

계통 연계형 풍력 발전 시스템의 LVRT 제어 전략

申昊竣*, 薛承基†

LVRT Control Strategy of Grid-connected Wind Power System

Ho-Joon Shin, and Seung-Ki Sul

요 약

본 논문은 계통 전압 사고 상황에서 계통 연계형 풍력 발전 시스템이 만족시켜줘야 할 LVRT(Low Voltage Ride Through) 제어 전략을 제안한다. LVRT 규정은 계통 전압 사고 시 풍력 발전 시스템이 지켜야 할 부분들을 전압 감소율과 사고 시간에 대해 나타내고 있다. 특히 전압 감소율이 10% 이상일 경우에는 풍력 발전 시스템은 규정된 무효 전류를 전력 계통에 제공하여 계통 전압 확보에 이바지해야 한다. 본 논문에서의 LVRT 규정은 세계적으로 가장 엄격한 규정인, 독일 계통 연계 규정(German Grid Code)을 기준으로 하고 풀 스케일(Full-scale) 가변 속도 전력 변환 시스템을 고려하여 제어 전략을 수립한다. 본 LVRT 제어 전략은 계통 사고 시 LVRT 규정을 모두 만족시킴과 동시에 직류단 전압 제어의 추가적인 알고리즘으로 직류단 전압의 제어를 통하여 전체 풍력 발전 시스템의 전력 균형을 기할 수 있다. 3상 전압 지락 사고의 경우 계통으로의 전력 제어가 불가능하여 계통 측 컨버터가 직류단 전압을 제어할 수 없으므로, 전력 제어의 기능을 발전기 측 인버터로 이행 시켜 상황에 따라 유연한 직류단 전압 제어가 가능함을 보였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 LVRT 제어 전략의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a LVRT (Low Voltage Ride Through) control strategy which should be satisfied by grid-connected wind power system when grid faults occur. The LVRT regulation indicates rules or actions which have to be executed according to the voltage dip ratio and the fault duration. Especially the wind power system has to support the grid with specified reactive current to secure the grid stability when voltage reduction ratio is over 10%. The LVRT regulation in this paper is based on the German Grid Code and full-scale variable speed wind power conversion system is considered for LVRT control strategy. The proposed LVRT control strategy satisfies not only LVRT regulation but also makes power balance between wind turbine and power system through additional DC link voltage regulation algorithms. Because it is impossible to control grid side power when the 3-phase to ground fault occurs, the DC link voltage is controlled by a generator side inverter using the DC link voltage control strategy. Through the simulation and experiment result, the proposed LVRT control strategy is evaluated and its effectiveness is verified.

Key Words : Wind power system, Grid Code, LVRT(Low Voltage Ride Through) regulation, DC link voltage control

†교신저자 : 정희원, 서울대 전기컴퓨터공학부 교수

E-mail : sulsk@plaza.snu.ac.kr

*학생회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 석사과정

접수일자 : 2010. 12. 9

1차 심사 : 2011. 1. 6

심사완료 : 2011. 1. 13

1. 서 론

최근 차세대 동력원으로 각광받고 있는 풍력 발전은 시설 투자 대비 효율이 좋아 전세계적으로 그 규모와 시

장성이 증가하고 있다. 전 세계적으로 2010년에만 40GW의 풍력 발전 시설이 추가 되었으며, 약 200GW의 풍력 발전 시설이 계획되어 있다. 지금의 추세와 시장성을 고려하면 2014년에는 현재 풍력 발전 총 용량의 두 배 이상이 설치될 전망이다^[1]. 이와 같이 풍력은 전력망에서 차지하는 비중이 커지며 차세대 동력원으로서 중요한 역할을 하고 있다.

하지만 대용량 풍력 발전 시스템은 가변적인 특성으로 인해 그 주변 전력망에 큰 영향력을 가지며 심할 경우엔 전력망 안정도에 지장을 줄 수 있다. 따라서 이에 각국에서는 전체 전력망의 안정성을 보장하기 위해 계통 연계 규정(Grid Code)을 제정하여 풍력 발전 시스템의 계통 연계를 규제하기에 이르렀다. 이 중 독일 계통 연계 규정(German Grid Code)은 가장 엄격한 규제로 잘 알려져 있으며 많은 나라의 계통 연계 규정이 독일 계통 연계 규정에 근거하고 있다^[2].

제정된 계통 연계 규정 중에서도 계통 사고 시 풍력 발전 시스템에 요구되는 LVRT(Low Voltage Ride Through) 규정은 계통 연계 규정 중 가장 주목받고 있는 내용이다. LVRT 규정은 전압 감소율과 사고 시간에 따라 요구 조건이 나뉘지며, 특정 전압 범위에서는 무효 전류를 지원하여 계통 전압 회복에 기여하도록 하고 있다. 앞으로 풍력 발전 시스템이 계통에 연계되기 위해서는 위의 규정을 만족시키는 제어 전략이 필요하다. LVRT 규정에 관한 분석 및 연구들이 어이지고 있으며^[3], 또한 본 논문에서도 독일 계통 규정의 LVRT에 대해 조사, 분석하고 이에 맞는 제어 전략을 수립한다. 독일의 계통 연계 규정을 만족 시킬 경우 우리나라를 포함하는 대부분의 국가의 계통 연계 규정을 만족 시킬 수 있다.

