

동기기를 사용한 계통연계형 가변속 풍력발전 시스템의 AC-DC-AC 컨버터 구현 및 제어

論 文

54B-12-6

Implementation and Control of AC-DC-AC Power Converter in a Grid-Connected Variable Speed Wind Turbine System with Synchronous Generator

宋丞鎬[†] · 金埜注^{*} · 咸年根^{**}

(Seung-Ho Song · Sung-Ju Kim · Nyon-Kun Hahm)

Abstract - A 30kW electrical power conversion system is developed for a variable speed wind turbine. In the wind energy conversion system(WECS) a synchronous generator with field current excitation converts the mechanical energy into electrical energy. As the voltage and the frequency of the generator output vary according to the wind speed, a 6-bridge diode rectifier and a PWM boost chopper is utilized as an ac-dc converter maintaining the constant dc-link voltage with only single switch control. An input current control algorithm for maximum power generation during the variable speed operation is proposed without any usage of speed sensor. Grid connection type PWM inverter converts dc input power to ac output currents into the grid. The active power to the grid is controlled by q-axis current and the reactive power is controlled by d-axis current with appropriate decoupling. The phase angle of utility voltage is detected using software PLL(Phased Locked Loop) in d-q synchronous reference frame. Experimental results from the test of 30kW prototype wind turbine system show that the generator power can be controlled effectively during the variable speed operation without any speed sensor.

Key Words : Variable Speed Wind Turbine, AC-DC-AC Converter, Boost Chopper, Grid Connection

1. 서 론

지난 10여년간 눈부신 발전을 거듭하고 있는 풍력에너지는 현재 전 세계에서 가장 빠르게 성장하는 에너지원이며 앞으로의 성장 가능성 및 잠재력도 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 이러한 성공을 뒷받침하고 있는 것은 풍력 터빈의 설계 및 생산 기술의 발전과 그에 따른 에너지 생산 비용의 절감을 들 수 있다. 좋은 풍황조건에서 운전되는 풍력발전기의 전력 생산 단가는 4cents/kWh이하로 보고되고 있으며 이러한 수치는 기존의 전통적인 에너지원, 즉 석탄, 석유 등에 의한 발전 원가와 경쟁할 만한 것이다. 더우기 국제 유가의 폭등, 국제적인 온실가스 감축 노력과 환경 보호에 대한 관심에 따라 각국에서는 신재생 에너지 보급 지원, 장려 프로그램을 제공하고 있으며 이러한 혜택을 고려할 때 풍력발전의 투자가치는 더욱 높아지고 있다.

기술적인 측면에서 보면 풍력발전기는 바람이 가지고 있는 유동에너지를 블레이드로 기계적인 운동 에너지로 변환한 후에 발전기를 구동시켜 전기 에너지를 생산하는 다단계 에너지 변환 장치이다. 이러한 풍력발전기는 바람의 속도 변화에 따라 생산할수 있는 전력의 양이 크게 변동하므로 별도의 에너지 저장장치를 설치하지 않는한 계통 연계형으로 운전되고 있으며 최근 생산되는 기종의 70% 이상이 고효율 운전과 기계적 스트레스의 저감을 위해 가변속 운전방식을

채택하고 있다[1-3]. 이러한 계통연계형 가변속 풍력발전을 위해서는 발전기의 가변 전압 가변주파수 출력 전력을 계통의 고정 전압 고정 주파수의 전력으로 변환하는 전력변환기가 필수적이다. 이러한 전력변환기는 가격이 저렴하고 효율이 높은 특성을 가져야 하며 넓은 속도 범위에서 발전기의 출력을 제어할 수 있어야 한다.

가변속 풍력발전시스템에 사용되는 발전기의 종류는 크게 유도기와 동기기로 구분된다. 유도기는 주로 권선형 유도기가 쓰이고 있으며 회전자 권선의 전류제어를 통해 부분적인 가변속 운전이 가능하다. 대용량 풍력발전시스템의 경우 블레이드의 회전속도가 수십 rpm정도로 낮으므로 일반적으로 기어박스를 사용하여 증속한 후에 유도발전기를 연결하는 방식이 많이 사용되고 있다. 이러한 이중여자형 유도발전시스템은 전력변환기의 용량이 작아 가격이 저렴한 장점이 있으나 유도기의 여자를 위해서는 외부에서 무효전력이 공급되어야 하며 가변속 운전범위도 제한되는 단점이 있다. 한편 동기기는 다극화가 용이하고 무효전력을 별도로 공급할 필요가 없으므로 기어박스를 사용하지 않는 기어레스형 풍력발전시스템에 주로 적용되고 있다. 특히 영구자석 동기 발전기는 크기가 작고 무게가 가벼우며 효율이 높아서 중소용량의 풍력 발전기로 많이 사용되어 왔다. 최근들어 영구자석의 가격이 저렴해지고 설계 기술이 발달하여 수백 kW 이상의 용량 범위에서도 영구자석 동기발전기를 사용한 상업용 풍력발전시스템이 늘어나고 있으며 2004년에는 3MW급 영구자석 풍력발전 시스템의 개발이 발표되기도 했다.

