

권선형유도발전기를 갖는 신재생에너지 시스템을 위한 전압벡터 동기화 기법

論 文

56-3-15

A Voltage Vector Synchronization Method for a Renewable Energy System with a Doubly-Fed Induction Generator

朴正雨[†] · 李基旭^{*} · 金東旭^{**}

(Jung-Woo Park · Ki-Wook Lee · Dong-Wook Kim)

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 methods work 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 validities of the methods proposed were verified by using a prototype converter for a 1.5MW-class doubly-fed induction generator and experimental results showed the validity of that against variation of an encoder positions, generator parameters, and grid voltages.

Key Words : Wind Turbine, Tidal Current Power Plant, DFIG, Power Control, Grid Interconnrction

1. 서 론

풍력, 조력, 조류력, 소수력, 연료전지 등으로 대표되는 신재생에너지는 지속 가능하고 재생 가능한 환경친화적인 청정에너지로서 화석에너지 고갈에 따른 유가 상승과 기후변화협약 발효에 따른 국가 간 환경 규제 강화에 대한 대안책으로 주목받고 있다.

더욱이 우리나라는 에너지 다소비국으로 석유 소비량이 미국, 일본, 중국, 독일, 러시아에 이어 세계 6위이고 이산화탄소 배출 순위는 세계 10위이지만 에너지에 대한 해외 의존도는 97%에 이르는 에너지 빈국에 해당된다.

이러한 배경에 따라, 2000년 이후 대체에너지 시스템을 보급하고자 장려하고 있는 정책에 힘입어 풍황(風況)이 좋은 지역에서 풍력발전 시스템이 설치되고 있으며, 간척(干拓) 단계에서 형성된 대규모 저수지와 배수관문을 갖는 방조제를 갖고 있는 시화호에서는 해수호 수질 개선과 청정에너지 개발을 위해 조력발전 시스템이 공사 중에 있으며, 조류(潮流)의 빠른 흐름 현상이 주기적으로 발생하는 명량수도(울돌목)에서는 조류발전 시스템을 실용화하기 위한 연구가 활발하게 추진되고 있다. 그렇지만 풍력발전과 조력발전, 그리고 조류발전처럼 바람이나 물이 갖는 운동에너지나 위치 에너지를 블레이드를 통해, 일차적으로 에너지를 흡수한 다음 발전기를 이용하여 전기를 생산하는 시스템에서 현재 가동 중인 시스템의 거의 100%를 외국 제품에 의존하고 있

는 상황이므로, 전체 전력 생산량에 대한 신재생에너지 비율과 국산화 비율을 개선하기 위하여 산학연에서 해야 할 일이 많다.

본 논문은 발전기를 갖는 신재생에너지 시스템 중에서 전세계 시장의 50%를 점유하고 있는 권선형유도발전기(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)를 갖는 시스템을 대상으로 하고 있으며 권선형유도발전기를 제어할 수 있는 에너지변환 기술과 제어기술에 대한 것이다.

권선형유도발전기는 보통 25% 내외의 제한된 슬립속도 영역 안에서 운전되어도 에너지 회수율이 크게 떨어지지 않는 풍황 조건과 유속 조건을 갖는 시스템에 대해 조건적으로 장점을 제공해 줄 수 있는 발전기이지만, 운전 영역에 대한 조건을 일단 만족할 수만 있다면 동기발전기를 갖는 시스템 보다 에너지 변환 효율이 더 높은 특징을 가지며, 전력변환장치만 비교해 보면 동기발전기용 전력변환장치 용량보다 30%에서 50% 정도 작은 용량으로도 100% 출력을 제어할 수 있기 때문에 상대적으로 가격적인 경쟁력을 가지는 특징이 있다.

권선형유도발전기를 제어하는 방법을 분석해 보면 슬립속도를 제어하는 방법[1], 슬립전력을 제어하는 방법[2], 그리고 슬립토크를 제어하는 방법[3][4]로 분류할 수 있고 각각에 대해 많은 문헌이 발표되어 있다. 그렇지만 형태가 다르긴 하지만 권선형유도발전기의 회전자 전류가 고정자 권선으로 회생되는 에너지(유효전력)를 조절할 수 있다는 기본 원리에 근간을 두고 있다는 공통점을 갖고 있다.

동기화 제어방식에 대한 비교·분석을 하기 위해서는 동기화 방식을 구비하고 있는 전력변환장치에 대한 토폴로지(topology)를 파악하는 것이 필요하며, 권선형유도발전기(DFIG)를 갖는 신재생에너지 시스템에서 적용하고 있는 대표적인 토폴로지 2개를 이해할 필요가 있다.

하드웨어 스위칭 소자를 사용하여 동기화 기능을 구현하

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究員 電動力硏究그룹 팀장
E-mail: jwpark@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣硏究員 電動力硏究그룹 硏究員

** 正會員 : 韓國電氣硏究員 電動力硏究그룹 硏究員

接受日字 : 2006年 9月 13日

最終完了 : 2007年 1月 4日

는 방식을 가지면서, 계통측 컨버터(grid-side converter)는 3상 브릿지 다이오드를 가지며 발전기측 컨버터(generator-side converter)는 3-leg IGBT로 구성되는 것을 특징으로 하는 전력변환장치 토폴로지를 그림 1에 나타내었다[5]. 국내에 설치되어 있는 대부분의 DFIG 시스템에서 채용하고 있는 방법이며 전체적인 가격이 저렴한 특징이 있지만 회전자 권선을 통해 회생되는 슬립전력(slip power)을 계통까지 전달하지 못하는 구조적인 단점을 가지고 있어서 15% 이상의 유효전력을 활용하지 못하는 단점을 가지며, SCR과 같은 대전류 스위칭 소자인 하드웨어 소자를 이용하기 때문에 동기화 기능만 보면 가격이 고가인 방식이다.