또한 본 논문에서는 자유로운 유, 무효 전력 전달이 가능한 가변 속도 풀 스케일 풍력 발전 시스템을 풍력 발전의 전력 변환 시스템으로 선정하여, LVRT 규정은 물론 시스템의 안정도도 동시에 확보할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션과 5kW급 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 독일 계통 연계 규정의 LVRT 조건

독일 계통 연계 규정의 LVRT 요구 조건은 그림 1과 같다. 전압 감소율은 3상 선간 전압 중 가장 큰 값을 기준으로 하며 본 논문에서는 감소된 전압 백분율을 전압 감소율로 명명한다. 0초에서 사고 발생을 기준으로 150ms동안은 어떠한 사고에서도 계통 연결을

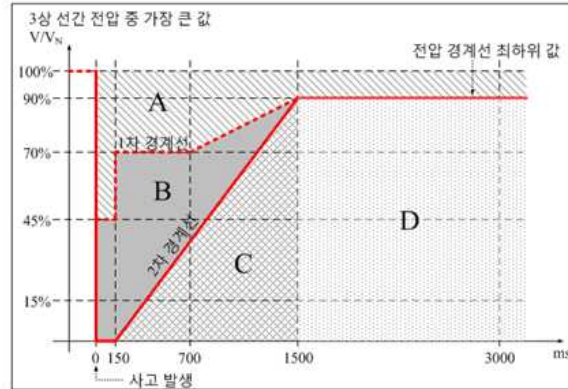


그림 1 풍력 발전 시스템의 LVRT 전압 경계선
Fig. 1 LVRT Voltage limit line of wind power system

유지해야 한다. 그림에서 알 수 있듯이 경계선은 1차 경계선과 2차 경계선으로 구분되어 있으며 각 영역에 따라 요구되는 작동 규정이 있다.

2.1 각 영역에서의 작동 규정

A 영역에서는 모든 시스템이 항상 계통에 연결되어 있어야 하며 규정에 따라 무효 전류를 공급해 주어야 한다.

B 영역에서도 대부분의 시스템이 계통에 연결되어 있어야 하나, 계통 연계 형태에 따라 허가를 받은 시스템은 2차 경계선을 조절할 수 있다. 또한 특정 허가를 받은 시스템에 한해서 순간적인 분리가 가능하며 2초 내에 재 연결하여 유효 전력을 초당(per second) 시스템 정격 전력의 0.1 p.u. 이상의 상승률로 공급해 주어야 한다.

C 영역에서는 모든 시스템이 순간적인 분리가 가능하며 2초 이후에 재 연결하여 유효 전력을 초당 시스템 정격 전력의 0.1p.u. 이하의 상승률로 공급해 주어야 한다. D 영역에서는 풍력 발전 시스템이 계통에서 분리 가능하며 사고 복구 후엔 유효 전력을 초당 시스템 정격 전력의 0.2 p.u. 이상의 상승률로 공급해 주어야 한다.

2.2 무효 전류의 공급

사고 상황에서 풍력 발전 시스템에 요구되는 무효 전류 공급 조건은 그림 2와 같다.

무효 전류 공급 규정은 감소된 혹은 증가된 계통 전압을 다시 복구시키는데 풍력 발전 시스템이 기여해야 한다는 취지이며 순간적인 전압 감소로 인한 유도 전동기와 같은 유도성 부하(inductive load)에 계통이 공

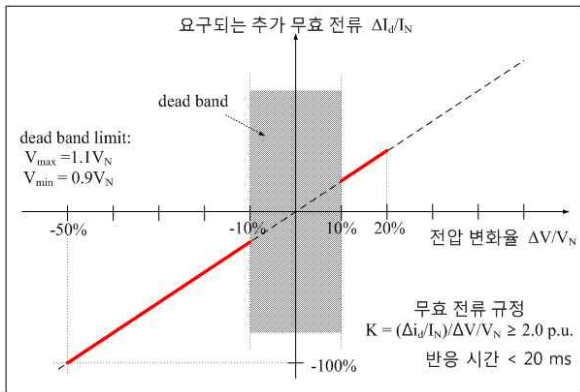


그림 2 LVRT 상황의 무효 전류 공급 조건
Fig. 2 Reactive current supply condition in LVRT

급하지 못하는 무효 전류를 풍력 발전 시스템이 공급해 줌으로서 사고 시 계통 전압의 회복이 빠르게 이루어질 수 있게 한다.

그림에서 V_N 은 정격 전압, I_N 은 정격 전류, ΔI_d 는 사고 전 무효 전류와 사고 후 무효 전류의 차이, ΔV 는 사고 전 전압과 사고 상황의 전압의 차이이다. 계통 전압이 $1.1V_N \sim 0.9V_N$ 사이에 있을 때는 무 동작 범위(dead band)라 하여 정상 작동 구간이며 사고 상황에 대한 무효 전류의 요구는 없다. 하지만 그 범위를 벗어나는 전압 변동에 대해서는 전압 변화율 대비 2배의 무효 전류를 계통에 공급해야 한다.

