

풍력발전용 기어리스 이중여자 유도 발전기

Gearless Doubly-fed Induction Generator for Wind Power Generation

박태식*, 문채주*, 김성환*
Taesik Park*, Chaejoo Moon*, Seonghwan Kim*

Abstract

As the demands for offshore wind power generation systems on a large scale have grown dramatically, and extensive developments in PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) and DFIG (Doubly-fed Induction Generator) wind turbine system have been going on. However, the wind power systems have been more sophisticated, and their reliability becomes critical issues. Averagely, wind turbines have shut down for about a week per year for repairs and maintenance. Especially the high speed gearbox of DFIG is inevitable components for high power generation, but becomes one of the critical failures. In this paper, a new reliable gearless wind turbine structure is proposed. The gearless wind turbine can operate on a maximum power points by controlling the speed of a rotational stator. The proposed approach is verified by PSIM simulations, resulting in increased energy reliability.

요 약

본 논문에서는 대형 풍력발전시스템에서 신뢰성 및 품질에 가장 큰 영향을 주는 기계적인 부품에 있어서 증속기어를 제거함으로써 잠재적인 고장 및 전력품질 저하의 문제점을 해결하고자 한다. 제안된 방식은 회전가능한 고정자와 슬립링을 적용하고, 고정자를 회전시킴으로써 기존의 증속기를 갖는 풍력발전시스템과 유사한 발전특성을 확보하고자 한다. 또한, 제안된 방식의 동작과 성능을 확인하기 위해 PSIM 시뮬레이션 패키지를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 성능을 검증하였다.

Key words : Wind, DFIG, Gearless, Power, Frequency

1. 서론

*Dept. of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University

★ Corresponding author

e-mail: shkim@mokpo.ac.kr tel: 061-450-2753

※ Acknowledgement

This paper was supported by Research Funds of Mokpo National University in 2014.

Manuscript received Jan. 5, 2017; accepted Jan. 24, 2016

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.

세계적으로 전력소비는 급격하게 증가하고 있고 미래 전력에너지의 부족과 화석연료에 의한 환경오염을 방지하고자 풍력, 태양광, 연료전지, 지열발전 등 다양한 형태의 대체에너지가 연구되고 있으며, 풍력발전은 이러한 문제를 해결하기 위한 주요 수단으로 부각되고 있다. 특히 해안영역에 1MW 이상의 대용량 풍력발전기의 설치가 주를 이루고 있다. 이러한 대부분의 대용량 풍력발전에는 이중여자 방식의 유도 발전기가 사용되고 있다. 하지만 이중여자 방식의 유도 발전기는 60Hz를 기준으로 설계되고, 풍속은 블레이드를 통해 10Hz 근방의 발전특성을 가지고 있다.

따라서 블레이드를 통해 들어오는 풍력으로부터 유도 발전기의 최대토크특성을 얻기 위해서는 60Hz에 근접한 속도입력이 필요하다. 이러한 이유로 대용량 이중여자 방식의 풍력발전기에는 증속 기어가 필수적으로 사용된다. 그러나 증속기어의 사용은 장기간 운전시 고장 및 수리 시간 증가에 주요한 원인으로 작용한다. 그림 1은 풍력발전기의 고장 부위에 따른 고장율을 보여준다.[1] 그림 1에서와 같이 고장율에 있어서는 전기적인 부품이 50% 가까운 고장률을 보여주고 있으나, 대개 1일 이내 수리가 가능하다. 기어박스, 드라이브 트레인 과 같은 기계적인 부품은 전체 고장의 10% 정도를 차지하고 있지만 수리기간은 거의 1주일이상인 소모된다. 또한 증속기어는 기어의 맞물림에서 발생 되는 백래쉬로 인해 발생전력상에 고조파 함유율이 높아지고, 따라서 계통과 연계되어 계통안정도 및 전력품질 저하에도 영향을 주고 있다. 따라서 본 논문에서는 대형 풍력발전시스템에서 신뢰성 및 품질에 가장 큰 영향을 주는 기계적인 부품에 있어서 증속기어를 제거함으로써 잠재적인 고장 및 전력품질 저하의 문제점을 해결하고자 한다. 또한, 제안된 방식의 동작과 성능을 확인하기 위해 PSIM 시뮬레이션 패키지를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 성능을 검증하였다.

