

매트릭스컨버터와 이중여자유도발전기를 사용한 풍력발전시스템

論 文
57-6-12

Wind Power System using Doubly-Fed Induction Generator and Matrix Converter

李東根* · 權起鉉** · 韓炳文[†] · 李玉龍*** · 崔南燮[§] · 崔泳道^{§§}

(Dong-Geun Lee · Gi-Hyun Kwon · Byung-Moon Han · Yu-long Li · Nam-Sup Choi · Young-Do Choy)

Abstract - This paper proposes a new DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) system using matrix converter, which is very effectively used for interconnecting the wind power system to the power grid. The operation of proposed system was verified by computer simulations with PSCAD/EMTDC software. The feasibility of hardware implementation was conformed by experimental works with a laboratory scaled-model of wind power system. The laboratory scaled-model was built using a motor-generator set with vector drive system, and a matrix converter with DSP (Digital Signal Processor). The operation of scaled-model was tested by modeling the specific variable-speed wind turbine using the real wind data in order to make the scaled-model simulate the real wind power system as close as possible. The simulation and experimental results confirm that matrix converter can be applied for the DFIG system.

Key Words : DFIG(Doubly-Fed Induction Generator), Matrix Converter, VSC(Voltage Source Converter), DSP(Digital Signal Processor), PSCAD/EMTDC

1. 서 론

풍력발전의 경우 시스템의 경제성, 풍력자원의 활용도, 생산전력의 효율과 품질을 고려할 때 대규모 단지를 조성하여 전력을 생산하고 이를 전력계통에 연계하여 운용하는 것이 현재의 추세이다.[1]

풍력발전단지를 전력계통에 연계하는 가장 용이한 방법이 농형유도발전기를 사용하는 방식이다. 하지만 이 방식은 무효전력을 소모하고 이 무효전력은 발생하는 유효전력의 양에 따라 실시간으로 변동한다. 따라서 이를 보상하기 위해 초기에는 기계식차단기와 커패시터뱅크를 결합한 계단식 무효전력보상기를 설치하여 운용하였고 최근에는 연속보상이 가능한 인버터방식 무효전력보상기인 STATCOM을 설치 운용하고 있다.[2]

이중여자유도발전시스템(doubly-fed induction generator)은 권선형유도발전기를 사용하고, 고정자는 전력계통에 직접 그리고 회전자는 Back-to-Back 컨버터를 통해 계통에 연결

되어 있다. 이 방식은 풍속에 따라 회전자의 속도가 변하더라도 일정한 전압과 주파수로 전력을 계통에 공급하고 풍력발전이 결합된 연결점의 역률을 제어하는 것이 가능하다. 따라서 무효전력 보상을 위한 별도의 기기를 설치할 필요가 없다.[3,4]

이중여자유도발전시스템은 회전자에서 발생하는 저주파 교류를 60Hz 상용교류로 변환하는 Back-to-Back 컨버터를 사용하는데, 이 컨버터는 교류-직류-교류 3단계 전력변환을 필요로 하며 AC-AC 직접변환방식에 비해 스위칭손실이 크고 시스템 규모가 큰 단점을 갖는다. 이러한 단점을 개선하고자 AC-AC 직접변환이 가능한 Matrix 컨버터를 적용하는 연구가 이미 몇몇 연구자에 의해 시도되었다.

그러나 이들의 연구를 살펴보면 시뮬레이션에 의해 동작의 타당성만 제시하고 있고 구체적인 하드웨어구현 및 시험 결과는 제시하고 있지 못하다. Matrix 컨버터는 시뮬레이션에서는 무시되는 스위칭에 따른 커뮤테이션에 관계된 문제들이 하드웨어 실험에서 발생하여 신뢰도 확보하는 것이 관건이다.[5,6,7]

본 연구에서는 Matrix 컨버터의 스위칭동작에 신뢰성을 확보할 수 있도록 스위칭방식이 간단하고 용이한 방식을 사용하였다. 또한 이렇게 구현된 Matrix 컨버터를 풍력발전에 적용하여 시뮬레이션으로 분석한 결과와 하드웨어 축소모형으로 시험한 결과를 기술하였다.