3. 풍력 발전 시스템

풍력 발전 시스템은 크게 고정 속도 풍력 발전 시스템과 가변 속도 풍력 발전 시스템이 있다. 고정 속도 풍력 발전 시스템은 견고성과 가격적인 면에서 유리하나 계통 사고에 대해 취약점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있으나 기본 구조상 LVRT에 대한 효과적이고 적절한 대응을 하기 힘들다^{[4]-[5]}. 따라서 최근에는 전력변환 장치를 이용한 가변 속도 풍력 발전 시스템이 주류를 이룬다^{[6]-[7]}. 본 논문에서는 현재 신규 설치되는 대용량 풍력 발전 시스템의 주류를 이루고 있는 그림 3과 같은 풀 스케일 가변 속도 전력 변환 시스템을 기준으로 시스템을 설명한다.

본 시스템은 Back-to-Back PWM 컨버터를 통해 전력이 전달되며 발전기 측에서 자유로운 주파수 조절이 가능하여 다극 발전기를 이용한 기어리스(Gearless) 시스템도 손쉽게 구성할 수 있다. 또한 IGBT와 같은

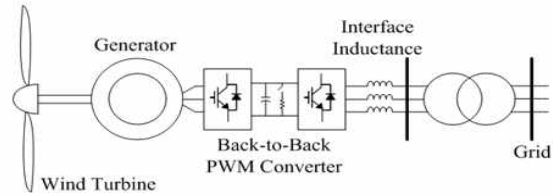


그림 3 풀 스케일 가변 속도 풍력 발전 시스템
Fig. 3 Full-scale variable speed wind power system

전력 반도체의 가격 감소 등을 고려했을 때 향후 그 적용 가능성은 더욱 커지리라 예상된다.

4. 직류단 전압 제어

4.1 직류단 전압 제어

Back-to-Back PWM 컨버터에서 직류단 전압 제어는 직류단 전압을 지령치와 같게 유지하기 위해 시스템 전체의 전력 흐름을 제어하는 역할을 한다. 그림 4와 같이 직류단을 표현할 수 있으며 식 (1)과 같은 관계를 가진다.

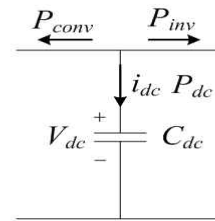


그림 4 직류단 전력 흐름 개념도
Fig. 4 Conceptual diagram of DC link power flow

$$P_{conv} + P_{inv} + P_{dc} = 0 \tag{1}$$

여기서 $P_{conv}, P_{inv}, P_{dc}$ 는 각각 컨버터 측(계통 측) 출력 전력, 인버터 측(발전기 측) 출력 전력, 직류단 전력이다. 이를 이용한 일반적인 직류단 전압 제어 블록도는 그림 5와 같다.

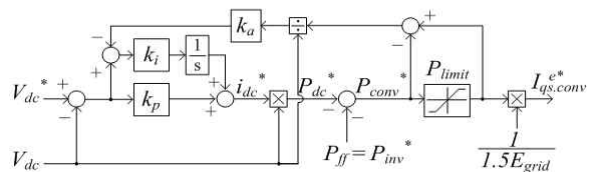


그림 5 직류단 전압 제어 블록도
Fig. 5 DC link voltage control block diagram

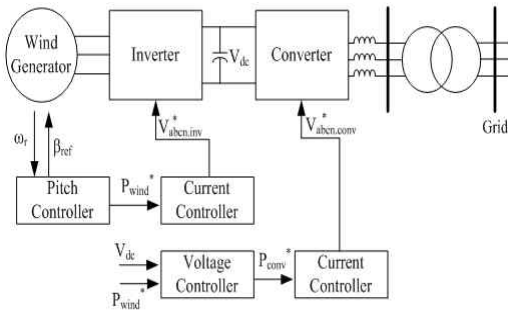


그림 6 풍력 발전 시스템의 제어 방식
Fig. 6 Control method of wind power system

전류 제어가 지령치를 잘 추종한다는 가정 하에 직류단 전압 제어기의 전달 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{V_{dc}^*}{V_{dc}} = \frac{s \frac{k_p}{C_{dc}} + \frac{k_i}{C_{dc}}}{s^2 + s \frac{k_p}{C_{dc}} + \frac{k_i}{C_{dc}}} \quad (2)$$

이득값 설정은 시스템의 특성 방정식이 2차 시스템 ($s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$)이 되도록 설정할 수 있다. 이 경우 $k_p = 2C_{dc}\zeta\omega_n$, $k_i = C_{dc}\omega_n^2$ 로 정할 수 있다.

풍력 발전기 터빈 축에선 피치(pitch) 제어를 통한 최대 전력 출력 제어를 하고 있다고 가정하면 전체 시스템의 제어는 그림 6과 같이 된다.

