

## 엔코더 위치에 강인한 계통연계 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 기법

박 정우<sup>\*1)</sup>, 이 기욱<sup>2)</sup>, 김 동욱<sup>3)</sup>, 이 광수<sup>4)</sup>, 박 진순<sup>5)</sup>

### Control Method of a Doubly-fed Induction Generator with Grid Synchronization unaffected by encoder position

Jungwoo Park\*, Kiwook Lee, Dongwook Kim, Kwangsoo Lee, Jinsoon Park

**Key words** : Renewable Energy, Tidal Current Energy, Doubly-fed Induction Generator, Electrical Energy Converter

**Abstract** : In order to transmit energy generated through the stator winding of a doubly-fed induction generator (DFIG), we need to synchronize the generated voltage vector with the grid voltage vector. However, the existing synchronization method works only when the encoder is installed at a specific position and equivalent constant is precise.

In order to solve this problem, a new synchronization method has been proposed and a way of applying the method to existing doubly-fed induction generator control algorithm has been also proposed.

The validity of the proposed methods have been verified using a prototype converter for the control of a 1.5MW-class doubly-fed induction generator.

#### Nomenclature

$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ : 고정자 기준 좌표계에서의 고정자 d, q  
자속, Wb

$i_{ds}, i_{qs}$ : 고정자 기준 좌표계에서의 d, q 고정자  
전류, A

$i_{dr}, i_{qr}$ : 고정자 기준 좌표계에서의 d, q 회전자  
전류, A

$v_{ds}, v_{qs}$ : 고정자 기준 좌표계에서의 d, q 고정  
자 전압, V

$v_{dr}, v_{qr}$ : 고정자 좌표계에서의 d, q 회전자 전  
압, V

$i_{ms}$ : 고정자 좌표계에서의 자화전류, A

$L_0, L_B$ : 상호인덕턴스, 누설인덕턴스, H

$L_s$ : 고정자 인덕턴스, H

$\omega_r$ : 동기 속도, rad/sec

$P_s, Q_s$ : 고정자측 유효전력, W 그리고 무효전력,  
Var

#### 1. 서론

본 논문은 권선형유도발전기를 제어하기 위한 전  
력변환장치에 대한 것으로, 권선형유도발전기를  
갖는 조류발전 시스템의 구성도를 그림1에 나타내  
었다. 계통측 컨버터(grid-side converter)와 발  
전기측 컨버터(generator-side converter)로 구  
성되어 있으며 발전기측 컨버터를 이용하여 고정  
자 권선의 유효전력제어와 역률을 제어하는 역할  
을 수행하는 구조이다.

1)-3) 한국전기연구원  
E-mail : jwpa7@keri.re.kr  
Tel : (055)280-1485 Fax : (055)280-1547  
4)-5) 한국해양연구원  
E-mail : kslee@kor.ri.re.kr  
Tel : (031)400-6323 Fax : (031)408-5823

그런데 현재까지 발표되어 있는 계통연계 방식을 이용하여 발전기에서 생성된 전압과 계통전압을 연계시키는 경우는 특정한 위치에 엔코더를 설치해야 하는 문제점과 발전기 등가상수에 의존되는 문제점이 있었다.<sup>(1-2)</sup>

이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 엔코더 위치나 발전기 상수에 강한 계통연계 방식을 제시하였고, 이를 적용한 권선형유도발전기 제어기법을 제시하였다. 제안된 방법은 1.5MW급 권선형유도발전기에 적용하여 적정성을 검증하였다.

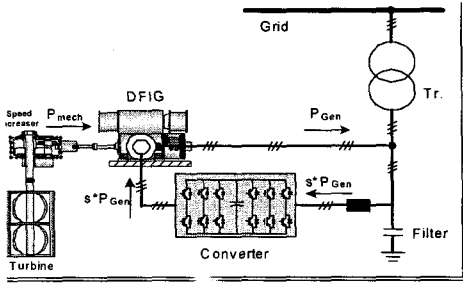


Fig. 1 Tidal current power generation system with a doubly-fed induction generator

## 2. DFIG를 위한 계통연계 방식

권선형유도발전기에서의 유효전력과 무효전력 제어에 대한 지배수식을 수식(1)-(2)에 나타내었다.

