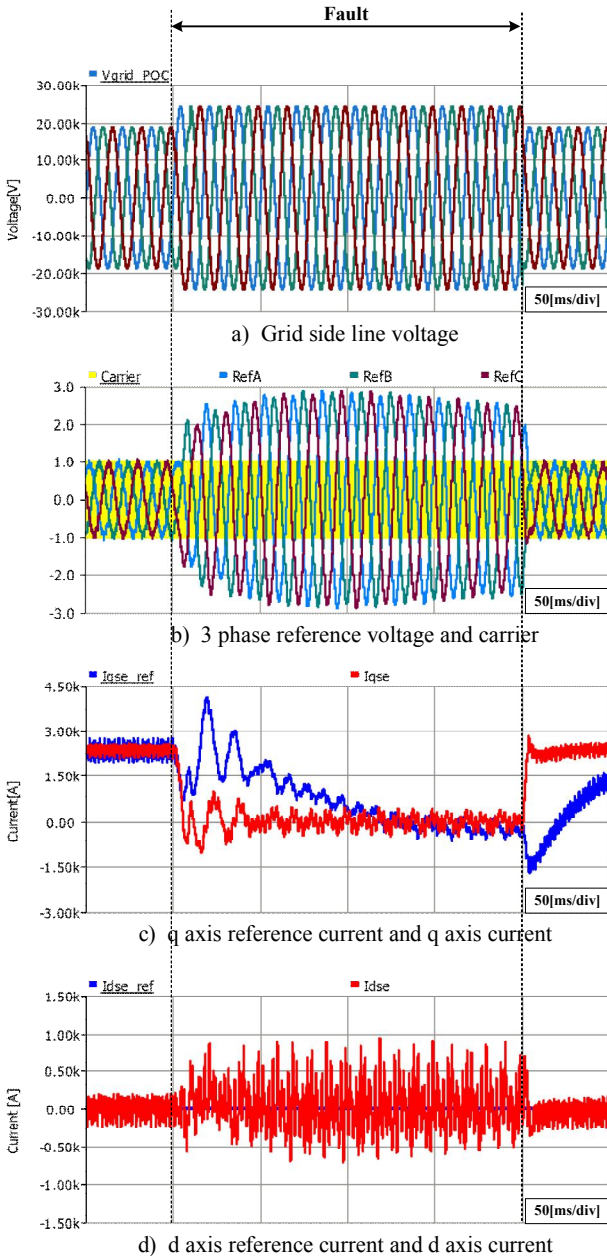


Fig. 4. High voltage fault(1.3[pu]) simulation results in case of  $V_{dc} = 1185[V]$ .

그림 4. 고전압 사고(1.3[pu]) 시뮬레이션 결과 ( $V_{dc} = 1185[V]$ 인 경우)

1. 사고전압 크기만을 고려한 직류단 전압 설계  
 식 (2)로부터 사고 전압의 크기를 고려한 직류단 전압은 계통 사고 상전압 크기인  $V_{Fault.P}$ 를 이용하여

계산할 수 있다.

$$V_{DC} = 2V_{Fault.P}/MI \tag{3}$$

식 (3)으로부터 1.3[pu]의 사고 전압을 고려하였을 때, 사고 전압에 대하여 0.95의  $MI$ 를 갖는 직류단 전압은 1540[V]이다.

그림 5는 직류단 전압 1540[V]를 적용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 사고가 유지되는 구간에서 과변조가 나타나지 않으며, 전류제어기가 지령을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 정상상태에서의 1540[V]의 직류단 전압에 대한  $MI$ 는 0.71로 높은 전압 여유를 가져 정상상태 동작 시에 상대적으로 높은 손실이 발생하게 된다. 직류단 전압의 크기는 직류단 커패시터에서의 열 손실과 인버터와 컨버터의 스위칭 손실에 비례하므로 전압 여