위의 전력 제어 방식을 이용하면 일반적인 상황에서 풍력 발전을 효율적으로 운전할 수 있으며 가변 속도 풍력 발전 시스템에 적합하다. 하지만 앞서 고려한 LVRT 상황에서는 시스템의 안정화를 고려하여 계통 사고에 따른 지령 수정이 필요하다. 직류단 전압의 상승률에 따라 발전기 축 지령을 수정하는 De-loading droop 방식은 그림 7과 같다^[8]. 또한 3상 지락 사고 시 시뮬레이션은 그림 8, 9와 같으며 1초에서 사고가 발생하여 1.15초에 사고가 복구되었다. 이때 사용된 직류단 캐패시턴스는 500uF이다.

하지만 3상 지락 사고의 경우 이 방식을 적용했을 때, 컨버터에서 전력을 제어할 수 없기 때문에 직류단 전압 제어가 불가능하고 사고 상황에서 그림 9와 같이 직류단 전압은 제어 불능이 되며 부유(floating)하게 된다. 또한 사고에 대한 반응이 비교적 느려 직류단 캐패시턴스가 작은 경우 직류단 전압이 크게 상승하며 사고 이후에도 제어가 적분항에 쌓인 값으로 인해 정상상태로 돌아오는데 시간이 걸린다.

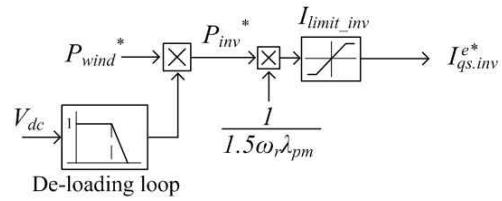
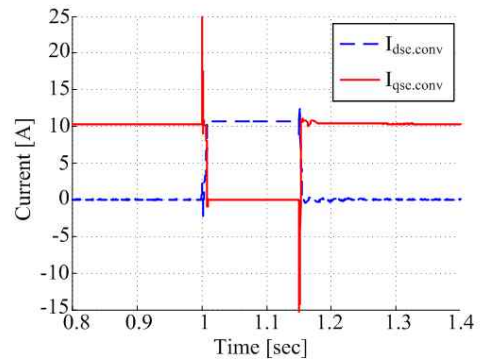
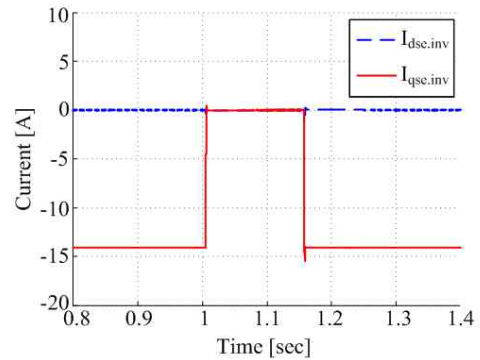


그림 7 De-loading droop 방식
Fig. 7 De-loading droop method



(a) 컨버터 축 dq 전류



(b) 인버터 축 dq 전류

그림 8 De-loading 방식 적용 시 컨버터 및 인버터 dq 전류-시뮬레이션

Fig. 8 d-,q-axis current at converter and inverter using de-loading method - Computer simulation

따라서 최소한의 직류단 캐패시턴스로, 사고 상황에서도 시스템의 안정성을 확보하고 동시에 LVRT를 이룰 수 있는 제어 전략이 필요하다.

4.2 LVRT 제어 전략의 직류단 전압 제어

LVRT 제어 전략에 사용된 직류단 전압 제어기는 정상 작동 시에는 일반적인 직류단 전압 제어기와 동일

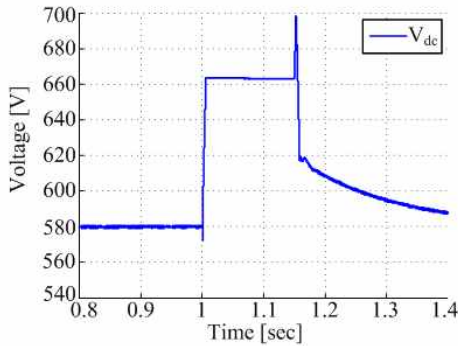


그림 9 De-loading 방식 적용 시 직류단 전압-시뮬레이션

Fig. 9 DC link voltage using de-loading method - Computer simulation

하다. 하지만 기존 직류단 전압 제어기는 제어기 출력을 소자 정격 또는 정격 전류를 고려하여 제한시키며 이 값을 안티 와인드업(anti-windup) 향으로 적분항에 빼주어 기존의 지령치를 수정하도록 되어 있다. 직류단 전압 제어기의 대역폭은 전류 제어기만큼 빠를 수 없어서 사고 상황에선 제어기가 적분항을 빠르게 줄이지 못하고, 사고 복구 후에도 적분항에 쌓여 있는 값을 빼주어 정상상태로 돌아오는 데에 시간 지연이 발생한다. 또한 일반 제어기는 3상 계통 사고 시 컨버터 측에서 제어할 수 있는 전력이 없기 때문에 사고 상황에 직류단 전압 제어가 불가능해진다. 이 문제점들을 그림 10과 같이 제한된 값을 적분기에 넣지 않고 인버터 측으로 넘기는 방식으로 해결하면 사고 상황에서도 시스템의 안정성을 보장할 수 있다.

