

# DFIG의 고정자 계통연계시 인덕턴스 변동을 고려한 최적 전류제어

신수철\*·유재성\*·홍정기\* 송승호\*\*  
(주)효성\* 광운대학교\*\*

## Optimized Current Control considering Inductance Variations after Grid Connection of DFIG Stator

Soo-Cheol Shin\*·Jae-Sung Yu\*·Jung-Ki Hong\* Seung-Ho Song\*\*  
Hyosung Inc\*. Kwangwoon Univ.\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 이중여자 발전기를 사용하는 풍력발전기에서 안정적인 계통투입을 위한 계통연계 전 후 발전기의 인덕턴스 변화에 따른 전류제어기 이득 값 선정에 대하여 연구하였다. DFIG(Doubly Fed Induction Generator)방식을 이용하는 풍력발전기는 회전자 전류제어를 함으로써 고정자의 전압을 제어하고, 제어된 고정자 전압은 계통과 연결된다. 특히 회전자 전류제어기 성능은 LVRT(Low Voltage Ride Through)등 예상하지 않은 외란에 대하여 빠른 응답성을 필요로 한다. 그러나 발전기가 계통과 연계되는 순간 발전기의 내부 파라미터 값의 변동이 발생하며, 이는 계통 투입 전 발전기 파라미터에 근거한 RSC(Rotor Side Converter)측 전류제어기 이득 값에 영향을 미쳐, 전류제어기가 불안정하게 하는 원인이 되거나, 전류제어 응답성을 낮추게 하는 요인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 계통 투입 전 후의 RSC측 전류제어기의 이득 값을 달리하여 안정적인 계통 투입이 가능하도록 하는 알고리즘을 시뮬레이션과 실험으로 증명하였다.

발전기를 사용하는 풍력발전시스템은 상대적으로 바람의 이용률이 낮고, 증속기가 추가로 설치되어야 하지만, 발전기 제작 단가가 낮고, 발전기 정격용량의 30% 이하의 정격용량을 갖는 전력변환기로 발전제어가 가능하므로 전체 풍력발전 시스템의 가격측면에서 동기발전기를 사용하는 방식에 비해 유리한 장점을 가지고 있다. [2][3]

이중여자자유도발전기는 회전자 권선과 고정자 권선으로 나뉘며, 회전자 권선은 전력변환기의 RSC와 직결되고, 고정자 권선은 계통과 직결되는 구조로 이루어져 있다. RSC는 발전기 파라미터를 고려하여 회전자권선의 전압을 제어한다. 그러나 이중여자자유도발전기는 계통 투입 전과 투입 후의 파라미터 변동이 크기 때문에 RSC를 제어하는 전류제어기는 파라미터 변동에 의한 영향을 고려하여야 한다.

본 논문에서는 DFIG의 파라미터 변동을 고려한 RSC 제어로, 계통 투입 시 고정자 권선의 돌입전류 최소화 알고리즘을 PSIM6.0 과 Visual C++을 이용하여 시뮬레이션으로 증명하고, 당사가 보유하고 있는 2.6MW 유도전동기와 750kW DFIG Set을 이용하여 실험으로 검증 하였다.

### 1. 서론

수년간 계속된 에너지 가격 상승과 지구 온난화의 주범인 온실가스에 대한 배출 규제에 인하여, 에너지 고갈의 염려와 배출가스의 규제로부터 자유로운 풍력, 소수력, 조력, 태양광, 태양열 등 신.재생 에너지에 대한 관심이 점점 높아지고 있으며, 이중에서 풍력발전은 실용화에 가장 근접한 에너지로 알려져 있다. [1]

최근 생산되는 풍력발전 기종의 대부분이 고효율 운전과 기계적 스트레스의 저감을 위해 가변속 운전방식을 채택하고 있으며, 이를 위해서는 발전기의 가변 출력 전압, 주파수를 전력 계통의 고정 전압, 주파수와 동기 시킬 수 있도록 제어하는 전력변환 장치가 필수적이다. [2]

가변속 운전방식을 채택하는 풍력발전기에는 크게 동기발전기를 사용하는 방식과 이중여자자유도발전기를 사용하는 방식으로 나뉜다. 동기발전기를 사용하는 풍력발전 방식은 발전기의 전 속도 영역에서 발전 운전을 할 수 있어 이중여자 유도발전기를 사용하는 풍력발전 방식에 비해 바람의 이용률이 높은 장점이 있으나, 대형 동기발전기의 제작단가가 높고, 발전기의 정격용량과 동등한 정격용량을 갖는 전력변환기가 필요하여, 상대적으로 설비비가 비싼 단점을 가지고 있다. 이중여자자유도