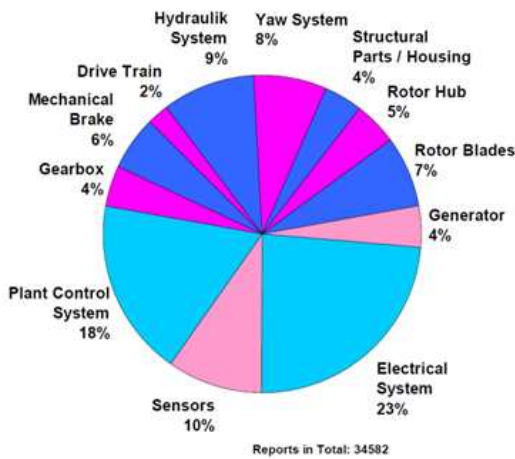


Fig. 1. Failures of wind turbines
그림 1. 풍력발전기의 고장률[1]

II. 기존의 DFIG 풍력발전 시스템

DFIG 풍력발전시스템은 그림 2에서와 같이 전체 용량의 30% 정도의 Back to Back 컨버터가 풍력발전기의 출력과 이중여자 유도발전기의

회전자측 코일 사이에 존재한다. Back to Back 컨버터는 회전자측 코일을 여기하여 풍력발전기의 출력이 60Hz의 출력을 발생시키도록 제어하고 풍력발전기의 무효전력과 유효전력을 제어하는 기능을 수행한다. 특히 회전자측은 슬립링을 통해 Back to Back 컨버터와 연결되어 전력의 흐름을 제어한다. 또한 DFIG의 풍력발전기가 최대출력을 낼 수 있도록 기어를 통해 증속을 행하게 된다.[2][3][4][5]

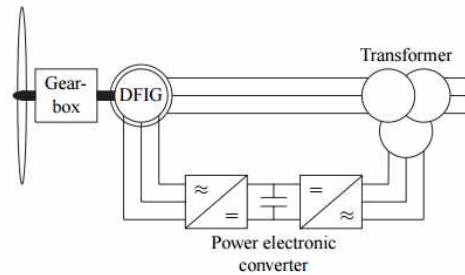


Fig. 2. Structure of the conventional DFIG
그림 2. 기존 DFIG 풍력발전시스템의 구성도

III. 제안된 기어리스 풍력 발전시스템

본 논문에서는 이중여자 방식의 유도발전기와 증속기어로 구성되는 대용량 풍력발전기에서 증속기어를 제거할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 블레이드에 연결되는 회전자와 회전이 가능한 고정자의 구조를 제안하였다. 제안된 방법은 회전이 없는 고정자 대신, 블레이드와 연결된 회전자가 회전을 시작하면 최대토크를 발생시킬 수 있는 주파수 특성을 갖도록 상대적인 방향으로 고정자를 회전시켜 주는 구조를 가지고 있다. 즉 증속기어 대신 블레이드의 방향과 역으로 회전하는 고정자의 구조를 기본 구조로 한다.

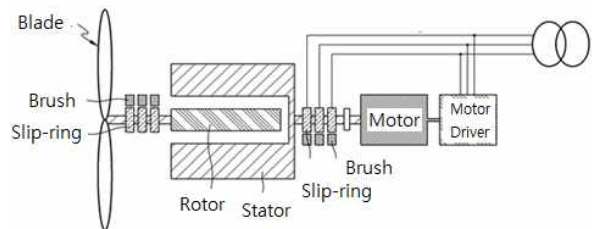


Fig. 3. Structure of the proposed wind turbine
그림 3. 제안된 풍력발전기의 구조

그림 3은 본 논문에서 제안된 기어리스 이중여자 풍력발전기의 구성도를 보여주고 있다. 고정자는 베어링을 통해 회전가능한 구조를 가지고 있으며, 외부에 전동기를 통해 고정자를 회전시킴

로서 최대토크영역에서의 운전이 가능하다. 또한, 고정자의 권선을 계통에 연결하기 위하여 3개의 슬립링과 브러시를 포함하고 있다. 그림 4는 이중여자유도발전기의 단상 등가회로를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 회전자측은 외부에서의 연결이 가능한 형태를 가지고 있으며, 회전자측 파라미터를 고정자측으로 환산한 등가회로이다. 여기서 V_s 는 고정자전압, V_r 은 회전자전압, R_s 는 고정자저항, R_r 은 회전자저항, L_s 는 고정자누설인덕턴스, L_r 은 회전자누설인덕턴스, L_m 은 상호인덕턴스, s 는 슬립, ω_1 은 고정자회전자계각속도, I_s 는 고정자전류, I_r 은 회전자전류를 의미한다. 등가회로에서 고정자전압과 회전자전압 그리고 슬립은 식 (1) 내지 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