* 正 會 員 : LS전선 중앙연구소 연구원

** 正 會 員 : 명지대 공대 전기공학과 박사과정

*** 正 會 員 : 전남대학교 전기공학과 박사과정

§ 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授

§§ 正 會 員 : 한국전력공사 전력연구원

† 교신저자, 正 會 員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : erichan@mju.ac.kr

接受日字 : 2008年 3月 18日

最終完了 : 2008年 4月 21日

2. 매트릭스 컨버터

2.1 컨버터의 개요

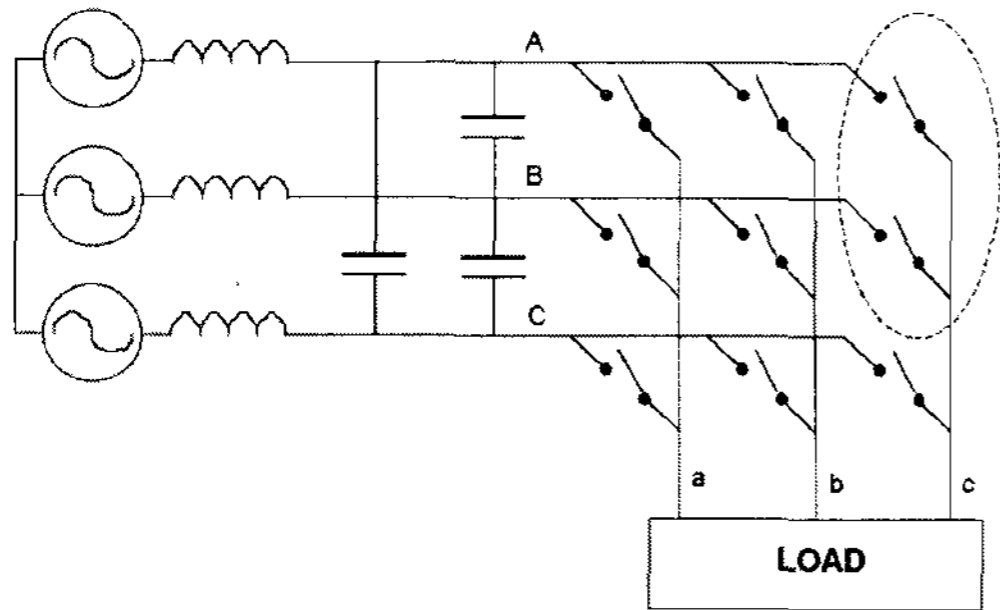


그림 1 3상 매트릭스 컨버터의 구조
Fig. 1 Configuration of 3-Phase Matrix Converter

매트릭스 컨버터는 양방향 전력 전달이 가능하고, 입력 전류의 역률을 조절할 수 있으며, DC 링크 커패시터가 필요 없는 등의 장점으로 인하여, 상용 3상 AC 전원에서부터 직류 변환 없이 가변전압, 가변주파수의 교류 출력을 얻는 회로 방식이다. 그림 1은 3상 매트릭스 컨버터의 기본구성과 개념을 나타낸 것이다. 매트릭스 컨버터는 부하전류에 대해서 독자적인 환류경로가 존재하지 않고 출력은 직류 링크회로 없이 입력과 직접적으로 연결되어 있다.

매트릭스 컨버터는 구성된 스위치의 커뮤테이션이 신뢰성 있게 동작하기 위해서는 기존 전력변환기에 비해서 복잡한 제어기법이 요구되며 매트릭스 컨버터는 반드시 클램프회로나 스너버 회로와 같은 보호회로가 필요하다. 매트릭스 컨버터는 커뮤테이션에 대해 두 가지 기본적인 규칙이 존재한다.