계통측 컨버터와 발전기측 컨버터 모두 3-leg IGBT로 구성된 Back-to-Back 구조의 전력변환장치 토폴로지를 그림 2에 나타내었다. 회전자 권선을 통해 회생되는 에너지를 계통까지 전달할 수 있어서 그림 1 토폴로지 보다 15% 이상의 유효전력을 더 생산할 수 있으며, 동기화를 위한 SCR과 같은 대용량 스위칭 소자와 역률을 제어하기 위한 커패시터를 사용하지 않고 저가격형인 배선용 차단기(MCCB)급의

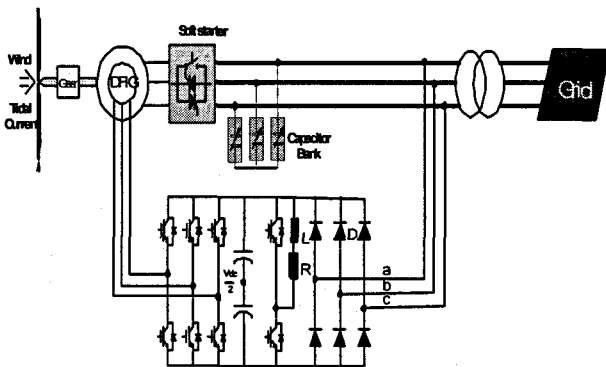


그림 1 하드웨어 스위치를 이용한 전압벡터 동기화 방법 (권선형유도발전기를 갖는 풍력발전 시스템)

Fig. 1 Voltage vector synchronization method using power semiconductor in a wind power plant

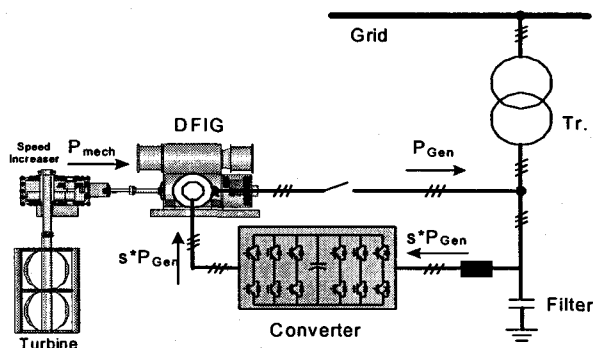


그림 2 고정 전류를 이용하는 전압벡터 동기화 방법 (권선형유도발전기를 갖는 조류발전 시스템)

Fig. 2 Voltage synchronization method using fixed type rotor currents in a tidal current power plant

소자만으로도 동등 이상의 기능을 만족시킬 수 있는 장점이 있다[6][7]. 알고리즘적인 방법을 이용하여 동기화 조건을 만들어 주기 위해서 회전자측에서 인가하는 d축 전류를 $\frac{E}{\omega_e L_0}$ 값이 되도록 설정하고 q축 전류를 0으로 설정하여 전류를 인가함으로써 DFIG 고정자 권선에서의 전압벡터가 계통 전압벡터와 같아지도록 하는 제어방식을 사용하고 있다.

그러나 엔코더가 위치가 기계적으로 360° 범위 내에서 특정 한 점과 정렬되어 있는 조건에서만 논문[6][7]에서 제시한 전류 크기를 가지고 전압벡터가 동기화된다는 단점을 확인할 수 있었다. 그리고 엔코더가 특정 위치에 잘 정렬되어 있다고 하여도 전류 크기를 결정하는 파라미터 (계통전압의 최대값(E), 주파수(ω_e), 그리고 발전기 상호인덕턴스(L_0))가 변동되었을 경우에 대해 대응할 수 없는 단점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 그림 2에 나타낸 토폴로지를 갖는 권선형유도발전기 제어용 전력변환장치를 대상으로 하며 엔코더 위치나 계통전압 크기, 그리고 발전기 등가 정수가 변동되거나 정확히 알 수 없는 경우에서도 동기화될 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 제시한 동기화 기법을 권선형유도발전기 제어 알고리즘에 적용하는 방법을 또한 제시하였다.

2. 권선형유도발전기를 위한 전압벡터 동기화 제어기법

2.1 제어방식과 기술기준에 대한 이론적 배경

권선형유도발전기에 대한 수식적 모델 수식은 유도전동기에 대한 모델 수식과 동일하되 회전자측 전압(v_{dr} , v_{qr})이 0이 아니고, 제어 파라미터로 사용되는 점에 차이가 있을 뿐이다. 그리고 그림 1과 그림 2에서처럼, 권선형유도발전기의 고정자 권선이 전력계통에 바로 연결된 구조로 사용되는 조건에 대해 고려하고 있기 때문에 고정자측 자화전류(i_{ms})는 일정하고 고정자측 자속을 d축에만 집중 분포시킴으로써 q축 자속 성분(λ_{qs})은 0이 된다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 특성을 권선형유도발전기의 q축 자속 방정식(λ_{qs})에 대입하여 정리함으로써 회전자의 q축 전류(i_{qr})만을 이용하여 고정자 권선으로 흐르는 q축 전류(i_{qs})를 독립적으로 제어할 수 있다는 관계성을 수식(1)과 같이 얻을 수 있다. 그리고 q축 고정자 전압 방정식(v_{qs})으로부터 고정자 저항을 무시할 수 있다고 전제하고 정상상태에서의 조건을 적용함으로써 회전자 d축 전류(i_{dr})만을 이용하여 고정자 권선으로 흐르는 d축 전류(i_{ds})를 독립적으로 제어할 수 있다는 관계성을 수식(2)과 같이 얻을 수 있다 [1]-[3].

$$i_{qs} = -\frac{L_0}{L_s} i_{qr} \quad (1)$$

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

또한, 고정자측에 연결되어 있는 전력 계통의 권선분포가 3상 대칭이라고 할 때 고정자측의 d 축 전압성분(V_{ds})은 0 이 되므로 수식(1)의 관계성을 적용하면 회전자측의 q축 전류(i_{qr}) 성분만으로 고정자 유효전력을 독립적으로 제어할 수 있다는 관계성을 수식(3)과 같이 얻을 수 있다. 그리고 고정자측 d축 전압 조건과 수식(2)의 관계성을 이용하여 고정자측 무효전력 방정식을 정리하면 회전자측의 d축 전류(i_{dr}) 성분만으로 고정자 무효전력을 독립적으로 제어할 수 있다는 관계성을 수식(4)와 같이 얻을 수 있다[1]-[3].