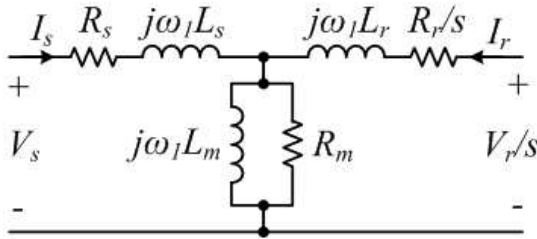


Fig. 4 Single Phase Equivalent circuit
그림 4 DFIG의 단상 등가회로

$$V_s = R_s I_s + j\omega_1 L_s I_s + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I) \quad (1)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_1 L_r I_r + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_r) \quad (2)$$

$$0 = R_m I + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_r) \quad (3)$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} \quad (4)$$

풍력에 의한 전기에너지 발전량은 기계적인 입력에너지에서 철손과 동손을 제외한 에너지량과 동일하다. 여기서 p_o 는 발전량, p_m 은 기계적인 입력에너지, p_i 는 철손, p_c 는 동손을 의미한다.

$$p_o = p_m - p_i - p_c \quad (5)$$

제안된 기어리스 이중여자 발전기의 등가회로는 그림 4에 기존의 이중여자 유도발전기와 동일한 형태를 보인다. 그러나 1차측, 즉 고정자가 ω_s 로 회전할 경우 슬립은 식(6)과 같이 표현할 수 있다. 따라서 슬립(s)를 제어함으로써 발전량을 제어할 수 있으며, 슬립(s)는 고정자의 회전속도(ω_s)를 통해 제어될 수 있다.

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_r - \omega_s}{\omega_1} \quad (6)$$

이상적인 유도발전기를 가정하여, 철손과 동손을 무시하면 기계에너지를 다음과 같이 표현할 수 있으며 발전량으로 간주할 수 있다. 즉 발전량은 슬립의 함수가 된다.

$$p_m = 3|i_r|^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = p_o \quad (7)$$

그림 5는 기어리스 DFIG의 동작 예를 보여주고 있다. 회전자는 블레이드와 직결되어 ω_r 로 회전하고, 회전자에는 ω_2 의 3상 전원이 인가되어 회전자계가 형성된다. 회전형 고정자는 ω_s 로 회전자와 반대로 회전하고 있으며, 고정자측에서는 슬립링을 통해 60Hz(ω_1)의 3상 전압이 출력된다.

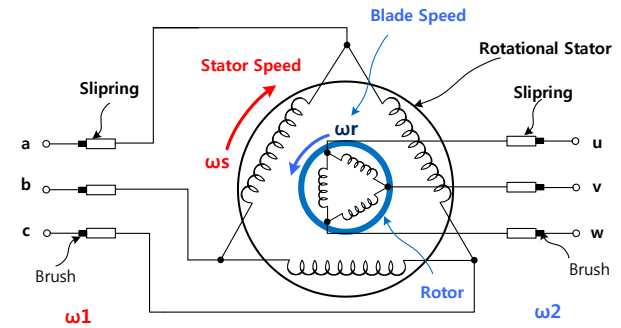


Fig. 5 Principle Operation of Gearless DFIG
그림 5 기어리스 DFIG의 동작원리

제안된 방식은 별도의 전동기를 구동시키기 위한 전동기 구동부가 필요한 단점이 있으나, 전동기 속도제어를 통해 최대 출력점에서 이중여자 유도발전기가 동작하도록 할 수 있다. 따라서 일반적인 유도발전기의 토크-속도 특성곡선과 유사한 동작특성을 확보할 수 있으며, 고정자 회전을 위한 전동기로서 PMSM 또는 직류 전동기를 사용할 수 있다. 전체적인 시스템의 구성은 그림 5와 같을 수 있다. 유도발전기를 통해 바람의 기계에너지는 전기에너지로 변환되고 컨버터는 상황에 적응하여 무효전력과 유효전력 제어를 수행하게 된다. 발전되는 전력의 양은 슬립에 따라 제어될 수 있다. 제안된 기어리스 이중여자 유도발전기는 입력속도를 측정하고 슬립이 일정하도록 제어할 수 있으며 슬립을 일정하게 제어할 경우 등가회로는 시변 파라미터 없이 일정한 등가회로가 되어 최대발전 제어를 수행하고 백 투 백 컨버터를 통해 주파수 제어를 수행할 수도 있다.