유도기를 사용하는 가변속 풍력발전시스템의 전력변환기로서는 back-to-back 구조의 양방향 PWM 컨버터가 필수적이지만 동기기를 사용하는 풍력발전시스템에서는 여자분전류의 별도 공급이 필요하지 않으므로 다이오드 정류기의 사용이 가능하다. 본 논문에서는 동기기를 사용한 가변속 풍

† 교신저자, 正會員 : 전북대학교 전자정보공학부 조교수

E-mail : songsh@chonbuk.ac.kr

* 非 會 員 : (주)코원텍 대표이사

** 非 會 員 : (주)인텍FA 선임연구원

接受日字 : 2005年 8月 3日

最終完了 : 2005年 10月 6日

력발전시스템용 전력변환기로서 ac-dc 변환부에 3상 다이오드 정류기와 boost 초퍼를 사용하고 dc-ac 변환부에는 3상 PWM 인버터를 사용한 ac-dc-ac 전력변환기를 연구 대상으로 하였다. 이러한 토폴로지의 특징은 ac-dc 변환부에 PWM 스위치를 하나만 사용하므로 전력변환 모듈의 가격이 저렴하며 직류단 전류의 피드백 제어를 통해 발전기의 출력 특성, 즉 발전 전압에 따른 전류 및 유효전력의 크기를 조절할 수 있다는 것이다[1][5-7].

다이오드 정류기와 dc-dc 컨버터가 결합된 2단계 구조의 ac-dc 변환기는 이미 참고문헌 [5], [6], [7]에서 사용된 바 있다. 예를들어 [5]에서 Buck-Boost 컨버터가 dc-dc 초퍼로 제안되었으며 초퍼의 출력전류는 풍력발전기의 최대 출력점을 추종하도록 제어된다. 그러나 초퍼 스위치의 전압 스트레스는 Boost 컨버터 보다 훨씬 크다. 또한 발전기와 선로의 누설 인덕턴스는 초퍼의 dc 인덕터로 사용될 수 없다. 참고문헌 [6]에서 제안된 제어 방법은 직류단에 커다란 용량의 배터리가 필요한 독립형 풍력발전 시스템에 기반을 두고 있다. 또한 참고문헌 [7]에서는 발전기 제어가 아닌 유도전동기 드라이브의 입력단 전류의 역할을 개선하기 위한 회로로서 이러한 2단계 구조를 사용하고 있다.

본 논문에서는 이러한 ac-dc-ac 컨버터를 사용하여 계통 연계형 가변속 풍력발전 시스템의 출력전력을 제어하기 위한 방법을 제안하였다. Boost 초퍼의 입력전류(발전기 출력 전류 및 토오크에 비례함) 지령값을 조절하여, 풍속이나 발전기 속도에 대한 정보 없이도 풍력발전기가 최대의 출력을 낼수 있는 운전점을 추종하도록 제어한다. dc-ac 변환부의 PWM 인버터는 직류단 전압을 일정하게 제어하여 입력단에서 들어오는 유효전력을 계통으로 내보내며, 무효분 전류를 독립적으로 제어하여 출력단 역률도 조절할 수 있는 기능을 가진다. 제안된 전력변환기의 구조는 스위칭 소자의 개수가 적으므로 가격이 저렴하고, 제안된 알고리즘은 풍속이나 발전기 속도를 위한 어떤 속도 센서도 필요 없으므로 구조와 설치가 간단하고 신뢰성이 높은 장점이 있다. 본 논문으로 제안된 알고리즘은 전북 부안군 해창 섬터에 설치되어 있는 수직/수평축 통합형 30kW급 풍력발전 시스템에 적용되었으며 현장 실험 결과를 통해 제안된 구조 및 알고리즘의 동작 특성을 확인하였다[8].

2. 풍력 에너지 변환 시스템

그림 1에 제안된 가변속 풍력발전 시스템의 전력변환 회로도와 제어 블록도를 나타내었다. dc-dc Boost 초퍼는 3상 다이오드 정류기와 IGBT 인버터 사이에서 위치하고 있으며, 입력 dc 전류는 풍력발전 시스템의 최대출력을 추종하도록 제어된다. 계통 연계형 PWM 인버터는 직류단 전압을 일정하게 유지하며 발전된 전력을 계통에 공급한다. 유효전력은 q축 전류에 의해, 무효 전력은 d축 전류에 의해 독립적으로 제어된다. 계통전압의 위상각은 소프트웨어 PLL(Phased Locked Loop)을 사용하여 검출한다. 각 부분의 구성과 제어 알고리즘에 관하여 다음 각 절에서 자세히 설명하였다.

2.1 최대출력점 운전을 위한 입력단 전류 기준값

단면적 A를 지나는 풍속 v의 바람이 가진 에너지는 풍속의 3승에 비례하며 이 중에서 블레이드에 의해 입력되는 파워는 (1)식과 같이 주어진다[9-10].

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 C_p \quad (1)$$

여기서 P_b : 블레이드 입력 파워 [W]

ρ : 공기 밀도 [kg/m^3]

A : 블레이드 회전 단면적 [m^2]

V_{wind} : 풍속 [m/s]

C_p : 블레이드의 출력 계수

출력계수는 블레이드의 공기역학적 특성에 의해 결정되는 일종의 에너지 변환 효율로서 블레이드 설계 데이터로부터 얻을 수 있으며 일반적으로 그림 2와 같은 형태를 가진다. 여기서 형축은 주속비(tip speed ratio, TSR) λ 로서 풍속과 블레이드의 회전에 따른 팁부분 선속도의 비율을 나타내며 식(2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