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

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{qs} \frac{L_0}{L_s} \left(\frac{v_{qs}}{\omega_e L_0} - i_{dr} \right) \quad (4)$$

수식(3)과 수식(4)가 권선형유도발전기 제어 알고리즘의 핵심을 이룬다. 그렇지만 권선형유도발전기에 대해 유효전력 제어와 무효전력제어를 수행하기 위해서는 고정자 권선과 계통 권선을 연결시키는 계통연결 과정이 전제 되어야 한다. 신재생에너지 시스템과 전력계통이 연결되는 사양과 관련된 기술기준에는 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 계통 연계 스위치를 연결할 수 있도록 정해져 있다 [8].

2.2 전압벡터 동기화 제어기법

계통연계기술기준에서 요구하는 위상각에 대한 소정의 사양을 만족시키기 위한 새로운 방법을 제시하고자 한다. 이 제까지 발표된 여러 논문에서 갖고 있었던 등가정수에 영향을 받는 단점, 인코더 설치 위치 측 설치 기계각에 따라 동기화를 보장하지 못하는 단점, 그리고 스위치의 도통각을 단순히 조절하여 투입함으로써 저가의 제어형 차단기를 사용하지 못하고 PWM 제어형의 전력용 반도체 스위치를 사용해야 하는 문제 점 등을 극복할 수 있는 방법에 대한 것이다.

3상 계통전압을 각각 V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 으로 정의하고, 각각의 계통전압을 저역통과필터(Low Pass Filter, LPF)에 통과시킨 후의 전압을 v_{asf} , v_{bsf} , v_{csf} 라고 하고, 전압 v_{asf} , v_{bsf} , v_{csf} 을 d-q 조표계로 변환하여 계산된 값을 v_{ds1}^e ,

v_{qs1}^e 으로 정의하자. 그리고 발전기의 고정자 권선으로 유기된 권선 전압을 v_{at} , v_{bt} , v_{ct} 으로 정의 하고, 각각에 대해 저역통과 필터링을 수행한 결과를 v_{atf} , v_{btf} , v_{ctf} 라고 할 때 d-q 좌표계로 변환하여 계산된 값을 v_{ds2}^e , v_{qs2}^e 로 정의 하자.

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

따라서 우선 고정자 권선으로부터 유기된 전압과 계통 전압 위상이 같아지도록 만들기 위하여, 고정자 권선으로부터 유기된 전압의 d축 성분(v_{ds1}^e)과 계통 전압의 d축 성분(v_{ds2}^e) 사이의 전압 오차(Δv_{ds})가 0이 되도록 제어하는 제어를 사용하고 그 제어기의 출력을 인코더가 갖고 있는 기계각의 오차를 보정해 줄 수 있는 오프셋 각도(θ_{offset})로 결정하는 제어전략을 설계하였다. 제어기를 PI제어기를 사용하는 경우 수식(5)와 수식(6)으로 표현된다.

$$\Delta v_{ds} = v_{ds1}^e - v_{ds2}^e \quad (5)$$

$$\theta_{offset} = PI(\Delta v_{ds}) \quad (6)$$

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

고정자 권선으로부터 유기된 전압으로 계산되는 고정자 전압 각도(θ_s)와 인코더로부터 얻은 발전기 회전각도(θ_r), 그리고 동기화 과정에서 계산된 오프셋 각도(θ_{offset})를 이용하여 슬립각도(θ_{sl})는 수식(7)과 같이 결정하도록 하였다.

$$\theta_{sl} = \{\theta_s - \theta_r\} + \theta_{offset} \quad (7)$$

다음으로, 고정자 권선으로부터 유기된 전압과 계통 전압 크기가 같아지도록 만들기 위하여, 고정자 권선으로부터 유기된 전압의 q축 성분(v_{qs2}^e)과 계통 전압의 q축 성분(v_{qs1}^e) 사이의 오차(Δv_{qs})가 0이 되도록 하는 제어기를 사용하고 그 제어기의 출력을 무효전력 제어기 출력으로 얻어지는 d축 전류 기준치를 보상해 주는 d축 보상 전류(i_{dre_comp}) 성분으로 결정하는 제어전략을 설계하였다. 제어기를 PI 제어기를 사용하고 중간 단계의 d축 보상 전류를 i_{dre_comp1} 이라고 할 때 수식(8)과 수식(9)로 표현된다.

$$\Delta v_{qs} = v_{qs1}^e - v_{qs2}^e \quad (8)$$

$$i_{dre_comp1} = PI(\Delta v_{qs}) \quad (9)$$

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

여 피드포워드(feedforward) 성분($i_{dre_comp_ff}$)을 더 가진 형태로 d축 보상 전류 성분(i_{dre_comp})를 결정하였다. i_{dre_comp1} 값을 제한한 출력을 i_{dre_comp2} 로 정의할 때 d축 보상 전류 성분(i_{dre_comp}) 계산 방법은 수식(10)과 수식(11)로 완성된다.

$$i_{dre_comp2} = Limit(i_{dre_comp1}) \quad (10)$$

$$i_{dre_comp} = i_{dre_comp2} + i_{dre_comp_ff} \quad (11)$$

여기서 피드포워드 성분($i_{dre_comp_ff}$)은 $E/\omega_e L_0$ 으로 설정하고, scale 조절 파라미터를 도입하여 조절할 수 있다.

$$i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_0} \times scale \quad (0 \leq scale \leq 2.0) \quad (12)$$

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_{qre_comp})은 수식(13)과 같이 언제나 0이 되도록 설계하였다.

$$i_{qre_comp} = 0 \quad (13)$$

수식 (5)에서 부터 수식(13)까지 제시한 전압 벡터 동기화 알고리즘을 그림 3에 나타내었다.