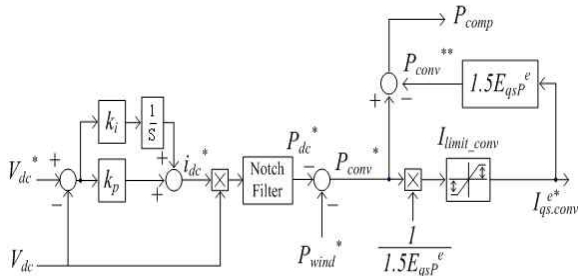


그림 10 LVRT 제어 전략의 직류단 전압 제어
Fig. 10 DC link voltage control of LVRT control strategy

사고 상황에서 LVRT 규정을 만족시키는 것이 가장 우선이므로 식 (3)과 같이 전압 감소율(Voltage Reduction: VR)에 맞게 무효 전류(d축 전류)를 공급해 주어야 한다.

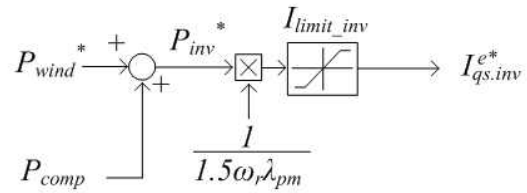


그림 11 인버터 q축 전류 지령 생성부
Fig. 11 inverter side q-axis current reference

$$I_{ds.conv}^* = \begin{cases} I_{ds.N}^* & VR < 10\% \\ 2VR \times I_{rated} + I_{ds.N}^* & 10\% < VR < 50\% \\ I_{rated} & 50\% < VR \end{cases} \quad (3)$$

$I_{ds.N}^*$ 는 역률이 지상 0.95 ~ 진상 0.95 범위 내에 있는 정상 상태에서의 무효 전류이다. 따라서 컨버터의 q축 전류는 위와 같이 요구되는 d축 전류를 뺀 부분으로 제한한다.

$$I_{qlimit.conv} = \pm \sqrt{I_{rated}^2 - (I_{ds.conv}^*)^2} \quad (4)$$

전류 제한을 지난 q축 전류 지령치를 이용해 전력을 계산하면 그림 10에 나타난 현재 컨버터가 낼 수 있는 전력(P_{conv}^{**})이 정의된다. 여기서 정상분 전압을 이용한 계산을 통해 더욱 정확한 가용 전력을 알 수 있다. 따라서 전류 제한을 하기 전 컨버터 전력 지령(P_{conv}^*)과 컨버터가 낼 수 있는 전력의 차이는 직류단 전압을 일정하게 제어할 하기 위해 조절해 주어야 하는 전력(P_{comp})을 뜻한다. 이 방식에서는 P_{comp} 을 인버터 측 지령으로 보내어 부족한 전력을 보완해주는 구조로 되어 있다. 따라서 인버터 측 지령은 그림 11과 같이 구성된다.

앞서 말했듯이 P_{comp} 는 컨버터 측에서 부족한 부분을 보완해주는 방식이므로 계통 전압 변화에 따라 유연하게 조절된다. 특히 계통 전압 감소율이 50%이상일 경우엔 컨버터에선 무효 전류를 정격으로 보내주어야 하기에 컨버터 측 가용 q축 전류는 0이 된다. 이때는 직류단 전압 제어기의 출력이 인버터에 그대로 전달되며 자연스럽게 인버터가 직류단 전압을 제어하게 된다.

계통 측 정상분 전압이 컨버터 측 전력 계산에 사용되는데 3상 지락 사고의 경우 정상분 전압이 0이 되어 전류 지령을 무한대로 보내는 것을 방지하기 위해 적절한 하위 제한선을 설정해 주는 것이 좋다. 본 논문

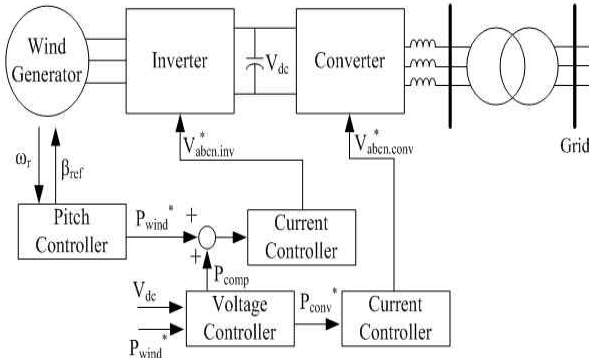


그림 12 P_{comp} 가 보상된 풍력 발전 시스템의 제어
Fig. 12 Control of wind power system with compensating P_{comp}

에서는 정상상태 전압의 5%를 제한선으로 설정하였다. 또한 불평형 사고 시 들어오는 역상분에 의해 전류가 흔들리는 것을 방지하기 위해 직류단 전압 제어기 출력에 120Hz 대역 저지 필터를 추가하였다. 이 경우 시스템으로 들어오는 역상분은 모두 직류단 캐패시터가 감당하게 되지만, 3상 지락 사고 시 전압 감지 및 제어기 반응을 고려하여 캐패시터를 설계한다면 그 영향은 미미하다.

