인버터 기반 신재생 에너지 발전 시스템의 계통 지원 운전을 위한 계통 전압 검출 방법

안현철*, 송승호**

A Detection Method of Grid Voltage for Grid Support Operation of an Inverter-based Renewable Energy Generation System

Hyun-Chul Ahn* and Seung-Ho Song**

Abstract

The Grid code is being strengthened as increase of renewable energy ratio. Especially, the grid connection regulations are continuously being updated for stable operation of power grids. Static grid support and Dynamic grid support must make an accurate measure at Grid connected point because they needs control algorithm individually. It has to exactly measure voltage including switching ripple at the output of the inverter generating system. In addition, it is necessary to have an accurate voltage measurement when the situation rapidly changing the grid impedance is caused by the input of serial impedance of transformer and line impedance as well as Grid Fault Device. In this paper, We propose a new detection method of grid voltage to calculate accurately the r.m.s voltage of the grid connection point along the standard required by the low voltage regulation. We verified performance through simulation grid fault device.

Key words

Voltage Detection(전압검출), Low Pass Filter(저역통과필터), Grid Code(계통 규정), Grid Fault(전원사고), Static Grid Support(정적계통 지원), Dynamic Grid Support(동적 계통 지원), Grid Code Compliance(계통 연계 적합성), Point of Common Coupling(계통 연계 지점), R.M.S(실효값), Distributed Generation System(분산전원)

(접수일 2013. 3. 25, 수정일 2013. 6. 26, 게재확정일 2013. 6. 27)

* 광운대학교 대학원 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University)

■ E-mail : dalmor@nate.com ■ Tel : 02-940-5146 ■ Fax : 02-940-5141

** 광운대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University)

■ E-mail : ssh@kw.ac.kr ■ Tel : 02-940-5762 ■ Fax : 02-940-5141

Subscrip

LVRT : Low Voltage Ride Through
GCC : Grid Code Compliance
GFD : Grid fault Device
PCC : Point of Common Coupling
LPF : Low Pass Filter

1. 서론

신재생 발전 시스템의 계통에서 차지하는 비율이 증가함에 따라 계통 안정화를 위한 노력이 중시 되고 있다. 계통의 상황에 능동적으로 계통 안정화를 위한 기능들이 계통 규정에 규격화 되어 요구되고 있다. 그에 따라 신재생 발전시스템이 만족해야 하는 계통 규정의 중요한 내용으로 계통 지원 운전 기능이 있는데 이것은 정적 계통 지원과 동적 계통 지원으로 구분된다. 정적 계통 지원과 동적 계통 지원 모두 계통의 상태변화를 계통 전압의 인식을 통해 파악한다. 즉, 풍력발전기가 연계된 연계지점의 계통 전압이 표준 값보다 10%이상 낮아지면 동적 계통 지원을 수행해야 하고 10%이내로 낮아지면 정적 계통 지원을 수행한다.

한편, 인버터 방식을 이용한 신재생 발전 시스템의 계통 연계시 PWM 스위칭에 의한 출력단 전압 및 전류의 리플 발생은 필연적이며 출력단 고조파 필터의 고조파 감쇄 성능에 따라 PWM리플이 충분히 감쇄되지 않고 계통에 접속되는 경우도 있다. 특히 LCL구조의 고차필터를 사용한 경우 전압 고조파 감쇄율이 크기만 L구조의 1단 필터를 사용하였거나 필터 계수의 조정이 부정확한 경우 인버터 출력전압에 포함된 스위칭 리플이 계통 전압에 직접적인 영향을 주는 경우가 발생한다. 이러한 전압 고조파 성분의 발생은 연계지점의 등가 단락 임피던스가 클수록 더욱 심하게 나타나게 된다.