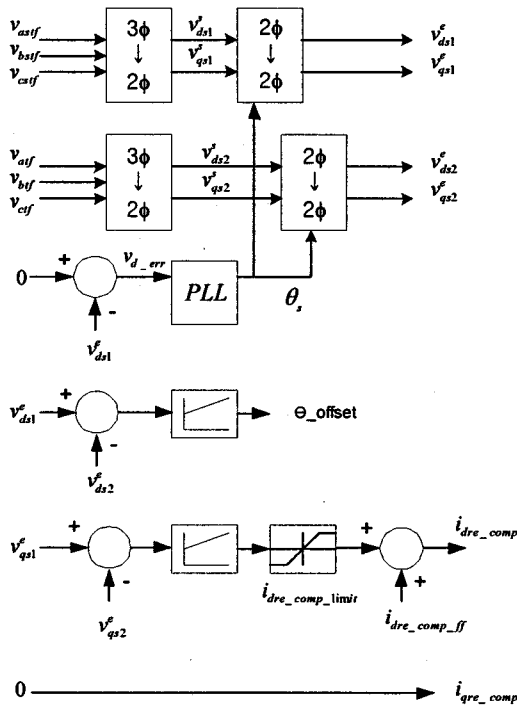


그림 3 제시한 전압 벡터 동기화 알고리즘
Fig. 3 Proposed voltage vector synchronization method

2.3 동기화 기능을 갖는 개선된 DFIG 제어

동기화 제어기법과 권선형유도발전기 전력제어 알고리즘을 병합하는 방법을 제시한다. 동기화 수단으로부터 계산되는 d축 보상 전류 성분(i_{dre_comp})은 권선형유도발전기의 무효전력 제어기 출력으로 얻어지는 d축 전류 기준치(i_{dr}^*)를 보상해 주는 d축 보상 전류 성분이 되도록 함으로써 종전의 권선형유도발전기 제어알고리즘의 d축 전류제어를 향상시킬 수 있다.

또한 q축 보상 전류 성분(i_{qre_comp})은 권선형유도발전기의 유효전력 제어기 출력으로 얻어지는 q축 전류 기준치(i_{qr}^*)를 보상해 주는 q축 보상 전류 성분이 되도록 함으로써 종전의 권선형유도발전기 제어알고리즘의 q축 전류제어를 향상시킬 수 있다.

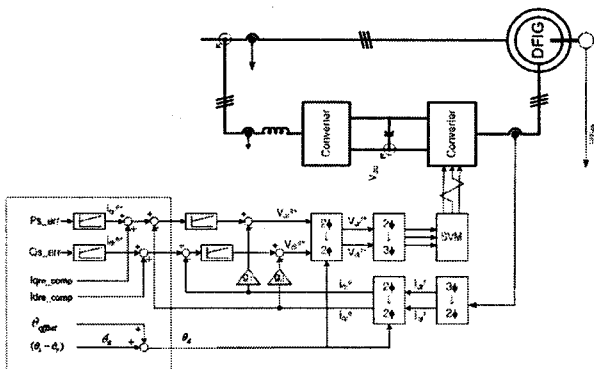


그림 4 제시한 전압벡터 동기화 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘
Fig. 4 power control algorithm for a doubly-fed induction generator with proposed voltage vector synchronization method

새로 제시한 전류제어기를 갖는 권선형유도발전기 알고리즘은 전력제어 (유효전력제어 및 무효전력제어) 뿐만 아니라 동기화 기능을 동시에 구비하는 장점을 갖게 된다. 물론 파라미터 변동이나 엔코더 위치에 영향을 받지 않으며 하드웨어적인 스위치를 요구하지도 않는 특성은 그대로 유지하게 된다.

d-축과 q-축에 대한 전류제어기에 대한 입력부 관계성을 수식으로 나타내면 수식(14)과 수식(15)과 같으며, 개선된 전류제어기를 갖는 권선형유도발전기 제어알고리즘 구성도를 그림 4에 제시하였다.

$$error_{i_{dr}} = i_{dr}^{e*} + i_{dre_comp} - i_{dr}^e \quad (14)$$

$$error_{i_{qr}} = i_{qr}^{e*} + i_{qre_comp} - i_{qr}^e \quad (15)$$

동기화 알고리즘으로부터 도출되는 수식(7)의 오프셋 각도를 이용하여 슬립 각도를 계산하는 구성도와 개선된 전류제어기를 포함함으로써 전압벡터 동기화 기능을 갖는 새로운 권선형유도발전기 제어 알고리즘에 대한 전체 블록도를 그림 5에 제시하였다.