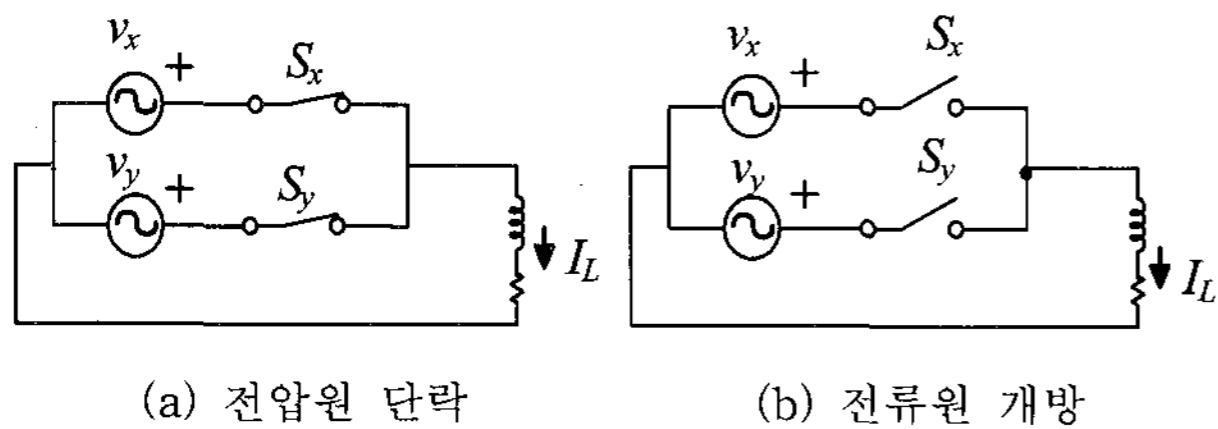


그림 2 금지된 스위칭 상태
Fig. 2 Forbidden Switching State

출력 측 1상에 대한 입력 측 2상만을 고려하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2(a)에서 나타낸 바와 같이 매트릭스 컨버터의 스위칭에서 2개의 양방향 스위치가 동시에 ON 상태를 유지해서는 안 된다. 이것은 선간 단락회로에 의한 과전류로 스위칭소자의 파괴를 초래하기 때문이다. 또한 그림 2(b)와 같이 2개의 양방향 스위치가 동시에 OFF 상태가 되어도 안 된다. 이것은 유도성부하의 경우 환류경로가 없어 과전압의 원인이 되어 매트릭스 컨버터에 영향을 주기 때문이다. 따라서 스위칭 동작 시 1개의 출력은 반드시 2개 입력 중 한 개의 스위치와만 접속하도록 동작하여야 한다.

2.2 컨버터의 전압변조

매트릭스 컨버터의 입력 전원은 3개의 선간 전압으로 구성되어 있다. 이 3개의 전압 중 가장 큰 하나를 이용하여, 매트릭스 컨버터의 입력으로 사용할 경우, 스위칭 주기 안에서 3상 중 2개의 상만이 이용되게 되며 스위칭 주기 안에서 하나의 상은 전류가 흐르지 않게 되어 입력 전류에 왜곡이 생기게 된다.

따라서 3개의 선간 전압 중 크기가 큰 2개의 선간 전압을 스위칭 주기 안에서 사용하게 되면 스위칭 주기 안에서 3개의 상을 전부 이용하게 되고, 3개의 상에 모두 전류가 흐르게 된다. 그림 3의 회로를 참고하여 다음과 같이 정한다.