회전자축의 q축 전류( $i_{qr}$ ) 성분을 이용하여 고정자축 유효전력을 독립적으로 제어할 수 있으며, 회전자축의 d축 전류( $i_{dr}$ ) 성분을 이용하여 고정자축 무효전력을 독립적으로 제어할 수 있다는 것이다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \left( \frac{L_0}{L_s} v_{qs} \right) i_{qr} \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{qs} \frac{L_0}{L_s} \left( \frac{v_{qs}}{\omega_e L_0} - i_{dr} \right) \quad (2)$$

권선형유도발전기에서 유효전력 제어와 무효전력 제어를 수행하기 위해서는 고정자 권선과 계통 권선을 연결시키는 계통연계 과정이 선행되어야 한다. 신재생에너지 시스템과 전력계통이 연결되는 사양과 관련된 기술기준으로 전압벡터 위상각에 대한 사양이 있으며, 신재생에너지 시스템의 용량이 500kVA 이하인 경우는 전압벡터 위상각에 대한 허용 범위는 20° 이하, 500kVA 이상 1.5MVA 이하에 대해서는 15° 이하, 그리고 1.5MVA 이상 10MVA 이하에 대해서는 10° 이하가 되어야 계통연계 스위치를 연결할 수 있도록 정해져 있다.<sup>(3)</sup>

이런 배경에서, 계통연계기술기준에서 요구하는 위상각에 대한 소정의 사양을 만족시키기 위한 새로운 방법을 제시하고자 한다. 이제까지 발표된

여러 논문에서 갖고 있었던 등가정수에 영향을 받는 단점과 엔코더 설치 위치각에 따라 동기화를 보장하지 못하는 단점을 극복할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

3상 계통전압을 각각  $v_{astf}$ ,  $v_{bstf}$ ,  $v_{cstf}$  라고 하고, d-q 좌표계로 변환하여 계산된 값을  $v_{ds1}^e$ ,  $v_{qs1}^e$ 으로 정의하자. 그리고 발전기의 고정자 권선으로 유기된 권선 전압을  $v_{atf}$ ,  $v_{btf}$ ,  $v_{ctf}$ 라고 할 때 d-q 좌표계로 변환하여 계산된 값을  $v_{ds2}^e$ ,  $v_{qd2}^e$ 로 정의하자.

고정자 권선으로 유기된 전압벡터와 계통 전압벡터를 동기화 시킨다는 것은 전압의 크기와 위상을 동일하게 만든다는 것을 의미하는 것이다.

따라서 우선 고정자 권선으로부터 유기된 전압과 계통 전압의 위상이 같아지도록 만들기 위하여, 고정자 권선으로부터 유기된 전압의 d축 성분( $v_{ds2}^e$ )과 계통 전압의 d축 성분( $v_{ds1}^e$ ) 사이의 전압 오차( $\Delta v_{ds}$ )가 0이 되도록 제어하는 제어를 사용하고 그 제어기의 출력을 엔코더가 갖고 있는 기계각의 오차를 보정해 줄 수 있는 오프셋 각도( $\theta_{offset}$ )로 결정하는 제어전략을 설계하였다. 제어기를 PI제어기를 사용하는 경우 수식(3)과 수식(4)으로 표현된다.

$$\Delta v_{ds} = v_{ds1}^e - v_{ds2}^e \quad (3)$$

$$\theta_{offset} = PI(\Delta v_{ds}) \quad (4)$$

동기화 수단으로부터 계산되는 오프셋 각도( $\theta_{offset}$ )를 이용하여, 권선형유도발전기의 유효전력과 무효전력을 제어하는 알고리즘에서 좌표 변환 각도로 사용되는 슬립각도( $\theta_{sl}$ )를 결정하는 방법을 설명하면 다음과 같다.

고정자 권선으로부터 유기된 전압으로 계산되는 고정자 전압 각도( $\theta_s$ )와 엔코더로부터 얻은 발전기 회전자각도( $\theta_r$ ), 그리고 동기화 과정에서 계산된 오프셋 각도( $\theta_{offset}$ )를 이용하여 슬립각도( $\theta_{sl}$ )는 수식(5)과 같이 결정하도록 하였다.

$$\theta_{sl} = \{\theta_s - \theta_r\} + \theta_{offset} \quad (5)$$

다음으로, 고정자 권선으로부터 유기된 전압과 계통 전압의 크기가 같아지도록 만들기 위하여, 고정자 권선으로부터 유기된 전압의 q축 성분( $v_{qs2}^e$ )과 계통 전압의 q축 성분( $v_{qs1}^e$ ) 사이의 오차( $\Delta v_{qs}$ )가 0이 되도록 하는 제어를 사