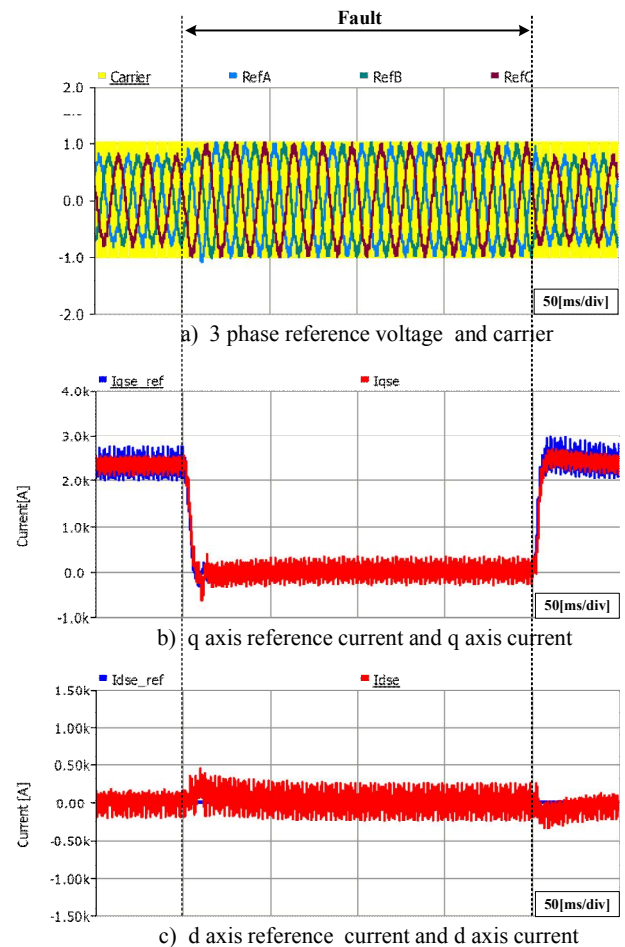


Fig. 5. High voltage fault(1.3[pu]) simulation results in case of  $V_{dc} = 1540[V]$ .

그림 5. 고전압 사고(1.3[pu]) 시뮬레이션 결과 ( $V_{dc} = 1540[V]$ 인 경우)

유가 너무 크면 정상상태의 컨버터 동작 중에 지속적으로 발생하는 손실이 커진다.

직류단 전압 크기에 따른 컨버터의 스위칭 손실을 확인하기 위하여, PLECS 시뮬레이션 툴의 Thermal model을 이용해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 적용된 컨버터의 전력 반도체 스위치는 ABB사의 IGBT 모듈인 5SNA1800G33 0400이며  $V_{CE}$ 는 3600[V],  $I_C$ 는 1800[A]의 사양을 갖는다. 시뮬레이션 사양은 표 1의 사양과 동일한 용량과 전압으로 적용하였으며, 그림 6은 직류단 전압 크기에 대한 다이오드와 IGBT에서 발생하는 스위칭 손실에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 6으로부터 스위칭 손실은 직류단 전압에 비례하여 증가함을 확인할 수 있으며, 1185[V]와 1540[V]의 직류단 전압에 대한 스위칭 손실을 비교하였을 때, 두 직류단 전압의 크기 비율인 약 30[%]가 증가한 것을 확인할 수 있다.

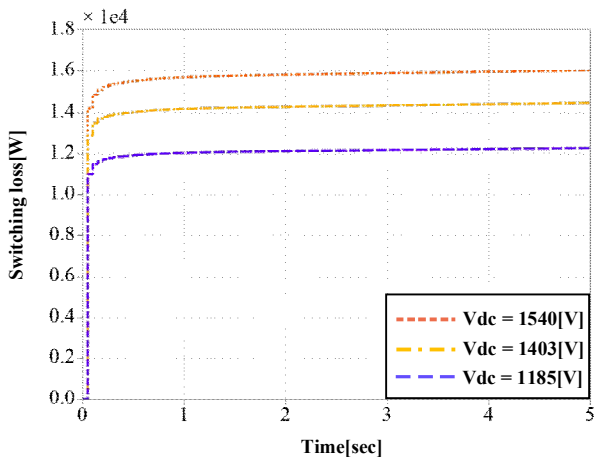


Fig. 6. Switching loss simulation results.  
그림 6. 스위칭 손실 시뮬레이션 결과

## 2. 추가적인 무효전류 보상을 고려한 직류단 전압 설계

2장에서 설명하였듯이 계통망 사업자는 계통 사고 시 계통 전압 안정화를 위해 추가적인 무효전류를 주입해야 하는 요구 조건이 명시되어 있다. 따라서, 계통과 연계된 풍력발전기의 컨버터는 저전압 사고 시 무효전류를 공급하며, 고전압 사고 시에는 무효전류를 소비해야 한다.