본 논문에서는 이와 같이 고조파가 포함된 계통 전압을 전압센서를 통해 디지털 신호로 읽어 들이는 과정에서 발생하는 오차의 원인을 분석하고 적절한 아날로그 저역통과 필터의 설치 및 보상을 통해 계통 전압 측정의 정밀도를 높이는 방법을 제안하였다. 특히, 국제 규격에서 요구하는 방법대로 계통 전압의 반주기 실효값을 정확히 구하기 위해 제안된 방법이 기존의 검출 방법에 비해 얼마나 정밀도가 높은지

GFD(Grid Fault Device)를 연결하여 PSIM 시뮬레이션 프로그램을 통해 검증하였다.

2. 계통 지원을 위한 전압 검출

2.1 기존의 전압검출 방법

그리드 코드가 요구하는 계통 안정화를 위한 계통 지원을 수행하기 위해 필요한 계통 전압과 전류 등의 정보를 저장하고 계산하는 과정을 IEC 61400-21 2ed.에서는 Fig. 1과 같이 표현하였다. 전류센서와 전압센서를 통해 검출한 전류와 전압을 저역통과 필터를 거쳐 A/D converter를 통해 디지털로 변환한 후 DSP에서 정보를 처리하고 저장하게 된다.

풍력발전시스템의 경우 Table 1과 같이 Voltage Transformer와 Current Transformer, Anemometer등의 측정 장비들에 대해 정밀도를 요구하고 있으며 준수해야 할 규격 정보를 제시하고 있다. Fig. 2는 기존의 전압 검출 전체 블록도를 나타

Fig. 1 Assumed elements of measurement system in IEC 61400-21 2ed

Table 1. Specification of requirements for measurement equipment

Equipment	Required accuracy	Compliance with standard
Voltage transformer	class 1,0	IEC 60044-2
Current transformer	class 1,0	IEC 60044-2
Anemometer	$\pm 0,5[m/s]$	IEC 61400-12-1
Filter+ A/D converter+ data acquisition system	1[%]of full scale	IEC 62008

Fig. 2 Block diagram of the existing voltage detection method

낸다. Fig. 1과 같이 전압 정보를 샘플링 받아 아날로그 저역 통과 필터를 거친 후 AD 변환을 통해 DSP에서 정상분 추출 및 실효값 제어 알고리즘을 수행한다. 그리드 코드는 계통 지원을 위한 전압크기를 계산하는데 있어서 정상분 실효값을 적용할 것을 요구하고 있기 때문에 정상분 추출처리과정과 실효값 계산하는 알고리즘이 필요하다. 그리고 계통 전압이 정격보다 10%이상 낮아지면 저 전압 사고라고 판단하여 동적 계통 지원을 수행해야 하며 10%이내의 전압변동에서는 정상상태로 판단하여 정적 계통 지원을 수행할 것을 요구하고 있다.

2.2 기존 전압검출 방법의 문제점

동적 계통 지원 제어 성능을 검증받기 위해서는 Fig. 3(b)와 같이 GFD(Grid Fault Device)를 연결하여 저 전압 사고를 모의한다. GFD는 인덕터로 구성되어 있으며 직렬인덕터는 단락전류의 크기를 제한하는 역할을 하고 병렬 인덕터는 사고전압의 크기를 결정한다. GFD의 차단기는 아래 Fig. 3(a)과 같은 순서로 동작하는데 각 영역에 대해 설명하면 직렬인덕터가 계통에 연계되는 순간은 1번 영역으로 전압 사고 상황이 아닌 정상상태이다. 2번 영역은 저 전압 사고 상황이 되며 3번 영역은 사고 상황이 끝난 정상상태이며 임피던스 변화로 인한 과도상태가 완전히 잠식된 후에 CB1을 닫아 사고 모의 상황을 끝낸다. 각 영역에 대한 등가회로는 Fig. 3(b),(c)를 보면서 영역별로 변화하는 계통 임피던스가 전압 리플에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 인버터 출력단의 L필터의 크기가 1번 영역에서 투입되는 직렬인덕터보다 충분히 크지 않으면 필터의 능력이 저하된다. 인덕터의 용량은 설계 비용에 영향을 주기 때문에 L크기를 필터 능력을 향상하기 위해 무조건 키울 순 없다.