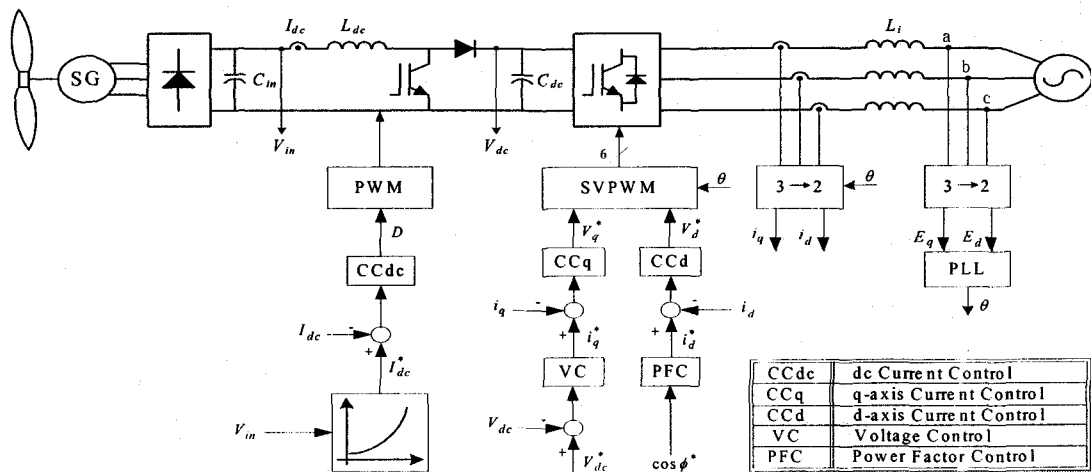


그림 1. 동기형 가변속 풍력발전기를 위한 ac-dc-ac 전력변환 회로도 및 제어 블록도

Fig. 1 Ac-dc-ac power converter and its control diagram for variable speed wind turbine using synchronous generator

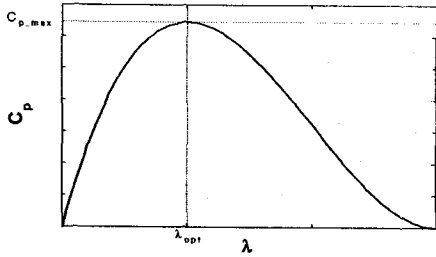


그림 2 주속비에 대한 출력계수 특성 곡선
Fig. 2 Power coefficient, C_p versus TSR curve

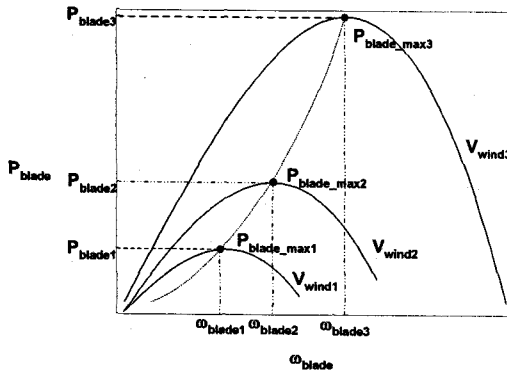


그림 3 풍속변동시 블레이드 파워와 회전속도의 관계
Fig. 3 Blade power as a function of the rotational speed in various wind speeds

따라서 풍속이 일정한 경우 블레이드의 파워는 블레이드의 출력계수에 따라 결정되며, 이 때 P_{blade} 를 회전속도에 대한 그래프로 그리면 그림 3에 보인 것과 같이 C_p 곡선과 같은 형태를 갖게 된다. 만일 풍속이 변동한다면 ($V_{wind1} < V_{wind2} < V_{wind3}$) 각각의 풍속에 따라 다른 그래프가 얻어진다.

블레이드의 출력계수가 최대값을 유지하도록 회전속도가 풍속에 비례하여 제어되고 있다면, 이러한 최대 파워 출력점에서 블레이드 파워는 (3)식에 보인 것과 같이 회전속도의 3승에 비례한다.

$$P_{blade_max} = \frac{1}{2} A \rho \left(\frac{\omega_{blade} R_{blade}}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot C_{p_max} \quad (3)$$

$$= K_{blade} \omega_{blade}^3$$

$$T_{blade_max} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} = K_{blade} \omega_{blade}^2 \quad (4)$$

따라서 이러한 최대출력점에서 블레이드의 입력과 출력(발전기의 부하토크)이 평형이 되는 조건은 발전기의 부하토크를 식(4)와 같이 회전속도의 제곱에 비례하여 인가하는 것이다. 물론 이를 위해 발전기 특성 계수들을 포함한 파라미터 K_{blade} 의 값을 정확히 알아야 한다. 만일 어느 회전속도에서 평형상태를 이루며 운전하던중 갑자기 풍속이 증가하면 입력파워가 증가함에 따라 잉여 토크로 인한 가속이 발생하게 된다. 이러한 회전속도의 증가에 따라 (4)식과 같이 회전속도의 제곱에 비례하여 발전기의 부하 토크를 증가시키면 다시 새로운 평형점에 도달하게 된다.

여차 전류가 일정할 경우 동기발전기의 회전 속도는 (5)에 보인 것과 같이 출력 전압의 피크값에 비례하므로 발전기의 회전 속도를 측정하는 대신에 다이오드를 통해 정류된 DC 출력 전압으로부터 회전속도정보를 얻을수 있다. 여기서 E_{max} 는 유기전압의 피크값, N 은 유효 턴수, Φ_p 는 극당 자속수, ω 는 회전속도를 의미한다[11].

$$V_{in} = E_{max} = N \Phi_p \omega \quad (5)$$

본 논문에서는 발전시스템이 최대출력을 낼 수 있도록 하는 발전기의 부하 전류를 식(6)와 같이 입력전압에 관한 2차 함수 형태를 갖도록 하였다. 즉 발전기 토크가 회전속도의 제곱에 비례하는 특성을 갖도록 설계한 것이다. 비례 상수 k 는 직류단 전압과 전류의 최소값과 최대값이 정해지면 자동으로 (7)식과 같이 계산되도록 하였다. 이와 같은 직류단 입력 전압에 따른 직류 전류의 패턴을 그림 4에 보였으며 이것은 발전기의 부하 특성 곡선을 의미한다.

