

DFIG 풍력발전시스템에 관한 연구

한 상열¹⁾, 차 삼곤²⁾, 최 원호³⁾, 이승구⁴⁾

Study on Doubly Fed Induction Generator in a wind turbine

Sangyul Han, Samgon Cha, Wonho Choi, Seungkuh Lee

Key words : Wind turbine(풍력발전), DFIG(이중여자 권선형유도기)

Abstract : This paper shows operating characteristics of DFIG(Double Fed Induction Generator) for wind turbine. The back to back PWM voltage-fed inverter connected between the rotor and grid network operated sub and super-synchronous operating mode, and the vector-controlled DFIG enables the decoupling between active and reactive power as well as between torque and power factor. This paper is validated by simulations and experimental results.

Nomenclature

Ls: 고정자의 누설 인덕턴스, H
Lr: 회전자에 누설 인덕턴스, H
Lm: 상호 인덕턴스, H
 ω_s : 고정자 회전각속도, rad/s
s: 슬립

subscrip

DFIG : doubly fed induction generator
PLL : phase lock loop
LPF : low pass filter
THD : total harmonic distortion

1. 서론

현재 풍력발전은 신재생 에너지분야에서 급속한 성장을 이루고 있으며 국내에서도 750kW급 Geared Type과 750kW급 Gearless Type이 개발 완료되어 현재 실증 운전중에 있다. 이중 당사에서는 750kW급 Geared Type 풍력발전시스템을 개발

하였으며 이 시스템은 권선형 유도발전기를 적용하여 DFIG(Doubly Fed Induction Generator) 시스템으로 구현되었다. DFIG 시스템은 권선형 유도기의 회전자에 전력변환기를 설치하여 시스템 운전범위가 기존의 농형유도기에 비하여 넓으며 이에 적용하는 전력변환기 용량도 Gearless Type에 비하여 작게 되는 장점이 있다. 따라서 본 고에서는 750kW DFIG 풍력발전과 이에 적용한 전력변환기에 대한 특성을 고찰하고자 한다.

2. DFIG 풍력발전시스템

DFIG 시스템의 특징은 유도기가 동기속도

-
- 1) (주)효성 중공업연구소
E-mail : syhan@hyosung.com
Tel : (02)707-4367 Fax : (02)707-4398
 - 2) (주)효성 중공업연구소
E-mail : ssamkkoni@hyosung.com
Tel : (02)707-4371 Fax : (02)707-4398
 - 3) (주)효성 중공업연구소
E-mail : choiwh@hyosung.com
Tel : (02)707-4370 Fax : (02)707-4398
 - 4) (주)효성 중공업연구소
E-mail : sklee1@hyosung.com
Tel : (02)707-4301 Fax : (02)707-4398

(Synchronous speed) 이하에서도 발전이 가능하다는 것으로 그림 1 에 동기속도이하 모드와 동기속도 이상인 모드에서의 전력수준계를 나타내었다.

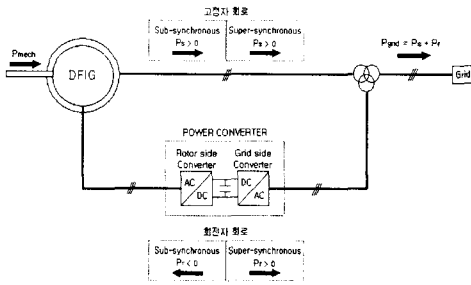


Fig. 1 속도모드에 따른 전력수준계

2.1 DFIG 모델링

DFIG의 모델링은 권선형 유도기와 동일하다. 유도기의 3상 전압을 상변환을 통해 2상으로 변환하고 이를 동기좌표계로 변환한 전압 방정식은 다음 식(1)-(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} \quad (2)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s \omega_s \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \quad (3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s \omega_s \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \quad (4)$$

또한, 유도기의 고정자와 회전자측 쇄교자속은 다음 식(5)-(8)과 같이 표현된다.