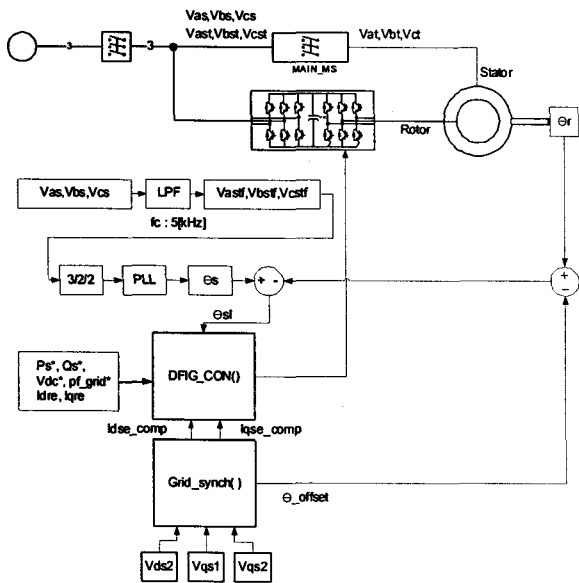


그림 5 제시한 동기화 블록을 포함하는 DFIG 제어 알고리즘 블록도

Fig. 5 Block diagram of the proposed power control algorithm for a doubly-fed induction generator with synchronization block

3. 실험결과 및 고찰

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 브레이드 모의(模擬)하여 발전기를 가변속으로 운전할 수 있는 환경을 구축하였고, 1.5MW 권선형유도발전기, 전력변환장치 시제품, 그리고 3.3kV 전력 계통으로 구성하였다. 전력 계통은 전류, 전압, 주파수, 지락 등에 대해 보호 계전기를 갖는 계통보호장치를 추가로 갖고 있다.

표 1 1.5MW 권선형유도발전기 사양

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 |
| 속도 범위 : 800-1600 [rpm] | |

실험에 사용한 권선형유도발전기의 등가정수를 표 1에 제시하였고, 권선형유도발전기 제어용 전력변환장치는 양방향으로 에너지 수수(收受)가 이루어질 수 있도록 Back-to-Back 구조를 갖으며 IGBT 소자를 적용하여 개발하였다.

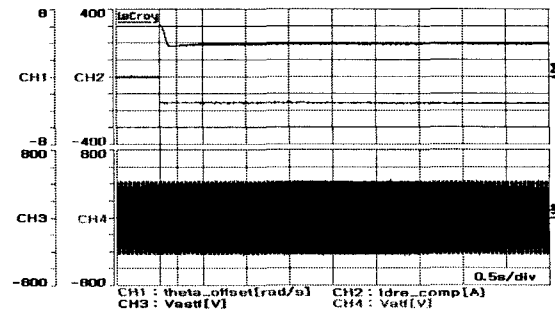


그림 6 오프셋 각도(θ_{offset})와 d축 보상 전류 성분

$$(i_{dre_comp}) \text{ 추종 특성 } (@810rpm, \theta_r = \theta_0, i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o})$$

Fig. 6 Convergence characteristics of the offset angle and d-axis compensated_current (810rpm, $\theta_r = \theta_0,$

$$i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o})$$

그림 6은 다이내모메터를 이용하여 810 rpm으로 발전기를 회전시키고 있는 조건에서, 발전기에 대한 등가 정수를 정확하게 알고 있다고 전제하고 d축 보상 전류 성분의 피드포워드 성분($i_{dre_comp_ff}$)을 $\frac{E}{\omega_e L_o}$ 으로 선정(기존 방식과 동일한 조건)하였을 때 동기화 알고리즘의 특성을 검증하기 위해 오프셋 각도(θ_{offset})와 d축 보상 전류 성분

(i_{dre_comp})을 측정된 실험 파형이다. 500ms 시간이 지나면 오프셋 각도가 유한한 값으로 양호하게 수렴되어가는 것을 확인할 수 있다.

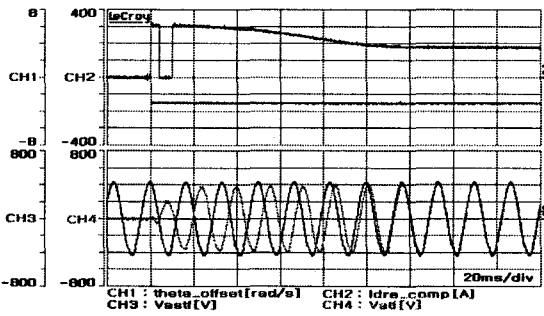


그림 7 고정자 전압 (v_{atf})과 계통전압 (v_{astf})의 동기화 수렴 특성 (@810rpm, $i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$)
 Fig. 7 Characteristics indicating that the generated stator voltage is being synchronized with the grid voltage (810rpm, $\theta_r = \theta_0$, $i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$)

그림 7은 그림 6과 같은 조건이며, 권선형유도발전기의 고정자 전압 (v_{atf})과 계통전압 (v_{astf})이 동기화 되어가는 수렴특성을 나타낸 파형이다. 오프셋 각도가 수렴되는 140ms 이후부터 두 전압 벡터는 이미 거의 동기화 특성을 갖게 된다는 것을 보여주는 미시적인 수렴 특성이다.

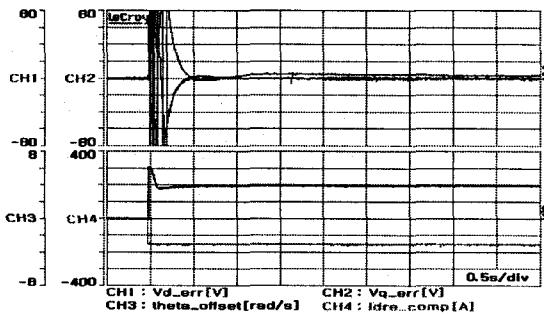


그림 8 고정자 전압과 계통 전압 사이의 d, q축 전압오차 (Δv_{ds} , Δv_{qs}) 특성 (@810rpm, $i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$)
 Fig. 8 Characteristics of deviation of d-axis and q-axis voltage (810rpm, $\theta_r = \theta_0$, $i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$)