$$I_{dc}^* = k (V_{in} - V_{in_min})^2 + I_{dc_min} \quad (6)$$

$$k = \frac{I_{dc_max} - I_{dc_min}}{(V_{in_max} - V_{in_min})^2} \quad (7)$$

만약 평형상태에서 운전중 갑자기 풍속이 증가하면 발생된 토크와 부하토크의 차이에 비례하여 회전 속도가 증가하게 되고 이에 따라 부하토크도 (4)식과 같이 증가하게 되어 결국 특성곡선 상에서 부하토크와 발생된 토크가 같아지는 새로운 동작점에서 운전하게 된다. 따라서 발전기는 항상 부하 특성곡선상의 평형점에서 운전하며 일정한 풍속에서 최대출력을 발생하게 된다.

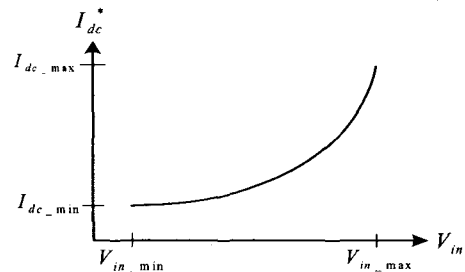


그림 4. 최대출력 파워를 위한 전류지령 곡선
Fig. 4 Current reference profile for maximum output power

2.2 Boost 초퍼의 PWM 전류 제어

그림 5(a)는 Boost 초퍼의 회로도이며 연속전류 구간에서 입력전압과 시비율의 관계는 (8)식과 같다. 일반적인 Boost 컨버터는 출력전압을 일정하게 제어하는 것을 목적으로 하는 경우가 대부분이지만 본 논문에서 사용된 부스트 컨버터는 출력전압은 PWM인버터 측에서 제어하고 Boost 컨버터는 입력단 직류 전류의 크기를 조절하는 기능을 수행한다. 스위치 양단 전압의 평균값을 V_s 라고 할 때 전압 방정식은 식(9)와 같다. 출력전압의 크기가 거의 일정하다고 가정하면 입력전류의 크기는 시비율, D 과 입력전압, V_{in} 의 크기에 따라 결정되는 것을 알수 있다. 따라서 본 논문에서는 입력 전류의 기준값과 피드백값의 오차를 비례적분 제어

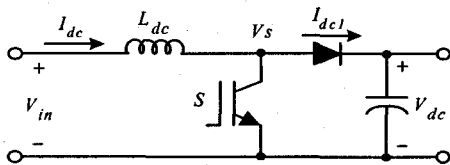
기로 보상하여 시비율을 조절하도록 피드백제어루프를 구성하였으며, 이 때 입력단 전압의 변동에 따른 영향을 보상하기 위하여 식(10)과 같은 시비율 전향보상항을 PI제어기 출력단에 더해주고 있다. 이 전향보상항은 식(9)에서 입력전압 또는 출력 전압이 변동하더라도 전류를 일정하게 유지하도록 하는 시비율을 계산한 것이다. 따라서 그림 5(b)와 같이 전향 보상항을 고려한 입력 전류 제어기를 구성할 수 있다.

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-D)} V_{\infty} \quad (8)$$

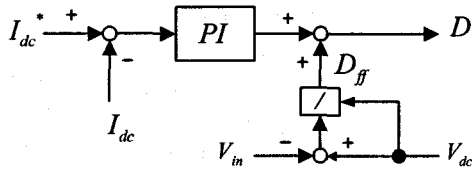
$$L_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} = V_{\infty} - V_s = V_{\infty} - (1-D) V_{dc} \quad (9)$$

단, V_s : 스위치의 평균 전압
 D : 시비율

$$D_{ff} = \frac{-V_{\infty} + V_{dc}}{V_{dc}} \quad (10)$$



(a)



(b)

그림 5. Boost 쇼퍼의 회로도 및 제어 블록도
 Fig. 5 Boost chopper (a) circuit and (b) control diagram

2.3 계통연계형 PWM 인버터의 유효 전력 제어

그림 1과 같은 구조를 갖는 3상 계통연계형 인버터에서 계통 전압과 인버터의 출력 전압사이의 전압 방정식은 동기 좌표계상에서 다음과 같이 정리된다[12].

$$E_d = L_i \frac{dI_d}{dt} - \omega L_i I_q + V_d \quad (11)$$

$$E_q = L_i \frac{dI_q}{dt} + \omega L_i I_d + V_q$$

이 때 계통측 전원 전압이 모두 q 축에 존재하도록 동기 위상각을 잡으면 전원전압은 다음 (12)식과 같이 표현된다. 이와 같은 위상동기루프는 모두 소프트웨어로 구성되어 있으며 자세한 내용은 참고문헌[12]에 자세히 설명되어 있다.

$$\begin{aligned} E_d &= 0 \\ E_q &= E \end{aligned} \quad (12)$$

이렇게 전원 위상각에 맞추어 전류제어를 수행하면 다음 (13)식에 보인 것처럼 유효전력과 무효전력이 독립적으로 제어되는 장점이 있다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (E_d I_d + E_q I_q) = \frac{3}{2} E I_q \\ Q &= \frac{3}{2} (E_q I_d - E_d I_q) = \frac{3}{2} E I_d \end{aligned} \quad (13)$$

전압제어기는 q축 전류 기준값을 조정함으로써 DC단 전압을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 풍력발전기에서