$$\Psi_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5)$$

$$\Psi_{qs} = (L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6)$$

$$\Psi_{dr} = (L_r + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (7)$$

$$\Psi_{qr} = (L_r + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (8)$$

간략하게 DFIG 시스템을 나타내면 식(9)-(12)와 같이 표현된다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s ((L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}) \quad (9)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s ((L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}) \quad (10)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s \omega_s ((L_r + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}) \quad (11)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s \omega_s ((L_r + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}) \quad (12)$$

유효전력 P는 식(13)이고 무효전력 Q는 식(14)로 나타낸다.

$$P = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_{as} i_{qr} \quad (13)$$

$$Q = \frac{3}{2} V_{as} \left(\frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{V_{qs}}{\omega_s L_s} \right) \quad (14)$$

2.2 DFIG 시뮬레이션

그림 2는 PSCAD를 이용한 DFIG 시스템으로써 계통에 연계된 권선형 유도기와 이 유도기의 회전자측 전류 제어를 위한 전력변환기를 모델링하였으며 시스템의 전압, 전류를 측정하기 위한 센서 및 전류제어를 위한 제어 블록을 추가하였다.

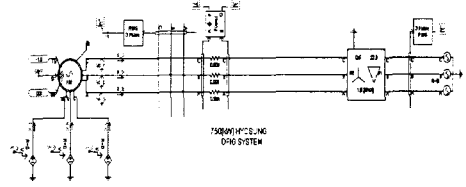


Fig. 2 DFIG 시스템 모델링

2.2.1 속도제어

발전기의 토크는 회전자의 i_{qr} 전류를 제어함으로써 구현되는데 이를 위해서는 발전기 속도에 따른 토크 지령치를 알고 있어야 한다. 이 지령치는 Bladed for windows 라는 풍력발전시스템 시뮬레이션 S/W를 통하여 얻을 수 있다. 그림 3은 발전기 속도제어 루프를 나타낸 것이다.

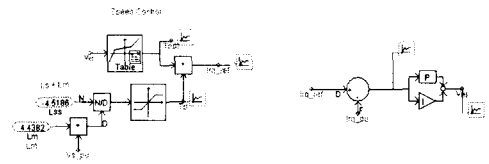


Fig. 3 속도제어루프

2.2.2 전압제어

권선형 유도기의 회전자 i_{dr} 전류는 유도기의 여자전원으로 사용되며 이 전류 제어를 통하여 고정자 전압이 600[V]가 되도록 구현한다. 그림 4는 발전기 전압제어 루프를 나타낸 것이다.

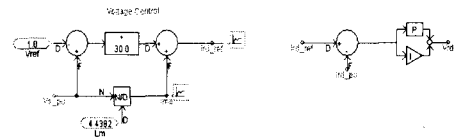


Fig. 4 전압제어루프

2.2.3 고정자전압의 상변환

그림 5는 고정자 전압의 3상/2상 변환과 계통전압의 위상 제어를 위한 PLL 및 2상전압 변환 블록을 나타낸 것이다. 이 때의 고정자 전압의 기준값은 상전압의 최대값이 489.9[V]를 기준으로 하였으며 LPF 블록을 추가하였다.

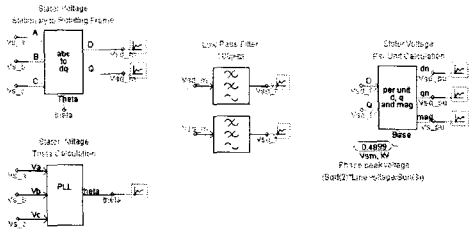


Fig. 5 고정자전압의 상변환

2.2.4 회전자전압의 상변환

그림 6은 회전자 전류의 3상/2상 변환 블록을 나타낸 것이며 이 때의 회전자 전류의 기준값은 274.8[A]로 하였다.