### 2. 본론

#### 2.1 RSC측 전류제어기

그림 1은 Anti-windup을 갖는 PI 제어기 이다. 일반적으로 PI 제어기의 특성을 나타내는 변수는 페루프의 주파수 대역이다. 이 주파수 대역은 전류제어기의 제어주기 혹은 샘플링 시간과 PWM의 스위칭 주파수에 의하여 제한되며, 통상 스위칭 주파수의  $\frac{1}{20}$  정도에서 안정적인 주파수 대역을 갖는다. [5][6]

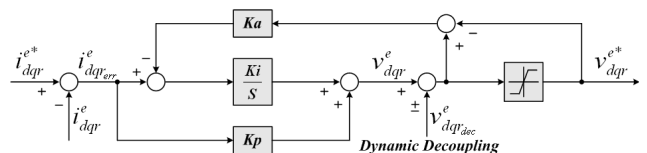


그림 1 이중여자자유도 풍력발전기의 회전자측 전류제어기  
Fig. 1 Current Controller of RSC for DFIG

#### 2.2 계통 투입 전후 DFIG의 파라미터 변동

그림 2는 DFIG의 고정자 권선과 계통을 도식화 한 것으로, 통상적인 전류제어기 이득 값은 식 (1),(2)와 같

다.<sup>[4][5][8][9][10]</sup>

$$K_p = L \omega_c \quad (1)$$

$$K_i = R \omega_c \quad (2)$$

그러나, 회전자 전류제어를 위한 DFIG의 파라미터는 계통 투입 전, 후의 차이가 크다. 계통 투입 전 DFIG의 인덕턴스는 식 (3)과 같고, 계통 투입 후의 등가 인덕턴스는 식 (4)와 같다.

$$L = L_m + L_{lr} \quad (3)$$

$$L = \sigma L_r + L_L \quad (4)$$

여기서,  $L_L$ 은 계통선로의 등가 인덕턴스이다.

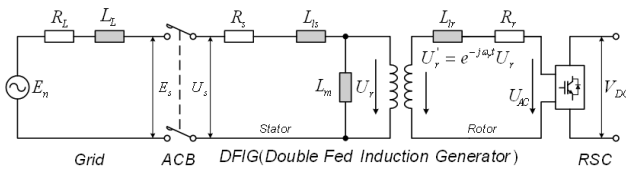


그림 2 이중여자유도 풍력발전기의 계통연계 등가회로  
Fig. 2 Grid Connection Equivalent Circuit of the DFIG

### 2.3 가변 이득 값을 적용한 전류제어기

가변 이득 값을 갖는 전류제어기를 설계하기 위하여 먼저 전류제어기의 주파수대역을 설정하고, 그 다음 적분 시정수의 범위를 설정한다. 식(5)는 계통 투입 전 전류제어기의 비례이득 값이고, 식(6)은 계통 투입 후 전류제어기의 비례이득 값이다.<sup>[5][6]</sup>

$$K_{p1} = (L_m + L_{lr}) \times \frac{N_r}{N_s} \times \omega_c \quad (5)$$

$$K_{p2} = (\sigma L_r + L_L) \times \frac{N_r}{N_s} \times \omega_c \quad (6)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (7)$$

여기서,  $\sigma L_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$  이다.

선로 인덕턴스 성분  $L_L$ 은 발전기가 연결되는 계통의 위치마다 다르므로, 정확하게 선로 인덕턴스를 해석하기 어려운 문제가 있다. 따라서 초기 선로인덕턴스는 0으로 간주하고, 실험을 통하여 전류제어기의 동특성을 분석한 후 식(6)에서 얻은 PI 이득 값을 보상하여야 한다.

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 DFIG 모델링

그림 3은 DFIG 발전제어 시뮬레이션 Full 모델로 PSIM을 이용하여 풍력발전기의 H/W와 DFIG 제어기를 구성하였다. 본 모델의 대상은 3.7kW DFIG 이고, 고정자 전압은 220[V], 정격 고정자 전류는 20.5[A]이다.