용하고 그 제어기의 출력을 무효전력 제어기 출력으로 얻어지는 d축 전류 기준치를 보상해 주는 d축 보상 전류( $i_{dre\_comp}$ ) 성분으로 결정하는 제어 전략을 설계하였다. 제어기를 PI 제어기를 사용하고 중간 단계의 d축 보상 전류를  $i_{dre\_comp1}$  이라고 할 때 수식(6)과 수식(7)로 표현된다.

$$\Delta v_{qs} = v_{qs1}^e - v_{qs2}^e \quad (6)$$

$$i_{dre\_comp1} = PI(\Delta v_{qs}) \quad (7)$$

중간 단계의 d축 보상 전류 성분( $i_{dre\_comp1}$ )이 PI제어기 출력에 의하여 급격하게 증가하는 것을 방지하기 위하여 제한기(Limiter)를 더 포함하고, 수렴 속도를 증가시키기 위하여 되먹임(feedback) 성분( $i_{dre\_comp\_ff}$ )을 더 가진 형태로 d축 보상 전류 성분( $i_{dre\_comp}$ )을 결정하였다.  $i_{dre\_comp1}$  값을 제한한 출력을  $i_{dre\_comp2}$ 로 정의할 때 d축 보상 전류 성분( $i_{dre\_comp}$ ) 계산 방법은 수식(8)과 수식(9)로 완성된다.

$$i_{dre\_comp2} = Limit(i_{dre\_comp1}) \quad (8)$$

$$i_{dre\_comp} = i_{dre\_comp2} + i_{dre\_comp\_ff} \quad (9)$$

여기서 되먹임 성분( $i_{dre\_comp\_ff}$ )은  $\frac{E}{\omega_e L_0}$ 으로 설정하고,  $\frac{E}{\omega_e L_0}$ 의 100% 이하에서 조절 가능한 형태를 갖도록 되먹임 성분을 선정할 수 있다.

$$i_{dre\_comp\_ff} = \frac{E}{\omega_e L_0} \times scale \quad (10)$$

$(0 \leq scale \leq 1)$

동기화 수단으로부터 계산되는 d축 보상 전류 성분( $i_{dre\_comp}$ )은 권선형유도발전기의 무효전력 제어기 출력으로 얻어지는 d축 전류 기준치( $i_{dr}^{e*}$ )를 보상해 주는 d축 보상 전류 성분으로 사용되도록 함으로써 종전의 제어알고리즘과 접목시킬 수 있다. 이때 d축 PI제어기의 입력 오차 신호는 수식(11)과 같이 구성 된다.

$$error_{i_{dr}} = i_{dr}^{e*} + i_{dre\_comp} - i_{dr}^e \quad (11)$$

마지막으로, 계통연계를 위한 동기화 과정을 통해 유효전력 제어기 출력을 보상해야 할 성분은 필요하지 않기 때문에 유효전력 제어기 출력으로 얻어지는 q축 전류 기준치를 보상해 주는 q축 보상 전류 성분( $i_{gre\_comp}$ )은 수식(12)와 같이 언제나 0이 되도록 설계하였다.

$$i_{gre\_comp} = 0 \quad (12)$$

수식 (3)에서 부터 수식(10)까지 제시한 전압 벡터 동기화 알고리즘을 그림2과 같이 블록 구성도로 나타내었다. 그리고 전압벡터 동기화 기능을 갖으면서 수식(11)과 수식(12) 그리고 수식(1)과 수식(2)로 제시한 권선형유도발전기의 유효전력 제어와 무효전력 제어 알고리즘 구성도를 그림3에 제시하였다.

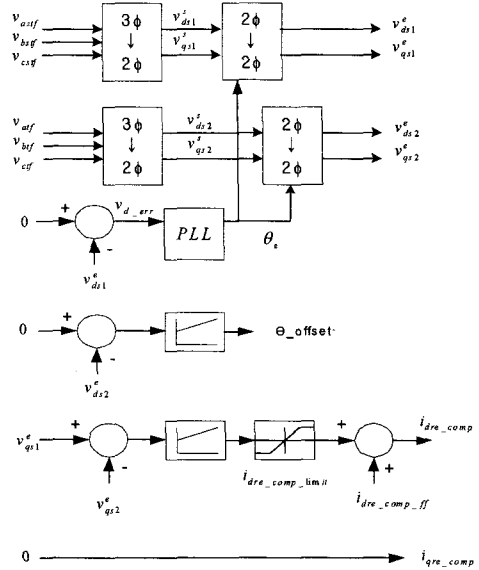


Fig. 2 Presented method to make synchronization between generated voltage and grid voltage