이런 현상은 인덕터 위주로 설계된 필터를 적용하는 소용

Fig. 3 Circuit breaker operation sequence of GFD and equivalent circuit of each part

량 인버터가 전압 사고를 모의하는 과정에서 계통 전압의 스위칭 리플을 고스란히 포함하게 한다. 2.1절에서 언급한 바와 같이 그리드 코드는 계통의 안정화를 위해 전압 크기에 따라 계통 지원을 달리 요구하는데 스위칭 리플이 포함된 전압으로는 정확한 전압을 계산하는데 어려움이 있다. 전압 사고 상황인 2번 영역에서도 전압 감소율에 따라 무효전류를 계통에 공급하여 계통 안정화에 기여해야 하는데 전압 리플로 정확한 전압을 계산하지 못하면 계통 연계 적합성을 만족시킬 수 없다. Fig. 2와 같이 AD 앞단에 저역통과 필터를 적용하여 고조파 리플을 제거하기 위해 노력하지만 보통은 주파수 응답을 같이 하기 위해서 스위칭 주파수보다는 큰 차단주파수를 적용한다. 이와 같은 기존의 방법이 정상상태에서는 별 문제가 없겠지만 그리드 코드가 요구하는 동적 계통 지원과 LVRT를 수행하기 위해서는 문제가 생긴다. 인덕터 위주로

Fig. 4 Simulation of sampling error using the existing voltage detection

설계된 소용량의 인버터를 저 전압 사고 상황에서의 계통 연계 적합성을 검증하기 위해 GFD를 연계하고 테스트를 하면 Fig. 3(b)처럼 직렬인덕터의 투입으로 계통 임피던스는 급변하고 인버터 출력단의 필터 성능에 영향을 미쳐 계통 전압에 스위칭 리플을 감쇄하지 못해 정확한 전압 크기를 계산하는데 방해요인이 된다. 정상상태인 Fig. 3(b)의 상황에서 인버터는 저 전압 사고 상황이라 판단하여 잘못된 계통지원을 수행할 우려가 있다. Fig. 4와 같이 스위칭 리플이 포함된 전압을 인버터가 리플의 낮은 값을 샘플링하면 마치 전압이 감소된 것처럼 인식하게 된다.

2.3 제안된 전압검출 방법

저 전압 사고 시 계통 연계 적합성을 검증하기 위한 과정에서 계통전압의 정확한 정보는 반드시 필요하다. 그러나 2절에서 언급한 것과 같이 인덕터 위주로 설계된 소용량의 인버터인 경우에는 계통 임피던스의 급변이 계통 전압에 스위칭 리플을 고스란히 포함하게 되어 정확한 전압의 크기를 계산하는데 어려움이 있다. 그래서 본 절에서는 전압 리플을 감소하기 위해 AD 앞단의 아날로그 저역통과 필터의 차단주파수를 변경하고 그로 인해 변하는 전압의 크기와 위상을 제어기를 통해 보상하여 정확한 전압을 검출하는 방법 아래 그림과 같이 제안한다.

Fig. 1과 같이 국제 규격에서는 계통전압과 전류의 정보를 검출하는데 있어서 AD 앞단에 아날로그 저역통과 필터를 적용할 것을 요구한다. 저역통과 필터의 차단주파수는 스위칭 주파수보다 큰 대역폭을 갖도록 설정하여 주파수 응답을 동일하게 갖도록 한다. 저역통과 필터는 2차 계수 버터워스 타입의 식 (1)과 같이 차단주파수를 설정한다. 저역통과 필터의 차단주파수는 1.5kHz로 스위칭 주파수의 0.5배에 해당하는 값을 적용하여 기본파에서의 크기와 위상의 변화를 보드선도