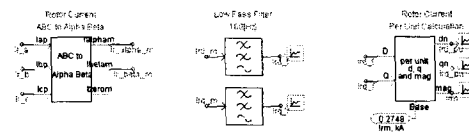


Fig. 6 회전자전류의 상변환

2.2.5 시뮬레이션 결과

그림 7은 유효전력(Ps)과 무효전력(Qs)을 나타낸 것으로 정격토크에서 고정자 출력은 640[kW]로 회전자측을 고려한 발전시스템의 정격출력은 750[kW]가 된다. 그림 8과 9는 전기적 토크와 회전자측의 상전류를 나타낸 것이다.

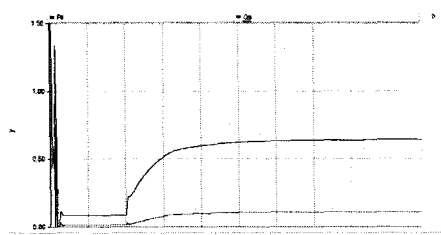


Fig. 7 유효전력 및 무효전력

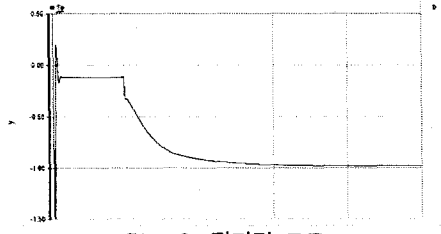


Fig. 8 전기적 토크

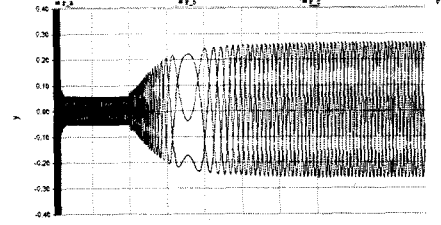


Fig. 9 회전자측 상전류

3. DFIG용 전력변환기

그림 10은 DFIG 풍력발전시스템을 나타낸 것으로 유도기의 회전자측 전력변환기와 결선되고 슬립전력을 제어하게 된다. 이 계통 연계형 전력변환기의 주요 구성은 제어보드, IGBT 스택, 필터류 및 각종 전압, 전류 센서로 이루어져 있다.

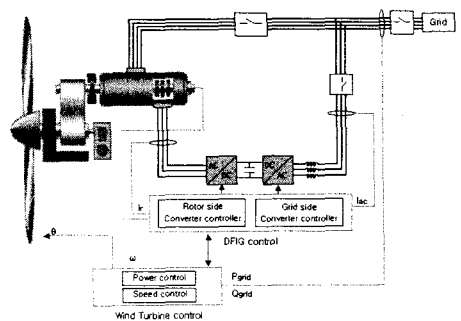


Fig. 10 DFIG 풍력발전시스템 개념도

3.1.1 IGBT 스택

IGBT 스택은 SEMIKRON社의 SKiiP를 적용하였으며 DC-Link 전압은 950[Vdc]로 설정하였다. 그림 11에 IGBT 스택을 나타내었다.

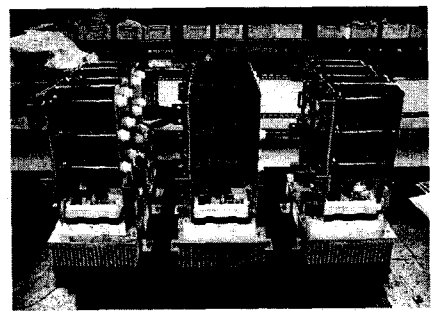


Fig. 11 SEMIKRON사의 IGBT 스택

3.1.2 리액터 및 dv/dt 필터

전력변환기는 발전시 규정에서 제한하고 있는

5%이내의 THD를 만족하도록 리액터 용량산정이 이루어졌으며 전력변환기와 유도기 회전자사이 전력변환기 스위칭 동작으로 발생하는 서지전압을 억제하기 위하여 dv/dt 필터를 삽입하였으며 이로 인해서 유도기의 회전자에 가해지는 전압 스트레스를 줄일 수 있다. 그림 12에 리액터 및 dv/dt 필터를 나타내었다.