시뮬레이션에 구현된 풍력 발전기 컨버터의 전류 제어기는 d축 전류를 이용하여 무효전류를 제어하고, q축 전류를 이용해 유효전류를 제어하여 직류

단 전압을 일정하게 제어한다. 따라서 정상상태에서는 효율적인 유효전력 전달을 위해 d축 전류 지령은 0으로 유지하고 L/HVRT 조건에서는 해당 사고 전압에 대한 요구 무효전류를 d축 전류를 이용해 주입한다.

그림 7은 R-L 부하로 계통과 연계된 컨버터 회로도를 나타낸다. 그림 7의 회로에 대한 동기좌표계에서의 d-q축 전압방정식은 식 (4), (5)와 같다.

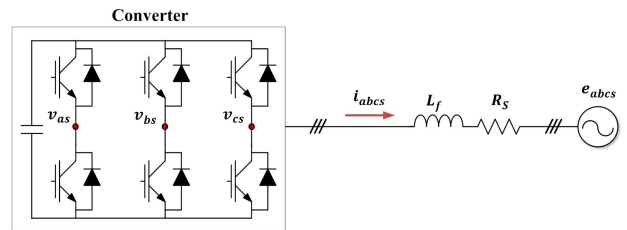


Fig. 7. The circuit diagram of 3-Phase converter with R-L load.

그림 7. R-L 부하를 포함하는 3상 컨버터의 회로도

$$V_{ds}^{e*} = R_s i_{ds}^e + L_f \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega L_f i_{qs}^e + e_d \quad (4)$$

$$V_{qs}^{e*} = R_s i_{qs}^e + L_f \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega L_f i_{ds}^e + e_q \quad (5)$$

식 (4), (5)에서  $V_{dqs}^{e*}$ 는 동기좌표계에서의 d-q축 컨버터 지령 전압,  $i_{dqs}^e$ 는 동기좌표계에서의 d-q축 전류,  $R_s$ 는 권선 저항,  $L_f$ 는 컨버터 출력 L 필터의 인덕턴스,  $\omega$ 는 계통 각주파수,  $e_{dq}$ 는 동기좌표계에서의 d-q축 계통 상전압을 나타낸다.

Phase Locked Loop(PLL)를 통해 제어 위상과 계통 위상이 동일하도록 잘 제어된다면  $e_q$ 는 계통 상전압 침투값의 크기를 가지며,  $e_d$ 는 항상 0의 값을 갖는다. 따라서 계통 고전압 사고가 발생하게 되면  $e_q$ 의 증가로  $V_{qs}^{e*}$ 가 증가하여, 컨버터에 과변조 현상이 나타날 수 있다.

식 (5)의 3번째 항은 d축 전류에 의한 출력 L필터에서의 전압강하를 나타낸다. HVRT 기능 요구 조건에서 컨버터는 무효전류 소비해야 하므로 그림 7과 같이 컨버터의 출력 전류 방향을 계통 방향으로 설정한 경우 무효전류를 소비하기 위한 d축 전류는 음의 값을 갖는다. 따라서 컨버터 전류제어의  $V_{qs}^{e*}$ 은 d축 전류에 의한 출력 L필터에서의 전압강하만큼 감소하게 된다. 결과적으로 HVRT 조건에서는 출력 L필터의 임피던스 크기와 무효전류

의 크기에 따라 q축 전류제어기의 지령 전압이 감소되므로 고전압 사고 시점에서의 MI를 낮출 수 있다는 것을 의미한다.

고전압 사고 시 무효전류 주입에 의한 전압강하를 고려하면 직류단 전압은 식 (6)으로 계산된다.

$$V_{DC} = 2V_{Fault.P}(1 - X_{f,pu}i_{ds,pu}^c) / MI \quad (6)$$

여기서,  $X_{f,pu}$ ,  $i_{ds,pu}^c$ 는 각각 계통 주파수에서의  $L_f$ 의 리액턴스와 d축 전류의 단위값을 나타낸다.

Tennet의 무효전류 주입 조건에 따르면 전압 변동률에 대하여 최소 2[pu]에 해당하는 무효전류를 주입하도록 명시되어 있다. 따라서 1.3[pu]의 사고 전압에 대해 0.6[pu] 이상의 무효전류 주입이 요구된다. 이를 고려하면 시뮬레이션 사양인 0.15[pu]의 필터 임피던스를 갖는 풍력 발전 시스템에 대해 1.3[pu] 사고 전압에서 0.95의 MI를 갖는 직류단 전

압은 1403[V]이다.