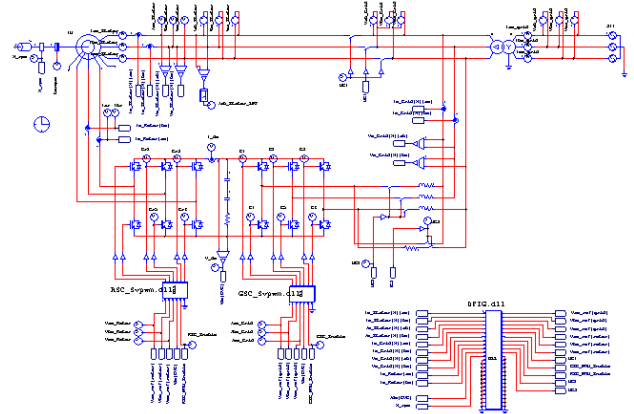


그림 3 이중여자유도 풍력발전기의 시뮬레이션 모델.  
Fig. 3 Simulation Model for DFIG Control System.

그림 4와 5는 계통 0.2초에서 계통 투입을 한 경우로 회전자 전류제어의 고정 PI 이득 값을 적용한 경우와 가변 PI 이득 값을 적용한 경우의 RSC 제어 성능을 보여준다. 가변 PI 이득 값을 적용한 경우에  $i_{qr}^e$ 의 제어가 원활하게 수행됨을 알 수 있다.

DFIG 파라미터와 식(5), (6)에 의해 계통 투입 전  $K_{p1} = 29.674$  이고, 계통 투입 후  $K_{p2} = 4.6$  이다.

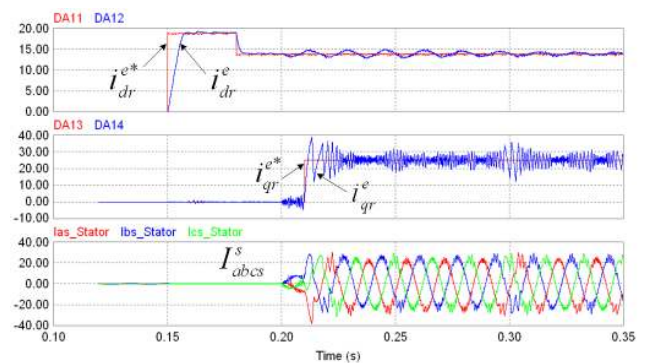


그림 4 고정 PI 이득 값을 적용한 회전자 전류제어  
Fig. 4 RSC Current Control Using Constant PI gain.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 가변 이득 값을 적용한 750kW DFIG의 전류제어

본 실험에서 주파수 대역은 전류제어기의 제어주기, PWM의 스위칭 주파수를 고려하여  $\omega_c$ 를 설정 하였고, 적분시정수의

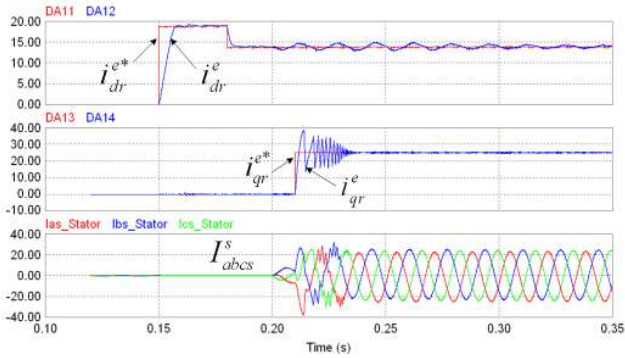


그림 5 가변 PI 이득 값을 적용한 회전자 전류제어  
Fig. 5 RSC Current Control Using Variable PI gain.  
값  $T_i$ 는 통상적인 방법을 사용하여 계산하였으며, 계통 투입 전 전류제어기 비례이득 값은 식 (5)와 같고, 계통 투입 후의 전류제어기 비례이득 값은 식 (6)과 같다.<sup>[5][6]</sup>

그림 6은 발전기의 인덕턴스 변화를 고려한 전류제어기 이득 값이다. PI제어기의 이득 값을 가변 하는 방법으로 이득 값을 직접 가변 하는 방법과 PI제어기의 대역을 바꾸는 방법이 있다.<sup>[7]</sup> 본 실험에서는 식 (5),(6)과 DFIG 파라미터를 이용하여  $K_{p1} = 15$ ,  $K_{p2} = 0.6$ 으로 계산하고, 회전자 여자전류에 따른 전류제어기의 가변이득 값을 점차 조정하는 방법을 사용 하였다.