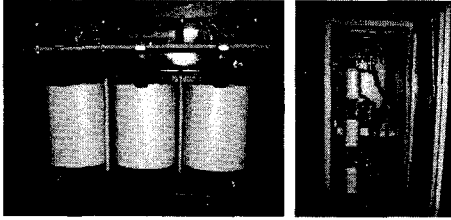


Fig. 12 리액터 및 dv/dt 필터

3.1.3 전압 및 전류 센서

전력변환기를 위한 전압 및 전류 센서로는 LEM社 제품을 적용하였으며 전압센서는 LV25-600과 LV25-1000을 적용하였으며 회전자 및 고정자의 전류를 측정하기 위한 전류센서로는 HAL-300과 HAL-600을 적용하였다. 그림 13에 각 센서의 위치를 나타내었다.

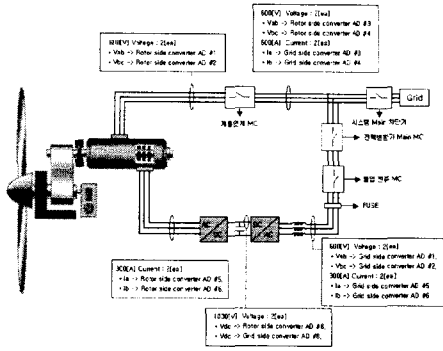


Fig. 13 전압 및 전류센서의 위치

4. DFIG용 전력변환기 출력시험

제작 완료된 전력변환기의 출력시험은 (주)효성 창원공장에서 이루어졌다. 출력시험장치는 권선형 유도기와 DFIG용 전력변환기로 구성되었으며 권선형 유도기를 구동시키기 위한 유도기와 이 구동용 유도기를 속도 제어하는 구동용 드라이버가 추가되었다. 그림 14는 출력시험을 통하여 얻어진 운전범위에 따른 고정자와 회전자의 출력곡선을 나타낸 것으로 고정자와 회전자의 출력의 합을 계통에 인가하게 된다.

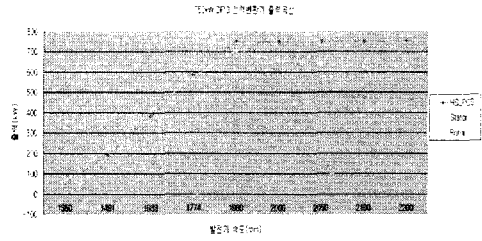


Fig. 14 DFIG용 전력변환기 출력곡선

4. 결론

본 고에서 소개한 DFIG 전력변환기는 현재 대관령 실증단지에 설치되어 시험 운전중이며 풍력발전시스템의 전력품질을 측정 지장하기 위하여 별도의 전력품질 측정 장치를 설치하여 측정중에 있다. (주) 효성은 DFIG 풍력발전시스템에 적용한 전력변환기를 개발 완료하였으며 이를 최적화하는 과제가 수행중에 있다.

후기

본 연구는 750kW급 Geared Type 풍력발전시스템 개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, Y. H., Kim, I. E., 2000, "풍력발전을 위한 회전변류기가 없는 이중여자 유도기의 전력 제어," 전력전자학회 논문지, Vol 5., No. 5, pp451~458, 2000
- [2] L. Morel, H.Godfroid, 1998, "Double-fed induction machine: converter optimisation and field oriented control without position sensor" IEE Proc-Electr, Power Appl, Vol. 145, No.4, pp360-368, 1998.
- [3] A. Perdana, O. Calson, 2004, "Dynamic response of Grid-Connected wind turbine with doubly fed induction generator during disturbance" Nordic workshop on power and industrial electronics. 2004
- [4] B.K.Bose, 1998, "Power Electronics and AC drives" Prentice-Hall, pp207-230, 1998
- [5] L Schreier, M Chomat, 1998, "Operation of system double fed machine turbine in power network" IEE Power Electronics and Variable Speed Drives, No. 475, 2000