그림 8은 그림 6과 같은 조건에서 고정자 전압과 계통 전압 사이의 d, q축 전압 오차 (Δv_{ds} , Δv_{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 9는 발전기에 대한 등가 정수를 완전히 알 수 없는 최악의 조건에서 동기화 특성을 확인하기 위한 실험으로, d축 보상 전류 성분의 피드포워드 성분 ($i_{dre_comp_ff}$)을 0으로 설정하였을 때 동기화 알고리즘의 특성을 검증한 것이

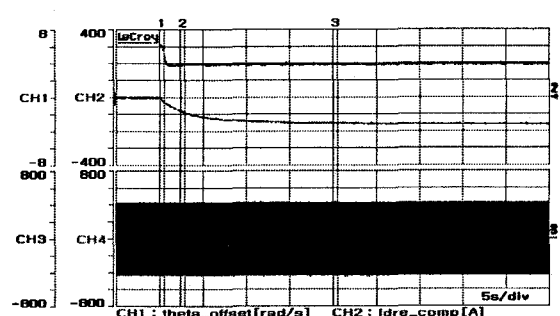


그림 9 오프셋 각도 (θ_{offset})와 d축 보상 전류 성분 (i_{dre_comp}) 추종 특성 (@810rpm, $i_{dre_comp_ff} = 0$)
 Fig. 9 Convergence characteristics of the offset angle and d-axis compensated current (810rpm, $\theta_r = \theta_0$, $i_{dre_comp_ff} = 0$)

다. PI 제어가 이득이 그림 6과 같은 값을 유지하고 있는 조건에서 측정된 것으로 d축 보상 전류 성분 (i_{dre_comp})에 대한 수렴 시간이 상대적으로 많이 길어짐을 알 수 있지만 그림 6과 동일한 d축 보상 전류 성분 값으로 수렴됨을 확인할 수 있다. 기존 방식을 적용한다면 동기화가 되지 않을 것이며 강제로 계통 연계를 감행하면 돌입전류가 크게 발생되어 전력변환장치를 파손시킬 수 있는 모드이다.

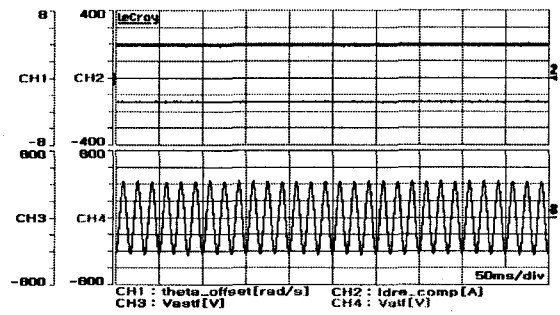


그림 10 고정자 전압 (v_{atf})과 계통전압 (v_{astf})의 동기화 수렴 특성 (@810rpm, $i_{dre_comp_ff} = 0$)
 Fig. 10 Characteristics indicating that the generated stator voltage is synchronized with the grid voltage (810rpm, $\theta_r = \theta_0$, $i_{dre_comp_ff} = 0$)

그림 10은 그림 9와 같은 조건이며 d축 보상 전류 성분 (i_{dre_comp})이 완전히 수렴되는 그림 9의 3번째 영역에서 관측한 권선형유도발전기의 고정자 전압 (v_{atf})과 계통전압 (v_{astf})의 동기화 특성을 나타낸 파형이다. 수렴 시간만 고려하면 너무 느려서 실용성이 없는 것으로 볼 수 있지만 d축 보상 전류 성분의 피드포워드 성분 ($i_{dre_comp_ff}$)이 0인 극단적인 경우이므로 발전기 등가 정수를 알지 못하는 경우

에서도 동기화 시킬 수 있음을 보여주는 실험 파형이다. 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 있다는 것을 검증해 주는 실험 결과이다.

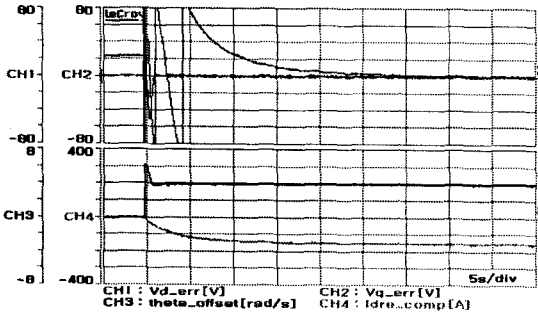


그림 11 고정자 전압과 계통 전압 사이의 d,q축 전압오차

(Δv_{ds} , Δv_{qs}) 특성 (@810rpm, $i_{dre_comp_ff} = 0$)

Fig. 11 Characteristics of deviation of d-axis and q-axis

voltage (810rpm, $\theta_r = \theta_0$, $i_{dre_comp_ff} = 0$)

그림 11은 그림 9와 같은 조건에서 고정자 전압과 계통 전압 사이의 d, q축 전압 오차 (Δv_{ds} , Δv_{qs}) 특성을 나타낸 것으로 20초 이후에는 완전하게 0으로 수렴됨을 보이고 있다.

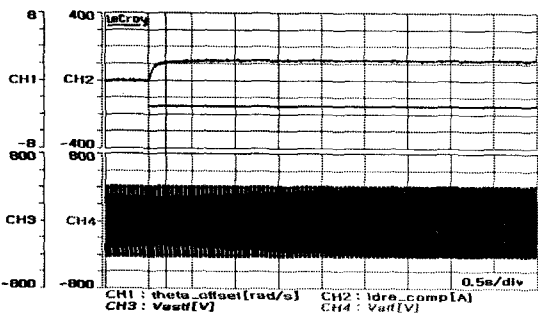


그림 12 오프셋 각도(θ_{offset})와 d축 보상 전류 성분

(i_{dre_comp}) 추종 특성 (@810rpm, $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$)

Fig. 12 Convergence characteristics of the offset angle and d-axis compensated current (810rpm,

$i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$, $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$)

그림 12는 d축 보상 전류 성분의 피드포워드 성분 ($i_{dre_comp_ff}$)을 $\frac{E}{\omega_e L_o}$ 으로 설정하고, 그림 6 조건에서 사용한 정렬된 엔코더 위치로부터 $\pi/2$ (임의 한 값) 만큼 벗어나도록 설정한 조건에서 동기화 특성을 관측한 실험 파형이다. 일정 시간이 지나면 오프셋 각도 값이 유한한 값으로 수렴됨을 확인할 수 있다. 동일 조건에 대해 기존 방식을 적용한다면 동기화가 되지 않을 것이며 강제로 계통 연

계를 감행하면 그림 9 조건과 같이 돌입전류가 발생되어 전력변환장치를 위험에 노출시킬 수 있는 모드이다.