생산된 전력이 계통으로 출력되는 전력보다 많을 경우 직류단 전압은 상승하고, 반대의 경우는 직류단 전압이 떨어지게 된다. 즉 직류단 전압을 일정하게 제어한다는 것은 풍력발전기에서 생산된 전력을 모두 계통으로 출력시킨다는 것을 의미한다. 식 (12)에 구체적인 유효분 전류 기준값을 나타내었으며, 여기서 K_p^v 는 전압제어기의 비례 이득이고, K_I^v 는 전압제어기의 적분 이득이다.

$$I_q^* = K_p^v (V_{dc}^* - V_{dc}) + K_I^v \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (14)$$

한편 계통으로 출력되는 전력의 역률은 다음(15)식과 같이 계산되므로, 시스템의 전체 출력을 임의의 역률로 유지하기 위한 d축 전류 기준값은 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$pf = \frac{I_q}{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}} \quad (15)$$

$$I_d^* = \pm \sqrt{\frac{I_q^2}{pf^2} - I_q^2} \quad (16)$$

여기서 +는 지상, -는 진상 역률을 의미함.

전류제어기는 식 (14)와 식 (16) 에서 구한 q축 전류 기준값(I_q^*)과 d축 전류 기준값(I_d^*)을 실제 전류가 추종하도록 인버터의 합성 전압 기준값(V_d^*, V_q^*)을 출력하는 역할을 하고, 이와 같은 인버터 합성 전압 기준값(V_d^*, V_q^*)은 다음 (17)식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} V_d^* &= \omega L I_q - \left[K_p^i (I_d^* - I_d) + K_I^i \int (I_d^* - I_d) dt \right] \\ V_q^* &= E - \omega L I_d - \left[K_p^i (I_q^* - I_q) + K_I^i \int (I_q^* - I_q) dt \right] \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)의 전류제어기는 앞에서 구한 동기좌표계의 전압 방정식과 동일한 구조로 이루어져 있고, 여기서 K_p^i 는 전류 제어기의 비례 이득이고, K_I^i 는 전류제어기의 적분 이득이다. 이와 같은 전류 제어기는 전류오차와 전류에 대한 제한 성분(feedback), 그리고 역기전력 보상을 위한 전향보상성분으로 이루어져 있다.

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 ac-dc-ac 전력변환 회로 및 제어 알고리즘은 전북 부안군 해창 섬터에 설치되어 있는 30kW급 수직/수평축 통합형 풍력발전 시스템의 출력변환 및 계통 연계용으로 적용되었다. 그림 7 (a)는 듀얼 로터 풍력발전기의 외형 사진을 나타내며 그림 7(b)는 철탑 하부에 설치된 전력변환기 패널의 내부 사진이다. 풍력발전 시스템의 주요 사양은 표 1 에 보인 것과 같다[13]. 권선형 동기발전기는 철탑의 상부에 설치되어 있으며 회전 축이 수직방향으로 설치되어 주날개와 보조날개로부터 들어오는 토크를 기어박스를 통해 전달받아 회전하게 된다. 발전기 출력을 정류한 직류 전압 이외에도 입력단 스위치의 위치 변경을 통해 배터리등의 다른 직류 전원을 전력변환기 시험용으로 사용할 수 있도록 구성하였다. 그림 8부터 그림10 까지는 시험용 배터리 전원을 사용하여 전력변환기의 제어 동특성을 시험한 결과이고 그림 11과 그림 12는 실제 변동하는 바람을 통해 발전기가 회전하면서 실험한 결과이다.