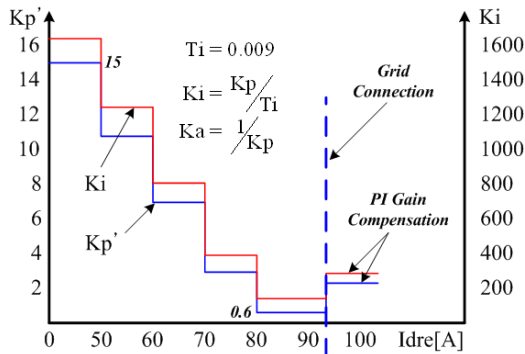


그림 6 발전기 인덕턴스 변화를 고려한 DFIG 회전자 전류제어기의 가변이득

Fig. 6 Variable Gain of DFIG Rotor Current Controller Considering Generator Inductance Variations.

#### 4.2 750kW DFIG의 전류제어의 성능

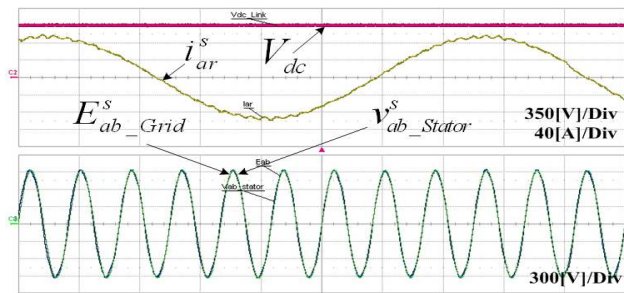


그림 7 회전자 가변 전류제어 이득 값을 적용한 DFIG의 동특성 1.

Fig. 7 Dynamic Performance 1 of DFIG Using Rotor Variable PI Controller Gain.

그림 7은 가변 PI 이득 값을 적용하였을 때의 특성으로, 회전자 전류와 고정자 전압 그리고 계통 전압을 보여준다. 본 파형은 고정자 전압과 계통 전압의 위상 및 전압크기 동기화를 완료하고, 계통 투입 직전의 파형으로, 동기화가 잘 이루어 졌음을 알수 있다.

고정자 출력전압 파형은 인버터를 사용하는 회전자로 인하여 고조파를 다량 함유하고 있어 직접 계통전압과 비교하기 어려우므로, 고정자 출력 전압과, 계통 전압에 똑같은 수동필터를 설치하여 그 출력 값을 오실로스코프로 비교하였다.

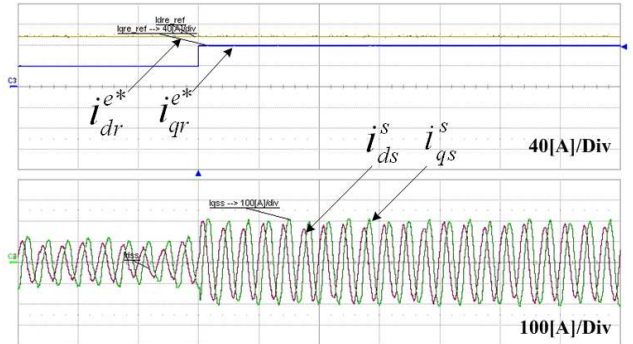


그림 8 회전자 가변 전류제어 이득 값을 적용한 DFIG의 동특성 2.

Fig. 8 Dynamic Performance 2 of DFIG Using Rotor Variable PI Controller Gain.

그림 8은 계통투입 후 회전자 전류제어기의 동특성으로 회전자 전류변화에 따른 고정자 전류변화를 보여준다.  $i_{dr}^*$ 는 회전자 정격여자전류로 약 95[A]이다. 이 값은 계통 투입 시 계통전압의 크기에 따라 수 암페어 정도 차이가 있다.  $i_{qr}^*$ 은 토크분 전류로 40[A]에서 80[A]로 스텝 명령을 주었을 때, 고정자 출력전류의 변화이다. 회전자 전류제어기 스텝 명령에 대한 응답은 2[ms] 이내이다.

표 1 750kW 이중여자 발전기 파라미터

Table 1 750kW DFIG Parameters.

$R_s[\Omega]$	0.0041	$R_r[\Omega]$	0.0041
$L_{ls}[H]$	0.000120692	$L_{lr}[H]$	0.00013422
$L_m[H]$	0.006100939	$R_m[\Omega]$	63
Power[kW]	750	Stator Current[A]	628
Volt[V]	690	Rotor Current[A]	255

표 1은 실험에서 사용한 750[kW] DFIG의 파라미터이며, 그림 9는 DFIG 실험을 위한 시스템 및 계통의 구성이다. DFIG 타입의 풍력발전용 전력변환기 동작 시험은 (주)효성 신뢰성 평가 센터에서 이루어 졌다. 본 신뢰성평가 센터는 2MW 이하의 풍력발전기를 비롯한 증속기, 전력변환기등 다양한 시험을 할 수 있는 설비가 그림 9와 같이 갖추어져 있으며 그 밖의 진동, 열, 소음, 항 운송, 전자파 시험 등을 시험할 수 있는 장비들을 갖추고 있다.