그림 8은 1403[V]의 직류단 전압을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 그림 8-c)는 d축 전류와 d축 전류 지령으로 정격 전류의 0.6[pu]에 해당하는 무효전류를 주입하고 있으며, 사고 유지 구간에도 과변조가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 컨버터의 순간 최대 전류를 고려한 직류단 전압 설계

앞 절에서 설명한 설계 방식과 같이 직류단 전압은 주입하는 무효전류의 크기와 출력단 필터인덕턴스의 크기를 증가시켜 감소시킬 수 있다. 그러나 필터 인덕턴스를 증가시키는 것은 정상 상태에서의 전압강하 및 필터의 구성비용 증가로 인한 한계가 있다. 따라서 주입하는 무효전류의 크기를 이용하면 직류단 전압을 최소화하는 설계가 가능하다. HVRT 요구 조건은 높은 전압의 경우 상대적으로 짧은 시간의 연계가 요구된다. 일반적으로 컨버터의 정격 사양은 순시적인 동작을 고려하여 여유 있게 설계되므로 짧은 시간 동안의 정격 전류보다 높은 전류의 공급이 가능하다.

제안하는 직류단 전압 설계 방법은 HVRT 기능 요구 조건을 만족시키며, 정상상태에서의 발생하는 손실을 최소화 하는 설계 방법으로, 정상상태의 전압을 기준으로 설계된 직류단 전압을 적용하여 HVRT 조건에서도 정상 상태의 MI를 갖도록 필요한 무효전류를 주입하는 방법이다. 이와 같은 방법을 이용하면 고전압 사고를 고려하기 전 직류단 전압을 적용한 경우와 동일한 정상상태 손실이 발생하며 고전압 사고 시 HVRT 기능 요구 조건을 만족하는 전력 계통의 무효전력 제어가 가능하다.

그림 9은 식 (6)으로부터 정격전류의 0~2[pu] 무효전류를 주입하는 경우 1.3[pu] 사고 전압에서 0.95의 MI를 갖는 직류단 전압을 나타낸다.

본 논문의 시뮬레이션 사양에 따라 정상상태 손실을 최소화하기 위해 MI를 0.95로 설계하면 직류단 전압은 1185[V]이다. 1185[V]의 직류단 전압을 갖는 경우 1.3[pu]의 사고 전압에서 0.95의 MI를 보장하는 무효전류는 1.55[pu]이다. 즉, 1.3[pu]의 고전압 사고 시 정격전류의 1.55[pu]에 해당하는 전류를 주입하면, 사고가 발생하는 시점에서도 정상상태와 동일한 0.95의 MI를 갖게 된다.

그림 10은 1185[V]의 직류단 전압을 적용하고,

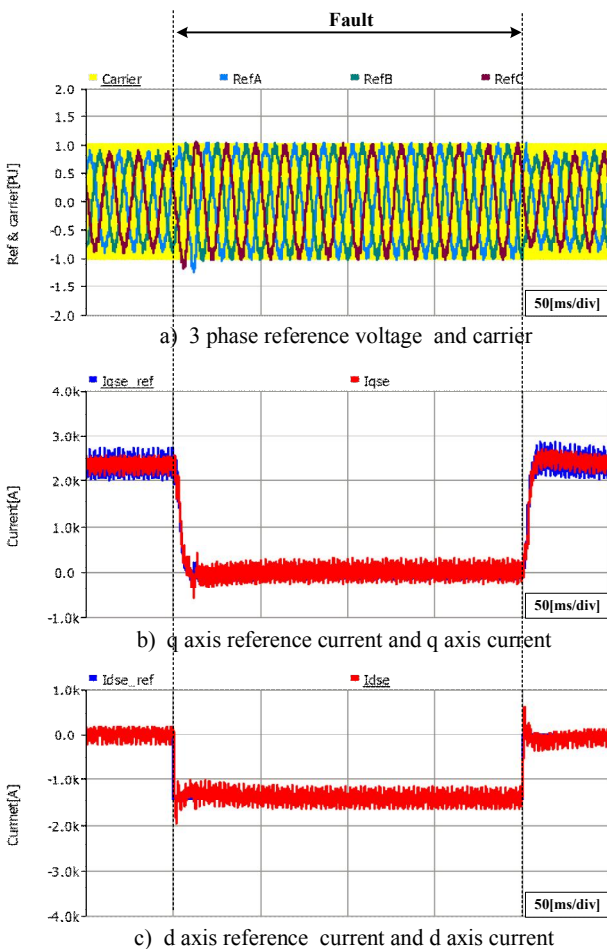


Fig. 8. High voltage fault(1.3[pu]) simulation results in case of Vdc = 1403[V].