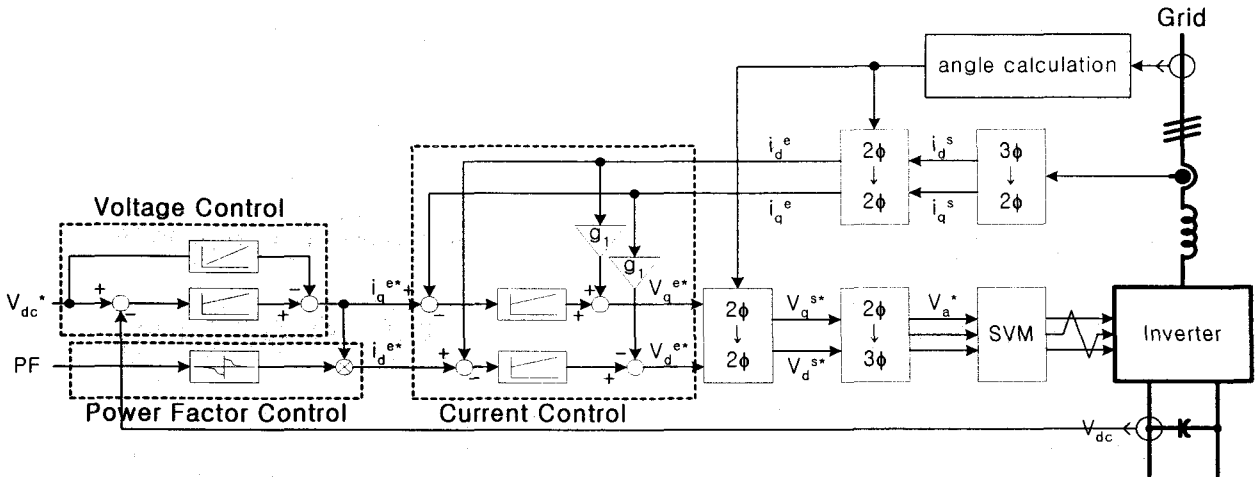


그림 6 계통연계형 인버터의 제어 블록도
 Fig. 6 Control block diagram of grid-connected inverter

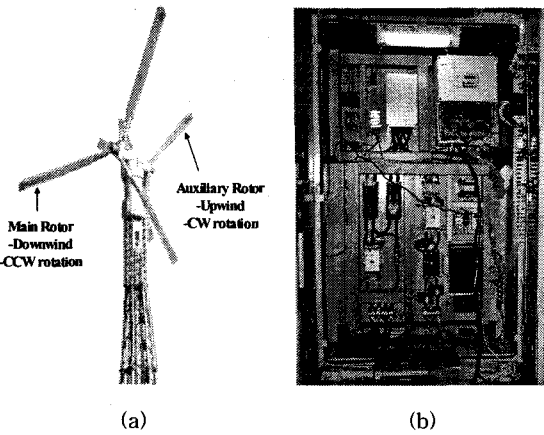


그림 7. 30kW급 풍력발전 시스템 (a) 쌍날개 풍력발전시스템 (b) 전력변환기 판넬
 Fig. 7 30kW wind power generation system (a) dual rotor wind turbine (b) power converter panel

표 1. 풍력에너지 변환시스템의 사양
 Table 1. Specification of wind energy conversion system

Parts	Specification
Wind Turbine	철탑부 높이 : 20m 주날개 지름 : 11m 보조날개 지름 : 5.5m
Generator	Synchronous Generator 4pole, 30kW, 3 phase 220V
Power Converter	Power : 30kVA IGBT 5kHz switching

그림 8은 입력 전류 기준값을 스텝으로 변경하였을 경우 초퍼의 dc 전류 제어와 dc 전압 제어를 보여준다. 입력 전류 기준값을 0에서 80A로 하였을 때 시비율을 조절하여 실제 입력 전류가 기준값을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이때 직류 링크로 들어가는 전력 때문에 직류단 전압이 일시적으로 상승하지만 계통연계 인버터측의 전압제어기가 동작하여 약 0.15초만에 평형값으로 회복되고 있음을 알 수 있다. 직류 입력 전류제어의 응답시간은 약 0.1초로 나타났으며 일

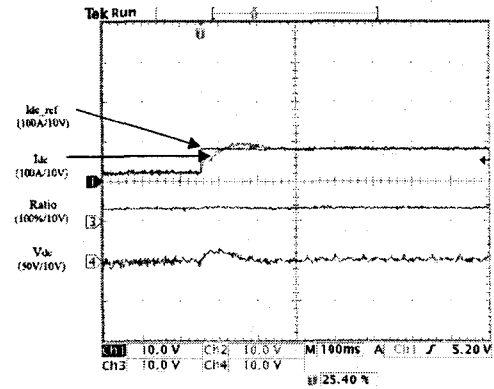


그림 8. Boost 초퍼의 전류제어 특성
 Fig. 8 Current control response of boost chopper

반적으로 풍력발전기의 회전관성이 크고 기계적인 응답시간이 수초인 것을 고려하면 전기적인 토크제어 응답성은 기계적 특성에 비해 충분히 빠른 것으로 간주될 수 있다.

그림 9는 입력 전류를 0에서 30A로 증가시켰을 때 출력 특성을 보여준다. 입력 전류 I_{dc}가 증가하여도 인버터의 전압 제어기는 직류단 전압을 360V로 일정하게 유지하여 결과적으로 q축 전류, 즉 유효전력을 계통에 공급한다. 이 때 d축 전류는 0으로 제어 되고 있으며 따라서 상전류의 피크값을 연결한 모양과 q축 전류의 크기가 같음을 보여주고 있다.

그림 10은 무효분 전류의 크기를 스텝모양으로 바꾸었을 때 과도상태 전류제어 특성을 보여주고 있다. 무효 전력을 제어하기 위해 d축 전류 지령값을 0에서 25A로 변화시켰을 때 q-축 전류, d-축 전류, 계통의 상전압, 그리고 계통의 상전류를 각각 나타낸다. 그림 10(d)에서 상전류를 그림 10(c)의 상전압과 비교하면 초기에는 역상(역률 1)으로 동작하지만 d축 전류를 25A로 제어하면 상전류의 위상과 크기가 달라지는 것을 볼 수 있다.

그림 11과 그림 12는 풍속에 따른 출력 제어 특성을 보여주고 있다. 입력 전압이 140V에서 250V로 변할 때 식(2)로부터 계산된 직류 전류 기준값 I_{dc}는 적절한 부하에 맞게 자동으로 조절된다. 상전류 I_{as}에서 피크값의 모양은 입력 전류 I_{dc}의 모양과 유사하다. 또한 그림 12에는 고속으로 운전중에

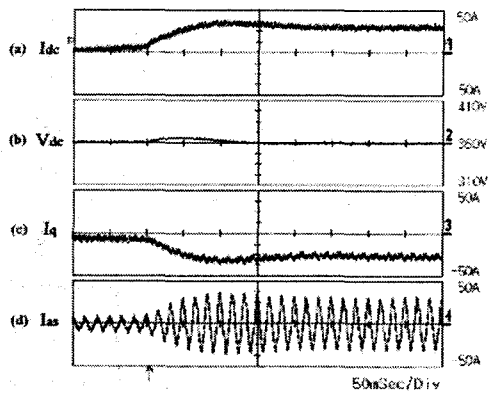


그림 9. 입력전류가 0 에서 30A로 변할 때 전력 제어 특성
 (a) 입력전류 I_{dc} (b) 직류단 전압 V_{dc}
 (c) q축 전류 I_q (d) 상전류 I_{as}
 Fig. 9 Power control performance during input current change from 0 to 30[A]. (a) input current I_{dc} (b) DC-link voltage V_{dc} (c) q-axis current I_q (d) phase current I_{as}