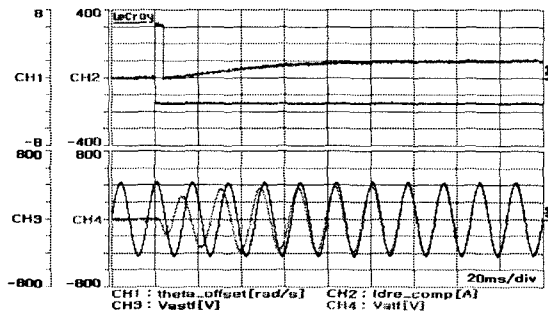


그림 13 고정자 전압(v_{af})과 계통전압(v_{astf})의 동기화 수렴 특성 (@810rpm, $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$)

Fig. 13 Characteristics indicating that the generated stator voltage is being synchronized with the grid voltage (810rpm, $\theta_r = \theta_0$,

$i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$, $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$)

그림 13은 그림 12와 같은 조건이며 엔코더 위치가 $\pi/2$ 만큼 이동된 임의의 경우에서도 고정자 전압(v_{af})과 계통 전압(v_{astf})의 동기화 수렴을 나타낸 것이다. 그림 12로부터 완전하게 수렴되기까지는 1초 정도가 소요되는 것을 알고 있지만 이 실험 파형으로부터 140ms 이내에서 이미 계통을 연계할 수 있을 만큼(10° 이하)의 동기화 특성을 갖고 있음을 알 수 있으며 임의의 엔코더 위치에 대해 동기화 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

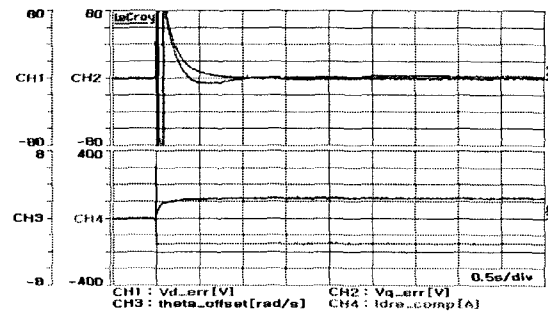


그림 14 고정자전압과 계통전압 사이의 d, q축 전압오차 (Δv_{ds} , Δv_{qs}) 특성 (@810rpm, $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$)

Fig. 14 Characteristics of deviation of d-axis and q-axis

voltage (810rpm, $\theta_r = \theta_0$, $i_{dre_comp_ff} = \frac{E}{\omega_e L_o}$, $\theta_r = \theta_0 + \pi/2$)

그림 14는 그림 12와 같은 조건에서 고정자 전압과 계통 전압 사이의 d, q축 전압 오차 (Δv_{ds} , Δv_{qs}) 특성을 나타낸 것으로 약 1초 이후에는 완전하게 0으로 수렴됨을 보이고 있다.

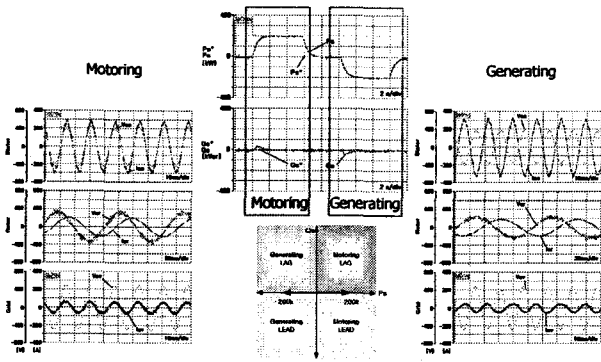


그림 15 제시한 전압벡터 동기화 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘의 계단파 응답 특성(@1440rpm)
 Fig. 15 Step response characteristics of the proposed DFIG control algorithm with automatic grid synchronization (@1440rpm)

그림 15는 유효전력 기준치를 계단파 형태로 인가한 조건에서, 제시한 전압벡터 동기화 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘의 계단파 응답 특성을 확인한 실험 파형으로, 정상상태 조건에서 권선형유도발전기의 고정자(Stator)와 발전기측 컨버터(Rotor), 그리고 계통측 컨버터(Grid) 위치 각각에서 유효전력 값에 대한 응답 특성과 역률

특성을 나타낸 것이다. 이때 발전기 속도는 1440rpm인 조건이며 계통 연계가 완료되어 권선형유도발전기 고정자와 계통 전원은 연계되어 있는 조건이다. 고정자와 계통측 컨버터에서의 역률 제어 특성은 ±0.99 정도로 특성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다.