그림 12는 전체 시스템의 제어 흐름을 나타낸다. 사고 상황에서 P_{comp} 로 인해 순간적인 토크의 변화가 있어 풍력 발전기의 속도가 변할 수 있으나 풍력 발전기의 관성은 일반적으로 매우 크므로 LVRT 규정 내의 수초간의 토크 변화에는 속도가 일정하다고 가정할 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

실험은 추소 모델에 근거하여, 3상 사고를 중점으로 이루어졌으며 실험에 사용된 시스템의 제정수와 실험 조건은 표 1, 표 2와 같다.

표 1 영구 자석 동기 발전기(PMSG) 제정수
Table 1 Parameters of PMSG

항목	값
정격 용량	5 kW
정격 선간 전압	289.2566 Vrms
정격 전류	9.98 Arms
극수	32
정격속도	191 r/min
관성	400 kg·m ²

표 2 실험 조건
Table 2 Experimental condition

항목	값
계통 선간 전압	220 Vrms
입력단 변압기	220Δ/380Y
직류단 전압 지령	580 V
직류단 캐패시턴스	500 uF
스위칭 주파수	2 kHz
샘플링 주파수	4 kHz

직류단 캐패시터 선정에 있어, 최악의 3상 지락 사고가 발생 - 풍력 발전 시스템 입력단에서 3상 지락 발생-할 경우 제어기가 반응하고 지령치가 0으로 가기 까지 걸리는 시간 동안 인버터 측에서 오는 정격 전력을 전압 변동률 10%이내로 억제하는 것을 목표로 하였다. 캐패시터 선정 식은 식 (5)와 같다^[9].

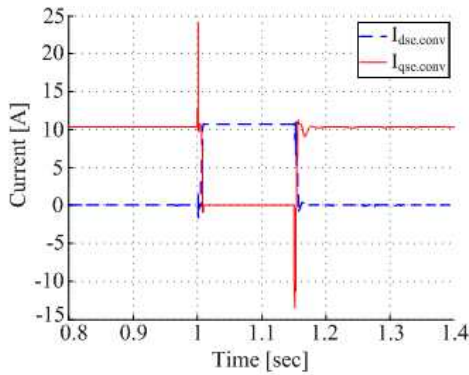
$$C_{dc} \geq \frac{T_r \cdot P_{inv}}{V_{dc} \cdot \Delta V_{dc}} \tag{5}$$

반주기(half cycle) 실효전압 측정법을 통해 3상 전압 지락 사고를 감지하고 지령을 감소시키는 시간은 약 8.33ms(반주기)이고 지령 변화에 따른 전력 변화가 선형적이라고 가정하면 캐패시턴스는 다음과 같이 구할 수 있다.

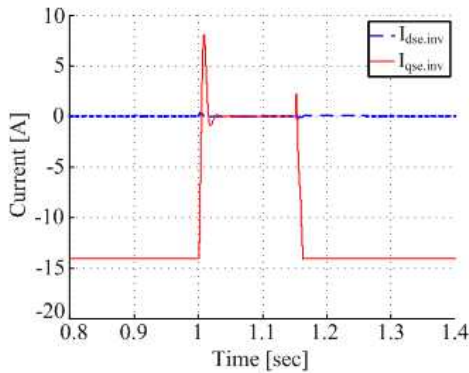
$$C_{dc} \geq \frac{8.333m \times \frac{1}{2} 5000}{580 \times 0.1 \times 580} = 619.3uF \tag{6}$$

직류단 전압 제어 알고리즘을 이용했을 때 좀 더 빠른 전력 변동을 예상할 수 있으며 실제 실험에서는 500uF의 캐패시턴스를 사용했다.

그림 13, 14는 P_{comp} 보상이 적용된 직류단 전압 제어를 이용한 3상 지락 사고의 시뮬레이션 파형이다. 1초에서 순간적으로 3상 지락 사고가 발생하였고 1.15초에서 복구되었다. 사고 발생 후 복구 시 과도 상태에서는 제어기가 반응하기까지 순간적으로 계통과 발전기 측의 전력 불평형으로 인해 직류단 전압과 dq 전류에 약간의 과도현상이 발생한다. 하지만 P_{comp} 의 보상으로 인해 사고 상황에서 인버터 측에서 직류단 전압을 제어하고 있으므로 사고 복구 후에도 빠르게 정상상태로 돌아옴을 알 수 있다. 또한 사고 상황에서 무효 전류를 정격 전류 만큼 공급하여 LVRT 규정도 만족시킴을 확인할 수 있다.



(a) 컨버터 측 dq 전류



(b) 인버터 측 dq 전류

그림 13 컨버터 및 인버터 dq 전류-시뮬레이션
Fig. 13 d-,q-axis current at converter and inverter -Computer simulation

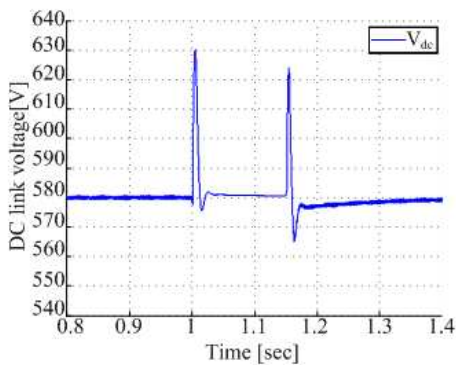


그림 14 직류단 전압-시뮬레이션
Fig. 14 DC link voltage-Computer simulation

실제 실험에서는 계통 측에 단권변압기를 연결하여 전압을 변경해 가며 사고를 모의하였다. 풍력 발전은 사고 순간 속도는 일정하다고 가정하여 속도 제어를 수행하는 부하기로 모의하였다. 따라서 실험에서 수행