- V_{ga}, V_{gb}, V_{gc} : 입력 상 전압
 $MAX = \text{maximum}(V_{ga}, V_{gb}, V_{gc})$
 $MID = \text{middle}(V_{ga}, V_{gb}, V_{gc})$
 $MIN = \text{minimum}(V_{ga}, V_{gb}, V_{gc})$
- $V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*$: 출력 상 전압 지령
 $max = \text{maximum}(V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*)$
 $min = \text{minimum}(V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*)$
- 윗셋 전압 : V_{sn1}, V_{sn2}
 V_{sn1} : T1 기간의 윗셋 전압
 V_{sn2} : T2 기간의 윗셋 전압
- 폴 전압 지령 : $V_{an1}^*, V_{an2}^*, V_{bn1}^*, V_{bn2}^*, V_{cn1}^*, V_{cn2}^*$
 $V_{an1}^* = V_{as}^* + V_{sn1}$: T1 기간의 a상 폴 전압 지령
 $V_{an2}^* = V_{as}^* + V_{sn2}$: T2 기간의 a상 폴 전압 지령
 $V_{bn1}^* = V_{bs}^* + V_{sn1}$: T1 기간의 b상 폴 전압 지령
 $V_{bn2}^* = V_{bs}^* + V_{sn2}$: T2 기간의 b상 폴 전압 지령
 $V_{cn1}^* = V_{cs}^* + V_{sn1}$: T1 기간의 c상 폴 전압 지령
 $V_{cn2}^* = V_{cs}^* + V_{sn2}$: T2 기간의 c상 폴 전압 지령

이 때 사용하는 2개의 선간 전압을 전압원 컨버터의 DC 링크 전압으로 생각하고, 매트릭스 컨버터의 출력전압을 합성한다. 여기서 “윗셋 전압을 이용한 전압변조 방법”을 적용한다. 전압원 컨버터에서 “윗셋 전압을 이용한 전압변조 방법”은 자유도인 윗셋 전압(V_{sn})을 상전압 지령($V_{as}^*, V_{bs}^*, V_{cs}^*$)에 더하여 폴(pole) 전압 지령($V_{an}^*, V_{bn}^*, V_{cn}^*$)을 만들고, 폴 전압 지령과 캐리어를 비교하여 게이팅 신호를 만드는 방법이다.