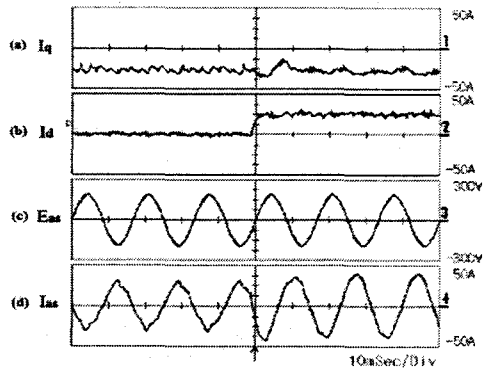


그림 10 q축 전류가 일정할 때 d축 전류에 의한 역률 제어
 (a) q축 전류 I_q (b) d축 전류 I_d
 (c) 계통의 상전압 E_{as} (d) 계통의 상전류 I_{as}
 Fig. 10 Power factor control by d-axis current change while q-axis current is constant (a) q-axis current I_q (b) d-axis current I_d (c) phase voltage of grid E_{as} (d) phase current from grid I_{as}

그림 11과 같은 파형을 시간축을 확대하여 다시 측정 한 것으로서 상전류 파형은 정현적이고 출력 선간전압에 관해 30도 위상차를 가지고 있으므로 출력 전력의 역률이 1로 잘 제어되고 있는 것을 나타낸다. 실제 운전중 출력전류를 대상으로 전고조파 왜율(THD)을 측정한 결과 최대 약 3.7%를 얻었으며 이 값은 분산전원 계통연계를 위한 국제규격[14]을 만족하는 값이다.

4. 결 론

동기기를 사용한 가변속 풍력발전시스템용 전력변환기로서 3상 다이오드 정류기와 boost 초퍼 및 3상 PWM 인버터로 구성된 ac-dc-ac 전력변환기를 제작하였다. 사용된 토폴로지의 특징은 ac-dc 변환부에 PWM 스위치를 하나만 사용하므로 전력변환 모듈의 가격이 저렴하며 직류단 전류의 피드백 제어가 가능하다는 것이다. 본 논문에서는 이러한 ac-dc-ac

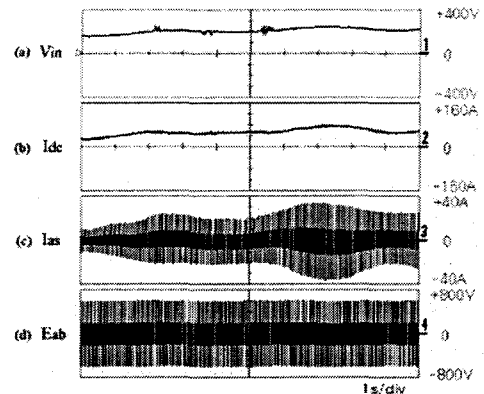


그림 11 30kW급 풍력발전기의 가변속시 전력 생산
 (a) 정류된 발전기의 dc 전압 (컨버터 입력)
 (b) 발전기 출력의 dc 전류(컨버터 입력)
 (c) 계통 연계형 PWM 인버터의 상전류
 (d) 발전된 계통 전압의 선간 전압
 Fig. 11 Variable speed power generation during field test of 30kw wind turbine system in Buan, Korea. (a) rectified dc voltage of generator output (converter input) (b) dc current of generator output (converter input) (c) phase current of PWM inverter to grid (d) line to line voltage of grid generated voltage

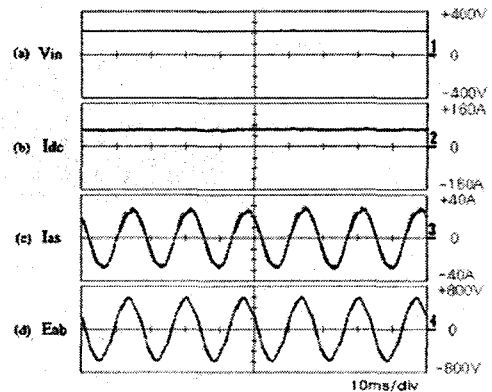


그림 12 그림 11의 시간축 확대
 (a) 정류된 발전기의 dc 전압 (컨버터 입력)
 (b) 발전기 출력의 dc 전류(컨버터 입력)
 (c) 계통 연계형 PWM 인버터의 상전류
 (d) 발전된 계통 전압의 선간 전압
 Fig. 12 Enlargement of time scale of Fig. 11 waveforms. (a) rectified dc voltage of generator(input of power converter) (b) dc current of generator output(converter input) (c) phase current of PWM inverter to grid (d) line to line voltage of grid generated voltage

컨버터를 사용하여 계통연계형 가변속 풍력발전 시스템의 출력전력을 제어하기 위한 방법을 제안하였다. 발전기 회전속도는 정류된 발전기 출력전압에 비례한다는 것에 착안하여 풍속이나 발전기 속도 센서를 사용하지 않고도 풍력발전기가 최대 출력점에서 운전될 수 있도록 Boost 초퍼의 입력전류 기준값을 조절하였다. 일반적인 Boost컨버터가 직류 출력 전압을 일정하게 제어하는 것이 목적인 반면에 본 논문에서 사용된 Boost 컨버터는 입력 전류 제어용으로 사용되었으므로 제안된 피드포워드 보상방법에 의해 입,출력전압 변동시에도