Fig. 5 Block diagram of the proposed voltage detection method

Fig. 6 Bode plot of analog low-pass filter

를 통해 살펴보면 크기는 거의 변화 없지만 위상이 약 3.21° 정도 지연됨을 볼 수 있다.

$$G(s) = \frac{kw_c^2}{s^2 + 2\zeta w_c s + w_c^2} \quad (1)$$

이런 위상지연 현상은 전압과 전류의 위상차를 유발하고 유효전력의 손실을 발생시켜 효율을 저해한다. 그래서 지연된 위상을 보상할 필요가 있는데 본 논문에서는 식 (2)와 같은 진상보상기를 적용하여 지연된 위상을 보상한다. 진상보상기의 보드선도는 Fig. 7(a)와 같으며 기본파에서 약 3°의 위상을 앞서게 함을 볼 수 있다. 저역통과 필터와 진상보상기의 전체 전달함수의 보드선도는 Fig. 7(b)와 같으며 기본파에서 크기와 위상변화가 0에 가까운 값을 가리켜 지연된 위상을 보상했음을 확인할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 5의 전체 블럭

도에서 각 단계의 파형을 보여주고 있으며 저역통과 필터를 통해 샘플링 오차를 해결하고 진상보상기를 통해 지연된 위상이 보상됨을 확인할 수 있다.

$$G_{LEAD}(s) = \frac{s + \omega_{LEAD}}{s + \alpha\omega_{LEAD}} \quad (2)$$

Fig. 7 Bode plot after phase compensation

Fig. 8 Simulation of the proposed voltage detection method

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

본 연구는 100kW 급의 인버터 기반의 분산발전 시스템을 대상으로 진행되었으며 GFD를 통해 국제 규격이 요구하는 저 전압 사고를 모의하여 PSIM 프로그램을 통해 제한한 알고리즘 성능을 검증하였다. 시뮬레이션 회로도와 파라미터는 아래와 같다.

3.2 시뮬레이션

GFD의 병렬인덕터를 조절하여 전압강하 50%에 해당하는 사고 전압을 모의하고 AD 앞단의 LPF의 차단주파수는 10kHz로 적용한다. Fig. 10에서 보듯이 GFD의 직렬인덕터가 연결된 1번 영역에서 계통전압의 리플이 심한 것을 확인할 수 있다. 이때 인버터가 DA로 출력한 상전압 파형을 보니 정상상태인 1번과 3번 영역에서 전압이 감소한 것처럼 출력하고 있다.

Fig. 9 Simulation circuit

Table 2. Simulation parameter

명 칭	값
계통전압	22.9[kV]
정격전압	380[V]
정격전류	152[A]
필터용 인덕터	0.3[mH]
인버터 용량	100k[W]
GFD의 직렬인덕터	0.04[mH] (저압 측으로 환산한 값)
기존의 LPF f_c	10[kHz]
제한하는 LPF f_c	1.5[kHz]

Fig. 11을 통해 기존의 LPF의 차단주파수를 1.5kHz로 변경하고 계통전압의 리플이 Fig. 10에 비해 많이 감소됨을 확인할 수 있다. 감소된 전압 리플에 따라 인버터 DA로 출력한 전압이 1번, 3번 영역에서의 전압이 감소하는 문제를 해결할 수 있다. 그리드 코드가 요구하는 계통 지원을 하기 위한 기준이 되는 정상분 전압의 실효값을 기존의 전압 검출 방법과 제안하는 전압 검출 방법의 차이를 Fig. 12를 통해 비교하였