그림 10은 실험에서 사용한 M-G Set로 2.6[MW] 유도전동기와 750[kW] DFIG로 구성되어있다. DFIG의 주 제어기는 TI사 TMS320F2812 DSP 150[Mhz] Core를 기반으로 자체 개발 하였다.

이 논문은 (주)효성의 전략과제의 일환으로 연구되었음.

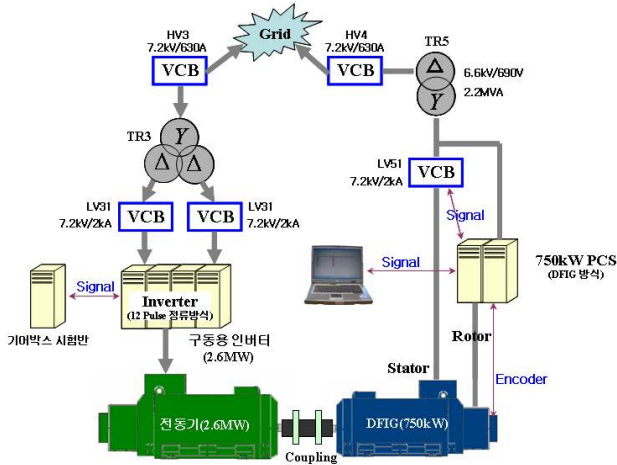


그림 9 DFIG 시스템 실험 구성  
Fig. 9 Configuration of Experimental Setup.



그림 10 실험에 사용한 DFIG 시스템  
Fig. 10 Experimental Setup for DFIG Control.

## 참고 문헌

- [1] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환 “회전자측 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘”, 전기학회 논문지 Vol. 52B No. 10, pp. 528~534, 2003.
- [2] 송승호, 김성주, 함년근 “동기기를 사용한 계통연계형 가변속 풍력발전 시스템의 AC-DC-AC 컨버터 구현 및 제어”, 전기학회 논문지 Vol. 54B No. 12, 2005.
- [3] 정병창, 송승호, 심동준 “가변 풍속시 운전모드 전환을 고려한 이중여자 유도형 풍력발전기의 시뮬레이터”, 전력전자학회 논문지 Vol. 11 No. 4, pp. 71~73, 2005.
- [4] 정병창, “이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 돌입 전류와 토크 리플 저감을 위한 발전기 제어 알고리즘” 전북대학교 전기공학과 박사학위 논문, 2006.
- [5] 설승기, “전기기기 제어론” 도서출판 Brain Korea.
- [6] 서울대학교 전력전자연구실. “전동기 구동시스템의 설계 및 실습” 하계교육강좌. 제15회 2005.
- [7] 신수철, 유재성, 원충연, 김상훈, 최철, 이상훈 “가변계인 회전자 자속관측기에 근거한 스핀들 유도전동기의 센서리스 속도제어” 전력전자학회 추계 학술대회 논문집, pp.98~102, 2005.
- [8] A. Gastli, Member, IEEE, " IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS USING THE SINGLE-PHASE TEST", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, March 1999.
- [9] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen. " Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines" Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark December 2001.
- [10] Poul Sorensen, Anca Hansen, Lorand Janosi, John Bech and Birgitte Bak-Jensen. " Simulation of Interaction between Wind Farm and Power System" Riso National Laboratory, Roskilde December 2001.

## 5. 결론

본 논문은 계통연계 전, 후의 회로 인덕턴스의 변화를 분석하고, 가변 이득 값을 갖는 회전자 전류제어기를 제안하여, 계통 투입 시 돌입전류를 최소화 하고, 회전자측 전류제어의 동특성 성능을 향상 시키는 방법을 제안하였다.

가변 PI 이득 값을 갖는 회전자 전류제어 알고리즘은 계통 연계용 DFIG의 내부 파라미터 변화가 제어기에 미치는 영향을 분석 하므로써, 수시로 계통에 연결, 분리되는 풍력발전 시스템에서 안정적인 시스템 제어를 할 수 있도록 하였다.