빠른 전류 응답특성을 얻을 수 있었다. dc-ac 변환부의 PWM 인버터는 직류단 전압을 일정하게 제어하여 입력단에서 들어오는 유효전력을 계통으로 내보내며, 무효분 전류를 독립적으로 제어하여 출력단 역률도 조절할 수 있는 기능을 가진다. 제안된 전력변환기의 구조는 스위칭 소자의 개수가 적으므로 가격이 저렴하고, 제안된 알고리즘은 풍속이나 발전기 속도를 위한 어떤 속도 센서도 필요 없으므로 구조와 설치가 간단하고 신뢰성이 높은 장점이 있다. 제안된 토폴로지와 제어 방식을 일반적인 Back-to-Back 토폴로지와 비교하면, 발전기측 전류에 고조파 성분이 많이 포함되나 스위칭 노이즈가 전체 풍력발전기 시스템 내부에 전파될 가능성은 적다. 실제로 이러한 토폴로지를 1MW 이상의 초대형 발전시스템에 적용하는 것은 직류단 리액터의 사이즈 등을 고려할 때 어려움이 많을 것으로 생각된다. 한편 본 시스템은 벡터제어를 위한 발전기 부하파라미터를 몰라도 되므로 제어가 간단하다는 장점이 있다. 본 연구에서 제안된 알고리즘은 전북부안군 해장 섬터에 설치되어 있는 수직/수평축 통합형 30kW급 풍력발전 시스템에 적용되었으며 현장 실험 결과를 통해 제안된 구조 및 알고리즘의 동작 특성을 확인하였다. 현재 출력 전류의 전고조파 왜율(THD)은 약 3.7%로서 분산전원의 계통연계를 위한 국제규격을 만족하지만 출력전류의 리플성분을 좀더 개선하기 위한 연구를 수행할 예정이며 전력용 필터 설계의 최적화 및 효율 평가등도 향후 연구 주제에 포함될 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (과제번호: R-2004-B-125) 주관으로 수행된 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고 문헌

[1] D. Schreiber, "Applied Designs of Variable Speed Wind Turbines And New Approaches" PCIM, pp. 2002.
 [2] F. Blaabjerg, Z. Chen, S.B. Kjaer, "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19 No. 5, pp. 1184-1194, Sept. 2004.
 [3] 정병창, 임종연, 송승호, 김영민, 노도환, 김동용, "중대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문학회 춘계학술대회 논문집, pp. 459~ 462, 2001.
 [4] L. Grzesiak, W. Koczara, M. da Ponte, "Application of A Permanent-magnet Machine in the Novel Hygen Adjustable-Speed Load-Adaptive Electricity Generating System", IEEE International Electric Machines and Drives Conf., pp. 398~400, 1999.
 [5] Y. Higuchi, N. Yamamura, M. Ishida, T. Hori, "An Improvement of Performance for Small-Scaled Wind Power Generating System with Permanent Magnet Type Synchronous Generator", IEEE IECON Conf., pp. 1037~1043, 2000.
 [6] S. Jiao, g. Hunter, V. Ramsden and D. Patterson "Control System Design for a 20kW Wind Turbine Generator with a Boost Converter and Battery Bank Load", IEEE PESC Conf., pp. 2203~2206, 2001.
 [7] M. V. Aware, S. G. Tarnekar, A. G. Kothari, "Unity power factor and efficiency control of a voltage source inverter-fed variable-speed induction motor drive", IEE

Proceedings-Electr. Power Appl., , Vol. 147 No. 5, pp. 422~430, Sept. 2000.

[8] S.-H. Song, S.-I. Kang, N.-K. Hahm, "Implementation and Control of Grid Connected AC-DC-AC Power Converter for Variable Speed Wind Energy Conversion System", IEEE-APEC Proceedings, pp. 154-158, 2003.
 [9] E. Hau, "Windturbines", Springer Verlag, 2000.
 [10] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley & Sons Ltd, 1998.
 [11] P.C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", 2nd Ed., John Wiley & Sons Ltd, 1997.
 [12] S.-J. Lee, J.-K. Kang, S.-K. Sul, "A New Phase Detecting Method for Power Conversion Systems Considering Distorted Conditions in Power System", IEEE-IAS Conf., pp. 2167-2172, 1999.
 [13] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력터빈 모의 실험을 위한 가변 토오크 입력형 시뮬레이터", 대한전기학회 논문지 B부문 제51권 8호, pp. 467~474, 2002.
 [14] IEEE, "1547 IEEE Standards for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", IEEE Std. 1547, pp. 8-10, 2003.

저 자 소 개



송 승 호 (宋 丞 鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2004년~2005년 미국 위스콘신 주립대 방문교수, 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 조교수.

Tel : 063-270-2392, Fax : 063-270-2394
 E-mail : songsh@chonbuk.ac.kr



김 성 주 (金 埤 注)

1958년 11월 13일생. 1985년 전북대 수학과 졸업. 1987년 동 대학원 응용수학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 응용수학과 졸업(이박). 1998년~2002년 (주)세스턴 고문. 2001년~현재 에너지관리공단 풍력기술연구회 실무위원(풍력사업단 운영위원). 2003년~현재 (주)코윈텍 대표이사

E-mail : sjk1113@kowintec.com



함 년 근 (咸 年 根)

1970년 3월 2일생. 1996년명지대전기공학과졸업, 1998년 동대학원 전기공학과졸업(석사), 2005년 동대학원 전기공학부졸업(공학박). 2000년~현재(주)인텍FA 책임연구원.

E-mail : nkahm@intech-fa.co.kr