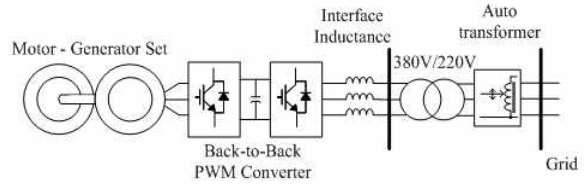


그림 15 전체 실험 시스템 구성도
Fig. 15 Total experimental system configuration

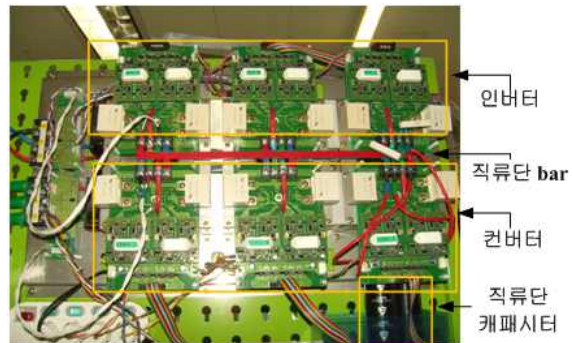


그림 16 Back-to-Back PWM 컨버터
Fig. 16 Back-to-Back PWM converter

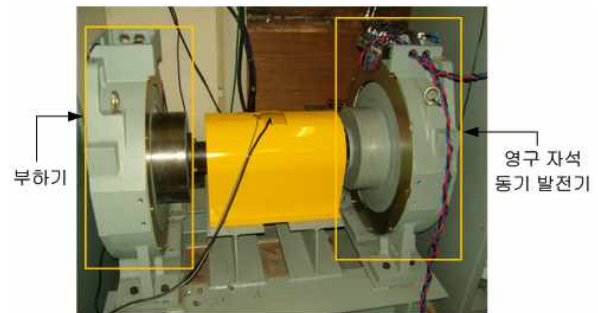


그림 17 부하기-발전기 실험 세트
Fig. 17 Motor-Generator experimental set

된 전체 시스템은 그림 15와 같으며 실험에 사용된 Back-to-Back PWM 컨버터 및 부하기-발전기는 그림 16, 그림 17과 같다.

실험 결과 파형은 그림 18~21과 같다. 그림 15는 단권변압기의 출력 전압 파형으로 실험에서는 모의 계통 전압에 해당하는 파형이다. 축소된 그림은 시간에 따른 전압의 변화를 나타낸 것이며, 변화된 전압은 거의 0에 가깝게 감소되었음을 알 수 있다. 실제 실험에선 입력 전압이 급격하게 감소하지 않았기에 과도 상태에서 오버슈트는 작았으나 입력 전압이 0이 된 사고 상황에서 직류단 전압이 580V로 잘 유지됨을 알 수