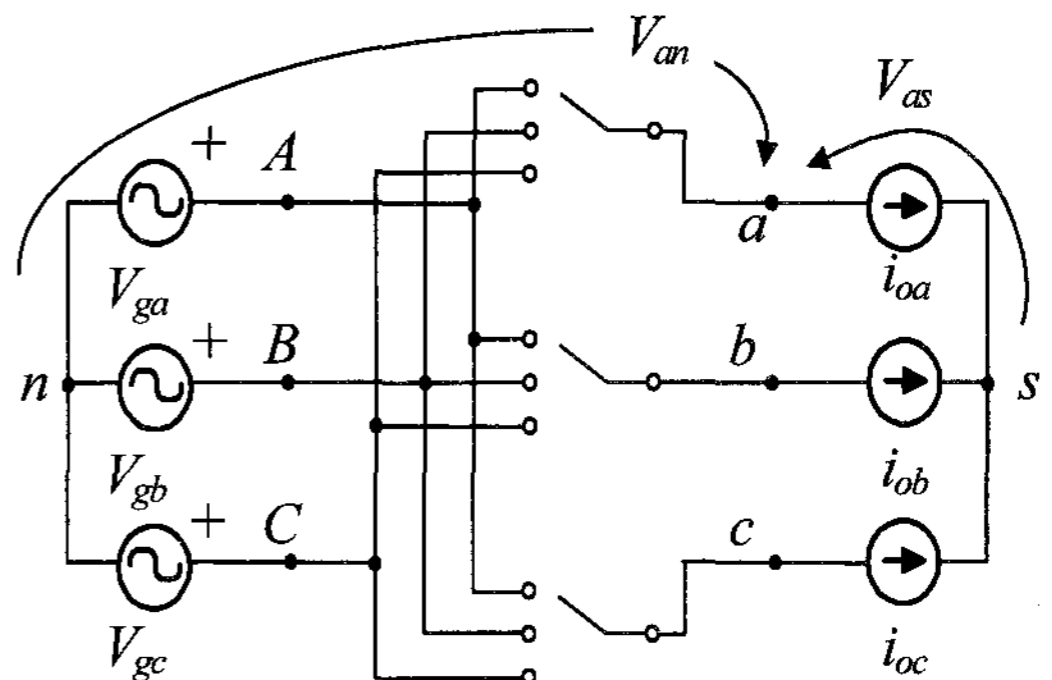


그림 3 매트릭스 컨버터의 전압과 전류
Fig. 3 Voltage and Current of Matrix Converter

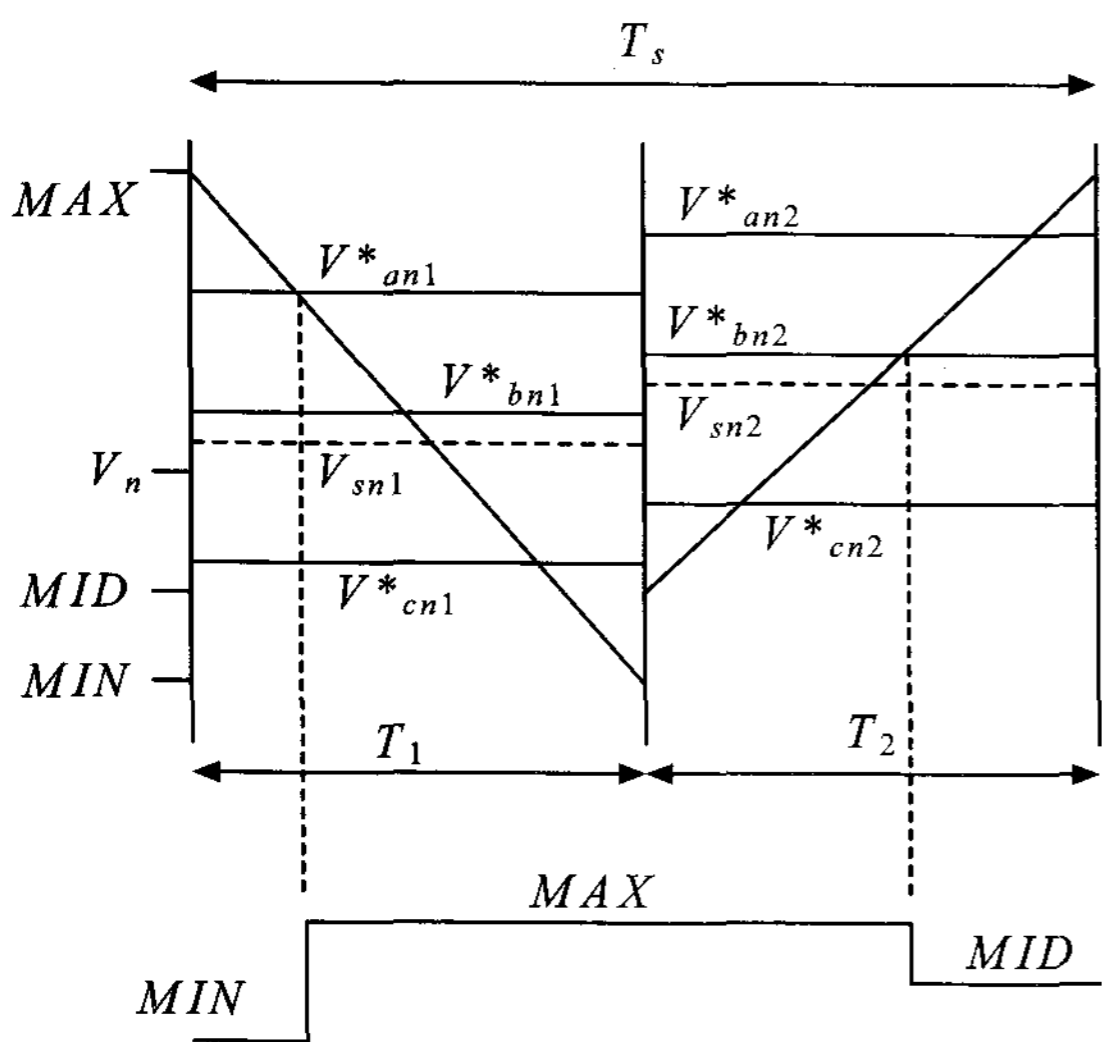


그림 4 매트릭스 컨버터의 전압변조[8]
Fig. 4 Voltage Modulation of Matrix Converter

그림 4는 매트릭스 컨버터의 전압변조의 원리를 나타낸 것이다. 스위칭주기 T_s 를 2개로 나누어서 T_1 과 T_2 라고 나누어 생각한다. T_1 동안에는 DC 링크 전압으로 입력 선간 전압이 가장 큰 MAX와 MIN 사이의 전압을 이용한다. T_2 기간에는 전압이용률을 높이기 위해서 그 다음으로 입력 선간 전압이 큰 것을 이용한다. 경우에 따라서, MAX와 MID 사이의 전압, 또는 MID와 MIN 사이의 전압 중 크기가 큰 전압을 사용한다. 이렇게 할 경우, 캐리어는 그림 4와 같이 표시될 수 있다.

전압원 컨버터에서의 캐리어를 DC 링크 전압을 이용하여 $V_{dc}/2 \sim -2V_{dc}/2$ 사이에서 표시하는 것과 같은 방식이다. 그림 4는 입력 선간전압 중에서, MAX와 MID 사이의 전압이 MID와 MIN 사이의 전압보다 큰 경우를 나타내고 있다. 따라서 T_2 기간에는 가상 DC 링크 전압으로 MAX와 MID 사이의 전압을 이용한다. T_1 동안에는 가상 DC 링크 전압으로 MAX와 MIN 사이의 전압을 이용하므로, 캐리어를 MAX에서 MID까지 그릴 수 있다. 또한 T_2 동안에는 작은 쪽인 MID에서 MAX를 향하여 캐리어가 진행하도록 구성한다.

폴 전압 지령을 만들기 위한 윗셋 전압 V_{sn} 은 이미 전압원 컨버터에서 사용하고 있는 “윗셋 전압을 이용한 전압 변조 방법”에서 만드는 것과 동일한 방식으로 만들 수 있다. 전압원 컨버터에서 윗셋 전압(V_{sn})은 폴 전압 지령들을 DC 링크 전압의 한 가운데 두어서 윗셋 벡터를 스위칭 주기의 한 가운데에 위치시키고 영 벡터는 스위칭 주기의 양 끝에 같은 시간 동안을 배치시키도록 설정된다. 