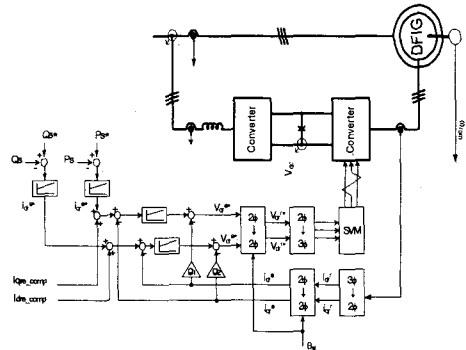


Fig. 3 Power control algorithm for a doubly-fed induction generator with presented synchronization method

### 3. 적정성 검증

제시한 전압 벡터 동기화 알고리즘과 전압 벡터 동기화 알고리즘을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘에 대한 성능을 검증하기 위하여 1.5MW 권선형유도발전기를 제어할 수 있는 전력변환장치

시제품을 개발하였다. 평가 시스템은 2MW 다이내모메터를 이용하여 신재생에너지 시스템에서의 브레이크를 모의(模擬)하여 발전기를 가변속으로 운전할 수 있는 환경을 구축하였고, 1.5MW 권선형유도발전기, 전력변환장치 시제품, 그리고 3.3kV 전력 계통으로 구성하였다.

그림 4는 다이내모메터를 이용하여 810 rpm으로 발전기를 회전시키고 있는 조건에서, 발전기에 대한 등정 정수를 정확하게 알고 있다고 전제하고 d축 보상 전류 성분(  $i_{dre\_comp\_ff}$  )을  $\frac{E}{\omega_r L_o}$  으로 선정하였을 때 고정

자 전압(  $v_{att}$  )과 계통전압(  $v_{astf}$  )이 동기화 되어가는 수렴특성을 나타낸 파형이다. 오프셋 각도가 수렴되는 140ms 이후부터는 두 전압 벡터가 거의 일치됨을 보여주는 미시적인 수렴 특성이다. 그리고 고정자 전압과 계통 전압 사이의 d, q축 전압 오차(  $\Delta v_{ds}$ ,  $\Delta v_{qs}$  ) 특성을 나타낸 것이다. d축 전압 오차는 완전하게 0으로 수렴되었고, 500ms 이후에 q축 전압 오차는 약 4V 정도이므로 상전압의 최대치(  $575 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$  )를 기준할 때 1% 이하의 오차 범위 내에서 수렴됨을 보이고 있다.

그림 5는 발전기에 대한 등정 정수를 정확하게 알 수 없는 최악의 조건을 고려하여 d축 보상 전류 성분의 되먹임 성분(  $i_{dre\_comp\_ff}$  )을 0으로 선정하였을 때 동기화 알고리즘의 특성을 검증한 것이다. 발전기 등가 정수를 알지 못하는 경우에서도 동기화 시킬 수 있음을 보여주는 실험 파형이다. 그리고 이 특성으로부터 발전기 정수가 발전되는 크기에 따라 일정 범위 내에서 변동 되는 상호인덕턴스 변동 조건과 주파수 변동 및 계통전압 변동 조건에 대해 포괄적으로 대응 능력이 있음을 내포하는 실험 결과이다.

그림 6은 d축 보상 전류 성분의 되먹임 성분(  $i_{dre\_comp\_ff}$  )을  $\frac{E}{\omega_r L_o}$  으로 선정한 조건에서 엔코더 위치를 그림 4 조건에서  $\pi/2$ 만큼 이동시킨 조건에서 동기화 특성을 관측한 실험 파형이다. 엔코더 위치가  $\pi/2$ 만큼 이동된 임의의 경우에서도

고정자 전압(  $v_{att}$  )과 계통전압(  $v_{astf}$  )의 동기화 수렴이 잘 됨을 나타내고 있다.

그림 7은 최대 출력이 발생되는 속도(1440rpm)에서 유효전력 기준치를 1.2MW로 설정한 조건에서 관측한 제어 특성을 나타낸다. 고정자, 발전기측-컨버터, 그리고 계통측 컨버터에서 측정한 역률 특성을 나타낸 것이다. 이로부터 제어되는 역률은 0.98 이상이며, 회전자측 역률은 0.75 수준으로 매우 양호한 특성을 보이고 있다.