그림 16은 최대 출력이 발생하는 속도(1440rpm)에서 발생전력 합계가 1.2MW가 되도록 유효전력 기준치를 설정하였을 때 측정된 실험 파형이다. d, q 좌표계로 표시한 유효전력과 무효전력 성분은 각각 DC 성분을 갖는 것으로부터 정상상태 구간에 있음을 알 수 있고, 고정자 권선으로 넘어가는 것과 계통측 컨버터로 회생되는 크기를 합친 1.22MW(1,033+189kW)가 계통으로 발전되고 있는 전체전력을 나타내며 최대 부하 조건에서 제어특성이 매우 우수함을 유지한다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 권선형유도발전기를 갖는 신재생에너지 시스템에 대한 것으로, 엔코더 설치 위치에 영향을 받지 않으며 발전기의 등가정수와 계통전압 크기에 영향을 받지 않는 전압벡터 동기화 알고리즘을 제시하였다. 그리고 제시한 전압벡터 동기화 알고리즘을 권선형유도발전기 제어 알고리즘에 접목시킬 수 있는 방법을 함께 제시함으로써 전압벡터 동기화 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘을 함께 제시하였다.

2MW 다이내모메터를 이용하여 신재생에너지 시스템을 모의한 장치와 1.5MW 권선형유도발전기, 그리고 이 발전기를 제어하기 위한 전력변환장치 시제품을 이용하여 엔코더 위치가 임의로 변동된 상황과 등가정수를 알지 못하는 상황을 고려한 실험 조건에서도 전압벡터를 동기화시킬 수 있다는 것을 검증하였으며, 1.2MW까지의 실부하와 전 속도 영역에 대한 실험을 통하여 동기화 제어 특성을 함께 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘이 우수하게 동작됨을 검증하였다.

파라미터 정의

- 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 고정자 전압, V
- v_{dr}, v_{qr} : 고정자 좌표계에서의 d, q 회전자 전압, V
- i_{ms} : 고정자 좌표계에서의 자화전류, A
- L_0, L_{ls} : 상호인덕턴스, 누설인덕턴스, H
- L_s : 고정자 인덕턴스, H
- ω_e : 동기 속도, rad/sec
- P_s, Q_s : 고정자측 유효전력, W 그리고 무효전력, Var

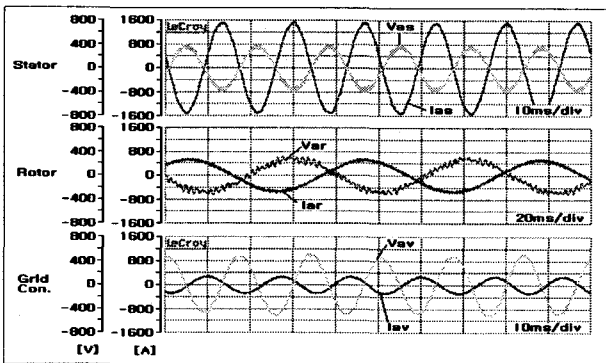
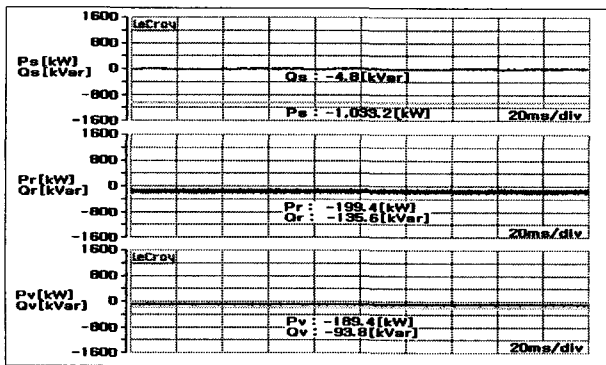


그림 16 전압벡터 동기화 기능을 갖는 권선형유도발전기 제어 알고리즘의 최대 전력제어 특성 (1.2MW, @1440rpm)

Fig. 16 Maximum power control characteristics of the proposed DFIG control algorithm with automatic grid synchronization (1.2MW@1440rpm)

참 고 문 헌

- [1] P. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and its application to Variable Speed Wind-Energy Generation," IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 143, No. 3, May, 1996.
- [2] S. Muller, M. Deicke & Rik W. De Doncker, "Doubly-Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines," IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 8, 2002, pp. 26-33.
- [3] P. Pena, G. M. Asher, J. C. Clare, "Vector controlled induction machines for stand-alone wind energy applications," Industry Applications Conference, Vol. 3, 2000, pp. 1409 - 1415.
- [4] Gokhale, K. P., Karraker D. W., "Controller for a wound rotor slip ring induction machine," PUB. APP. NO. 20030071596.
- [5] S. Eckardt, A. Bjorn, "Variable speed wind turbine having a passive grid side rectifier with scalar power control and dependent pitch control," PUB. APP. NO. 20040222642..
- [6] S. A. Gomez, J. L. R. Amenedo, "Grid Synchronisation of Doubly-fed Induction Generators using Direct Torque Control," IECON, Vol. 4, 2002, pp.3338-3343.
- [7] G. Yuan, J. Chai, Y. Li, "Vector Control and Synchronization of Doubly-fed Induction Wind Generator System," IPEMC, Vol. 2, 2004, pp.886-890.
- [8] 한국전력공사, "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준," 2005.

저 자 소 개



박 정 우 (朴正雨)

1963년 2월5일생. 1986년 충남대 전자공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전자공학과 졸업 (석사). 2000년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 한국전기연구원 전동력연구그룹 책임연구원.

Tel : 055-280-1485

Fax : 055-280-1547

E-mail : jwpark@keri.re.kr



이 기 옥 (李基旭)

1975년 11월 27일생. 2001년 창원대 전기공학과 졸업. 2003년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 한국전기연구원 전동력연구그룹 연구원.

Tel : 055-280-1482

Fax : 055-280-1547

E-mail : l751127@keri.re.kr



김 동 옥 (金東旭)

1975년 8월 10일생. 2003년 동의대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005~현재 한국전기연구원 전동력연구그룹 연구원.

Tel : 055)280-1482

Fax : 055)280-1547

E-mail : wci1614@keri.re.kr