그림 8. 고전압 사고(1.3[pu]) 시뮬레이션 결과 (Vdc = 1403[V]인 경우)

1.3[pu]의 고전압 발생 시 1.55[pu]의 무효전류를 주입한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과 과변조 현상이 발생하지 않고 전류제어기가 지령을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 설계 방법별 직류단 전압을 적용한 시뮬레이션 결과 비교

표 2는 앞서 설명한 설계 방법에 따른 직류단 전압을 적용한 시뮬레이션 결과를 정리한 표이며, 각 직류단 전압 크기 및 주입된 무효전류의 크기에 따라 사고가 발생한 경우 제어 동작 유무, 정상 상태에서의 스위칭 손실을 비교한다.

Table 2. Comparison of simulation results.

표 2 시뮬레이션 결과 비교

	CASE			
	1	2	3	4
DC-Link Voltage[V]	1185	1540	1403	1185
$M$ (when 1.3[pu] fault)	0.95 (1.24)	0.71 (0.95)	0.80 (0.95)	0.95 (0.95)
Injected reactive current[pu]	0	0	0.6	1.55
Current control for HVRT	No	Yes	Yes	Yes
Normal operation switching loss[kW]	12.2	16	14.5	12.2

Case 1의 경우, HVRT의 기능을 고려하지 않고 전력 계통의 정상 상태 조건에서 발전기의 전력을 전력 계통으로 전달하기 위해 직류단 전압을 설계하였다. 정상 상태에서는 전력 전달이 가능하며 손실이 가장 작게 발생하지만, 계통의 전압이 커지는 조건에서는 전류를 제어할 수 있는 직류단 전압이 부족하여 전류 제어가 불가능하다.

Case 2는 1.3[pu]의 사고 전압을 고려하여 직류단 전압을 설계하였다. 이 경우 정상 상태 및 사고 시점에서 컨버터 제어기가 원활하게 동작한다.

그러나 Case 1에 비해 직류단 전압 증가에 따른 정상 상태 스위칭 손실이 크게 증가하였다.

Case 3은 사고 전압에 대한 최소 무효전류에 해당하는 0.6[pu]의 무효전류 주입을 고려하여 직류단 전압을 설계한 경우이다. Case 3에서는 정상상태 및 사고 중에도 제어가 원활하게 동작하며, Case 2

에 비해 정상 상태에서의 손실이 적지만, Case 1에 비해서는 높은 손실이 발생한다.

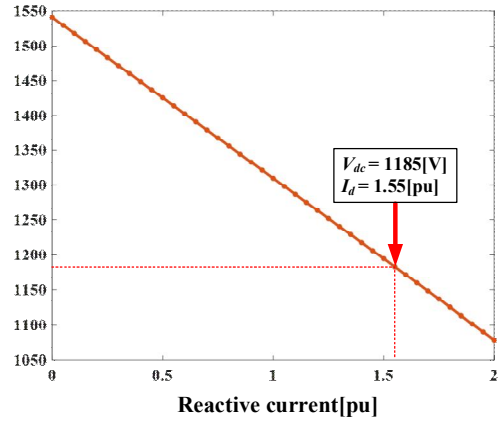


Fig. 9. DC-Link voltage versus the reactive current injection.