#### 4. 결론

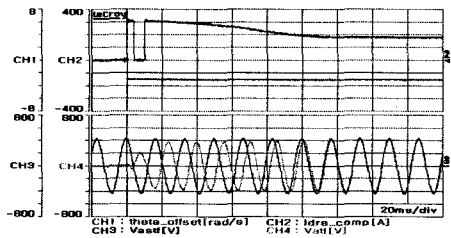
본 논문은 권선형유도발전기를 갖는 신재생에너지 시스템에 대한 것으로, 엔코더 설치 위치에 영향을 받지 않으며 발전기의 등가정수에 영향을 받지 않는 전압벡터 동기화 알고리즘을 제시하였다. 그리고 제시한 전압 벡터 동기화 알고리즘을 유효전력 제어와 무효전력 제어 알고리즘에 접목

시킬 수 있는 방법을 함께 제시하여 전압벡터 동기화 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘을 함께 제시하였다.

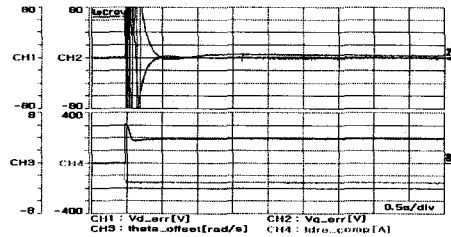
엔코더 위치와 등가정수의 불확실성을 고려한 실험 조건에서 전압벡터 동기화 특성을 갖는다는 것을 확인하였으며, 1.2MW까지의 실부하와 전속도 영역에 대한 실험을 통하여 동기화 제어 특성을 함께 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘이 우수하게 동작됨을 확인하였다.

#### References

- [1] S. A. Gomez, J. L. R. Amenedo, "Grid Synchronization of Doubly-fed Induction Generators using Direct Torque Control," *IECON*, Vol. 4, 2002, pp.3338-3343.
- [2] G. Yuan, J. Chai, Y. Li, "Vector Control and Synchronization of Doubly-fed Induction Wind Generator System," *IPEMC*, Vol. 2, 2004, pp.886-890.
- [3] 한국전력공사, "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준," 2005.



(a) Synchronization trajectory between stator voltage(  $v_{att}$  ) and grid voltage(  $v_{astf}$  )



(b) error trajectory of the d-axis and q-axis voltage (  $\Delta v_{ds}$ ,  $\Delta v_{qs}$  )

Fig. 4 Characteristics of the presented syn-chronization method ( @810rpm,  $i_{dre\_comp\_ff}$  =  $\frac{E}{\omega_r L_o}$  )

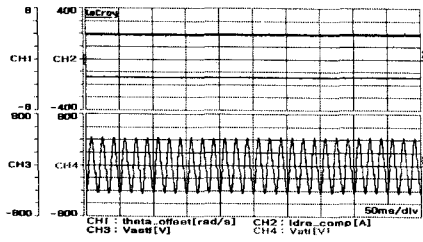


Fig. 5 Characteristics of the presented synchronization method (@810rpm,  $i_{dre\_comp\_ff} = 0$ )

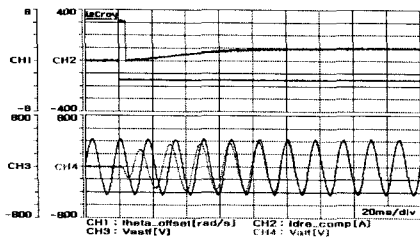


Fig. 6 Characteristics of the presented synchronization method (@810rpm,  $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$ )

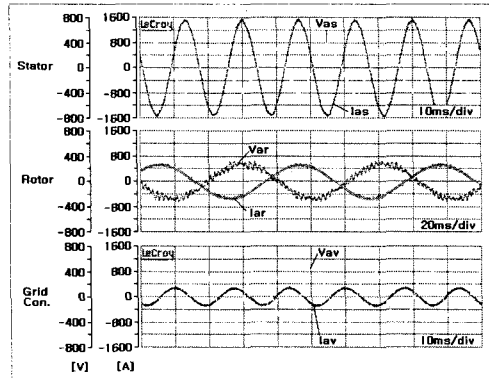


Fig. 7 Characteristics of the power control algorithm for a doubly-fed induction generator with presented synchronization method (1.2MW @1440rpm)

Table 1 Specification of a 1.5MW DFIG

$R_s = 1.950E-3[\Omega]$	$R_r = 1.940E-3[\Omega]$
$L_s = 2.839E-3[H]$	$L_r = 2.847E-3[H]$
$L_o = 2.758E-3[H]$	Pole no. = 6
Operating speed range : 800-1600 [rpm]	