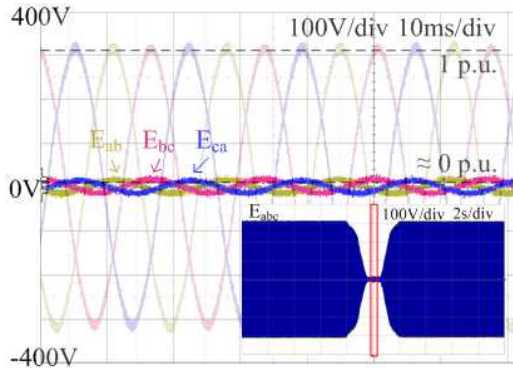


그림 18 단권 변압기 출력 전압
Fig. 18 Output voltage of autotransformer

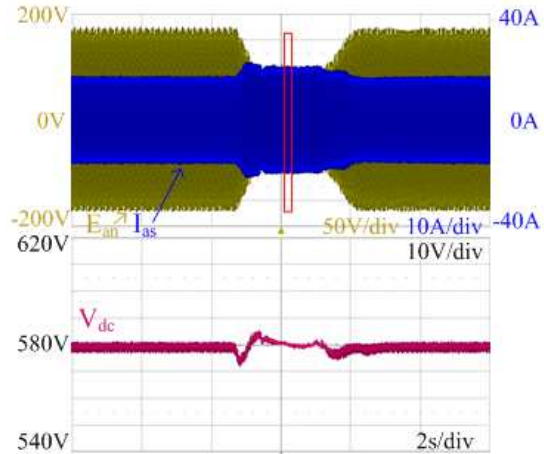


그림 20 상전압 및 상전류, 직류단 전압
Fig. 20 Phase voltage, phase current and DC link voltage

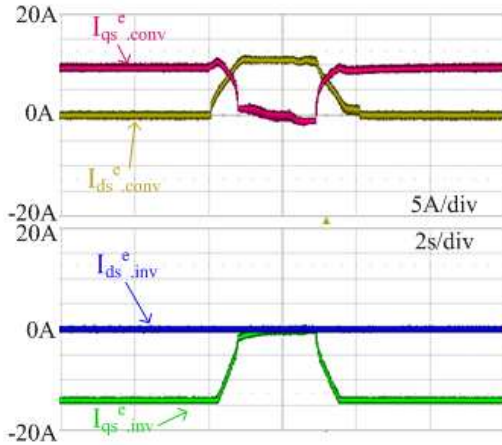


그림 19 컨버터 및 인버터 dq 전류
Fig. 19 d,q-axis current at converter and inverter

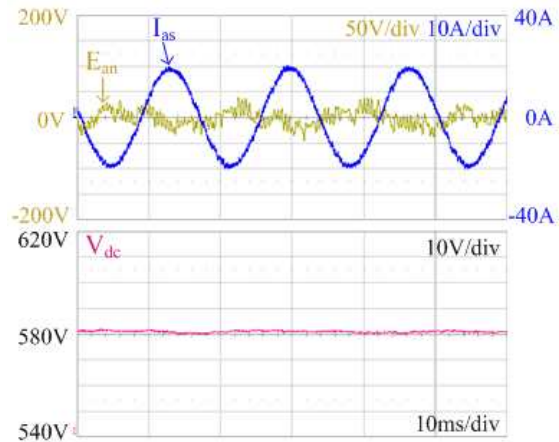


그림 21 상전압 및 상전류, 직류단 전압 (확대)
Fig. 21 Phase voltage, phase current and DC link voltage (enlarged)

있다. 또한 컨버터 측 무효 전류가 정격 전류만큼 잘 공급되고 있음을 알 수 있다. 그림 19에서의 정격 전류는 10.74A로 컨버터 측 380V 레벨에서의 정격 전류이며 그림 20, 21의 전류는 계통 측 220V 에서의 정격 전류이기에 $10.74 \times \frac{380}{220} = 18.55A$ 이다. 따라서 시스템이 3상 지락 사고 상황에서도 LVRT 규정을 만족시킴을 확인하였다. 그림 21의 상전압에는 단권변압기의 인덕턴스로 인해 약간의 PWM 고조파가 포함되어 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 풍력 발전 시스템이 계통에 연계되기 위해 지켜야 할 LVRT 규정에 대해 유연하게 대처할

수 있는 LVRT 제어 전략을 제안하였다. 가장 엄격한 독일 계통 연계 규정의 LVRT 규정에 대해 조사하여 제어 전략을 수립하였으며 사고 상황에서도 유연한 대처가 가능한 직류단 전압 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 직류단 전압 제어는 3상 지락 사고 상황에서도 LVRT 규정을 만족시키며, 직류단 전압 제어를 통해 시스템 전체의 전력 균형을 잡아주어 사고 시 시스템의 안정도 역시 확보할 수 있었다. 5kW급 실험을 통해 3상 지락 사고 상황에서 100% 무효 전류 공급과 함께 전압 제어 오차 1% 이내의 정확한 직류단 전압 제어가 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] "The Global Wind Energy Council news", *GWEC*, 2010. Sep.
- [2] "Grid Code for High and Extra High Voltage", E.ON Netz GmbH, 2006, 1st April.
- [3] Xing-jia Yao, Li-zhe LIANG, Hu Chen and Zuo-xia XING, "Control Strategy Study of DFIG with LVRT," *Energy and Environment Technology*, pp. 572, 2009, Oct.
- [4] S.M. Mueyen, Rion Takahashi, Toshiaki Murata, Junji Tamura. "Low voltage ride through capability enhancement of fixed speed wind generator", *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009, June/July.
- [5] Zhou Linyuan, Liu jinjun, and Liu Fangcheng, "Low Voltage Ride-Through of Wind Farms Using STATCOM Combined with Series Dynamic Breaking Resistor", *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, pp 841-845, 2010, June.
- [6] L. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen, B. Bak-Juensen, "Conceptual survey of Generators and Power Electronics for wind turbines", Riso National Lab, Denmark, 2001, Dec.
- [7] Andrew Causebrook, David J. Atkinson and Alan G. Jack, "Fault Ride-Through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors", *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 22, No. 3, 2007, Aug.
- [8] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, Mike Hughes, "Wind energy generation - modeling and control", WILEY, pp. 231-233, 2009.
- [9] Emilio J. Bueno, Santiago Cobreces, Francisco J. Rodriguez, Felipe Espinosa, Marta Alonso, Raul Alcaraz, "Calculation of the DC-bus Capacitors of the Back-to-Back NPC Converters", *EPE-PEMC, Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, Sept.

저 자 소 개



신호준(申昊竣)

1986년 12월 24일생. 2009년 경북대 공대 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2009년~현재 서울대 대학원 전기공학과 석사과정.



설승기(薛承基)

1958년 5월 13일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년~1988년 University of Wisconsin, Madison 연구원. 1988년~1990년 LG산전 책임연구원. 2003년~2004년 Yaskawa Electric Corp. 상임연구고문. 1991년~현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수. 2005년~2007년 서울대 공대 부학장. 2008년~현재 기초전력연구원 원장. ICPE'11 General Chairman.