Fig. 10 Simulation of the existing voltage detection

Fig. 11 Simulation of the proposed voltage detection method

Fig. 12 Comparison of voltage detection method

다. 정상상태이지만 직렬인덕터의 투입으로 전압리플이 발생하고 인버터의 DA가 출력하는 전압은 11%가 감소한 값을 가리고 있다. 10%이상의 전압강하는 정적 계통 지원이 아닌 동적 계통 지원으로 저 전압 사고 상황이라 인식한다. 정상상태를 사고 상황이라 잘못된 판단을 할 수 있는 문제를 제안하는 전압 검출 방법을 통해 해결할 수 있음을 그림12를 통해 검증할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 계통 안정화를 위한 계통지원을 수행하기 위해서는 정확한 계통 전압 검출이 필요함을 언급했다. 계통 지원은 정적 계통 지원과 동적 계통 지원으로 나뉘며 국제 규격에서 요구하는 정상분 실효값으로 표준 값 대비 10% 감소율 기준으로 결정된다. 인버터 출력단의 필터가 인덕터 위주로 설계 될 경우 기존의 전압검출 방법은 저 전압 사고 모의 시 직렬인덕터 투입으로 인해 생기는 전압 리플로 잘못된 전압 검출을 하게 되고 이것은 정상상태를 저 전압사고 상태로 판단하여 정확한 계통지원을 할 수 없음을 확인했다. 그래서 전압리플을 감소하기 위해 스위칭 주파수보다 작은 차단 주파수를 적용하고 지연된 위상을 진상보상기를 통해 보상하여 저 전압 사고 모의 시 정확한 전압 검출방법을 제안하였다. PSIM 시뮬레이션 프로그램으로 성능을 검증하였으며 추후 전원 사고모의 장치를 통해 실험을 진행할 계획이다.

References

- [1] N. Hoffmann, 2011, "A review on Fundamental Grid-Voltage Detection Methods under Highly Distorted Conditions in Distributed Power Generation Networks", Energy Conversion Congress and Exposition pp. 3045–3052, IEEE.
- [2] Jens Fortmann, 2011, "Wind Turbine modeling, LVRT field test and Certification", Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–7, IEEE.
- [3] Alfred Beekmann, 2010, "Evaluation of Wind Energy Converter Behaviour during Network Faults—Limitations of Low Voltage Ride Through Tests and Interpretation of the

Test Results", 9th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for offshore Wind Farms, IEEE.

- [4] IEC, 2008 "Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines", IEC 61400-21 ed.2, Wind turbines generator systems – Part 21.
- [5] FGW, 2010 "Demands on Modeling and Validating Simulation Models of the Electrical Characteristics of Power generation Units and Systems", Technical Guidelines for Power Generating Units-Part 4.
- [6] FGW, 2010 "Determination of electrical characteristics of power generating units connected to MV, HV and

EHV grids", Technical Guidelines for Power Generating Units-Part 3.

- [7] bdew, 2008 "Generating Plants connected to the Medium-Voltage Network", Guideline for generating plants' connecting to and parallel operation with the medium-voltage network.
- [8] Todd D. Batzel, 2007, "Instantaneous Voltage Measurement in PWM Voltage Source Inverters" Electrical Machines and Power Electronics nternational Aegean Conference, pp. 168-173, IEEE.
- [9] 신호준, 2011, "계통 연계형 풍력 발전 시스템의 LVRT 제어 전략", 전력전자학회, 제16권, 제2호, pp. 182-190.
- [10] 김성일, 2012, "풍력발전기 LVRT 시험에 따른 계통영향 분석", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, 대한전기학회, pp. 102-104.

안 현 철

2010년 광운대학교 전기공학과 공학사

현재 광운대학교 대학원 전기공학과 석사과정연구원
(E-mail : dalmor@nate.com)

송 승 호

1991년 서울대학교 전기공학과 공학사
1993년 동 대학원 전기공학과 공학석사
1999년 동 대학원 전기공학과 공학박사
2000년~2005년 전북대학교 전자정보공학부
조교수
2006년~2011년 광운대학교 전기공학과 부교수

현재 광운대학교 전기공학과 교수
(E-mail : ssh@kw.ac.kr)