그림 9. 무효전류 주입 크기에 대한 직류단 전압

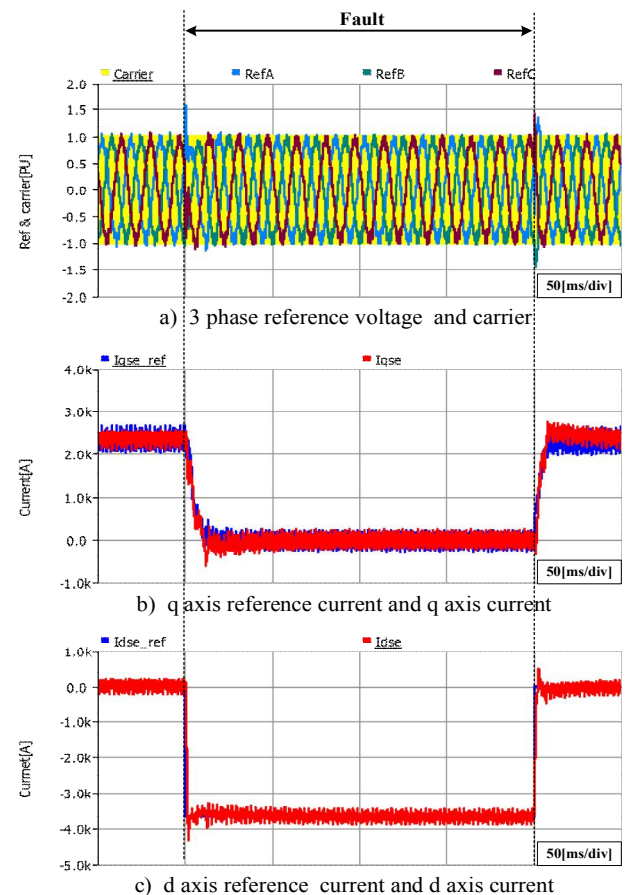


Fig. 10. High voltage fault(1.3[pu]) simulation results In case of  $V_{dc} = 1185[V]$ (Injecting reactive current 1.55 [pu].

그림 10. 고전압 사고(1.3[pu]) 시뮬레이션 결과 ( $V_{dc} = 1185[V]$ 인 경우, 무효전류 1.55[pu] 주입)

본 논문에서 제안하는 설계 방법인 컨버터의 순간 최대 전류를 고려한 직류단 전압 설계 방법을적



용한 경우는 Case 4이다. Case 4는 Case 1과 같이 정상 상태의 전압을 고려하여 직류단 전압을 설계하고, HVRT 상황에서도 정상 상태에서의  $MI$ 를 유지하도록 무효전류를 주입한 경우이다. Case 4의 설계 방법을 적용하면 정상 상태에서의 손실을 최소화할 수 있으며, Case 2, 3과 같이 사고 중에도 과변조가 나타나지 않아 컨버터의 제어 동작이 원활하게 동작한다.

## V. 결론

본 논문에서는 고전압 사고에 대한 계통 연계 유지 기능인 HVRT 기능을 만족하며, 손실을 최소화할 수 있는 Type 4 풍력발전기의 직류단 전압 설계 방법을 제안하였다. 제안하는 방법을 통해 정상 상태에서 발생하는 스위치 및 커패시터에서의 손실을 최소화하며, 고전압 사고 시 계통과 연계된 컨버터의 원활한 제어 동작이 가능한 직류단 전압을 설계할 수 있다.

제안된 방법으로 설계된 직류단 전압을 적용한 Type 4 풍력발전기 PSCAD 모델의 1.3[pu] 고전압 사고 시물레이션 결과를 확인하여 설계 방법의 효용성을 검증하였다.

## References

- [1] Y. K. Wu, S. Chang and P. Mandal, "Grid-Connected Wind Power Plants: A Survey on the Integration Requirements in Modern Grid Codes," 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), pp. 1-9, 2019.  
DOI: 10.1109/ICPS.2019.8733382
- [2] Specification of the Second Generation Generic Models for Wind Turbine Generators, WECC REMTF Prepared under Subcontract No. NFT-1-11342-01 with NREL, 2015.
- [3] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka B. Ekanayake, Phill Cartwright, "Michael Hughes, Wind Energy Generation: Modelling and Control," WILEY, 2009.
- [4] Connection Code, Korea Electric Power Corporation

(KEPCO), 2019.

- [5] National Electricity Rules, Australian Energy Market Commission(AEMC), 2018.
- [6] Grid Code: High and extra high voltage, Tennet TSO GmbH, 2015.
- [7] The Grid Code-Issue 5 Revision 22, National Grid, 2018.
- [8] Integrating Renewable Energy into the Transmission and Distribution System of the U.S. Virgin Islands, NREL, 2011.

### Seung-Hyuk Baek (Member)



2019 : BS degree in Electrical Engineering, Academic Credit Bank System.  
2019~Present : Master student in Electrical Engineering, Hanyang University, ERICA Campus.

### Sungmin Kim (Member)



2003 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2009 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2014 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.  
2012~2013 : Visiting Scholar, FREEDM Systems Center, NCSU, USA.

2014~2015 : Senior Engineer, Samsung Electronics Company.

2015~Present : Assist. Professor, Hanyang University, ERICA Campus.