IV. 모의시험

본 논문에서 제안된 방식에 대해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 두 대의 이중여자 유도발전기를 연결하여 제안된 방식의 시뮬레이션을 구성하였다. 그림 6은 PSIM 시뮬레이션의 전체 개략도이며, 이중여자 유도발전기(A)에는 PMSM을 연결하여 풍력으로 인한 블레이드의 회전을 수행하도록 하였고, 이중여자 유도발전기(A)의 회전자측을 이중여자 유도발전기(B)의 고정자측에 연결하고, 이중여자 유도발전기(A)의 고정자측에는 3상전원이 연결되도록 하였다. 이중여자 유도발전기(B)의 회전자는 전동기로 구동이 가능하도록 하였고, 회전자측을 계통에 연결하도록 하였다. 그림 7은 PSIM 시뮬레이션의 결과를 보여 준다. 여기서 블레이드 속도와 회전자에 인가되는 전원의 주파수를 각각 10Hz로 하고 고정자는 전동기를 구동하여 40Hz로 회전하도록 하였다. 그림에서와 같이 고정자측을 통해 60Hz의 전압이 출력되고 출력전력은 p_o 와 같음을 알 수 있다.

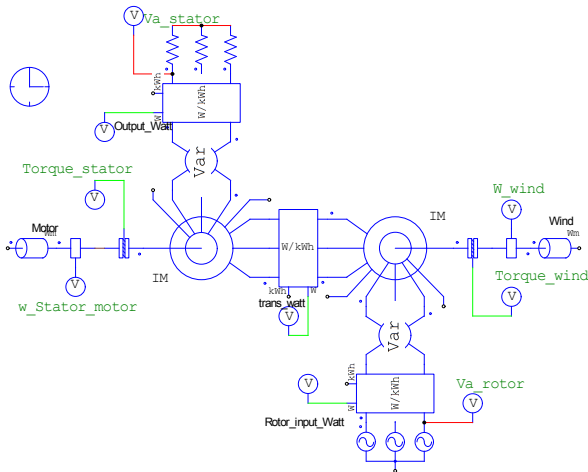


Fig. 6 Simulation schematics
그림 6 시뮬레이션 회로도 (PSIM)

V. 결론

본 논문에서는 새로운 기어리스 이중여자 유도발전기를 제안하였다. 제안된 방식은 증속기를 사용하여 이중여자 유도발전기의 입력속도를 증속하는 방식이 아니라 고정자를 최대전력 동작점에 일치하도록 회전시킴으로서 증속기와 동일한 효과를 얻을 수 있으며, PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 제안된 방식의 성능과 가능성을 입증하였다.

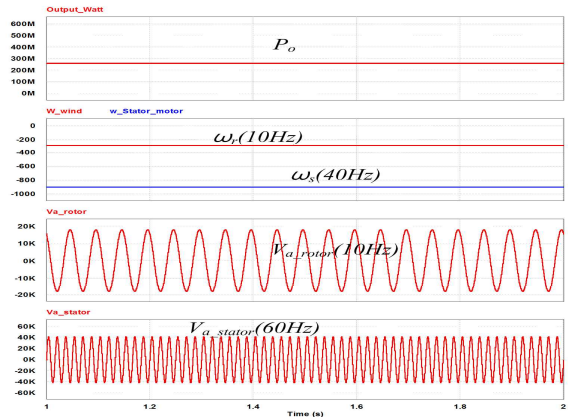


Fig. 7 Simulation Results
그림 7 시뮬레이션 결과

References

[1] Berthold Hahn, Michael Durstewitz, Kurt Rohrig, "Reliability of wind turbines : Experiences of 15 years with 1500WTs," *ISET*, Germany. DOI: 10.1007/978-3-540-33866-6_62

[2] Blaabjerg F., Chen Z., Kjaer Sb : "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.19, No.5, 2004, pp.1184-1194. DOI: 10.1109/TPEL.2004.833453

[3] Polinder, H., Frank F. A. et al.: "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.21, No.3, 2006, pp.725-733. DOI: 10.1109/TEC.2006.875476

[4] Babu Chitti and Mohanty K.B., "Doubly fed induction generator for variable speed wind energy conversion systems - Modeling and simulation," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 1, 2010, pp.141-147

[5] Chinchilla Monica, Arnaltes Santiago and Burgos Carlos Juan, "Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, 2006, pp.130-135. DOI: 10.1109/TEC.2005.853735