이와 같은 방식으로 T_1 구간과 T_2 구간에서 윗셋 벡터와 영 벡터(zero vector)가 배치되도록 윗셋 전압을 구할 수 있다. T_1 구간에서의 윗셋 전압은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$V_{sn1} = \frac{(MAX + MIN) - (\max + \min)}{2} \quad (1)$$

T_2 구간의 윗셋 전압은 다음과 같이 구할 수 있다. T_2 구간에 MAX와 MID 사이의 전압을 이용할 경우, 식 (2)를 이용한다. T_2 구간에 MID와 MIN 사이의 전압을 이용할 경우, 식 (3)을 이용한다.

$$V_{sn2} = \frac{(MAX + MID) - (\max + \min)}{2} \quad (2)$$

$$V_{sn2} = \frac{(MID + MIN) - (\max + \min)}{2} \quad (3)$$

$$T_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left(\beta'_i + \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\beta'_i) T_s \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\beta'_i) \cos\left(\beta'_i - \frac{\pi}{3}\right) T_s \quad (5)$$

스위칭 시간인 T_1 기간과 T_2 구간은 입력 전압의 위상각 (β_i)에 따라서 결정된다. 단, T_1 구간과 T_2 구간의 합은 항상 스위칭 주기 T_s 가 된다.

T_1 과 T_2 는 식 (4),(5)와 같다. β'_i 와 β_i 의 관계는 식 (6)으로 표시되며 그림 5와 같다.

$$\beta'_i = \frac{1}{6} \cos^{-1}(\cos(6\beta_i)) \quad (6)$$

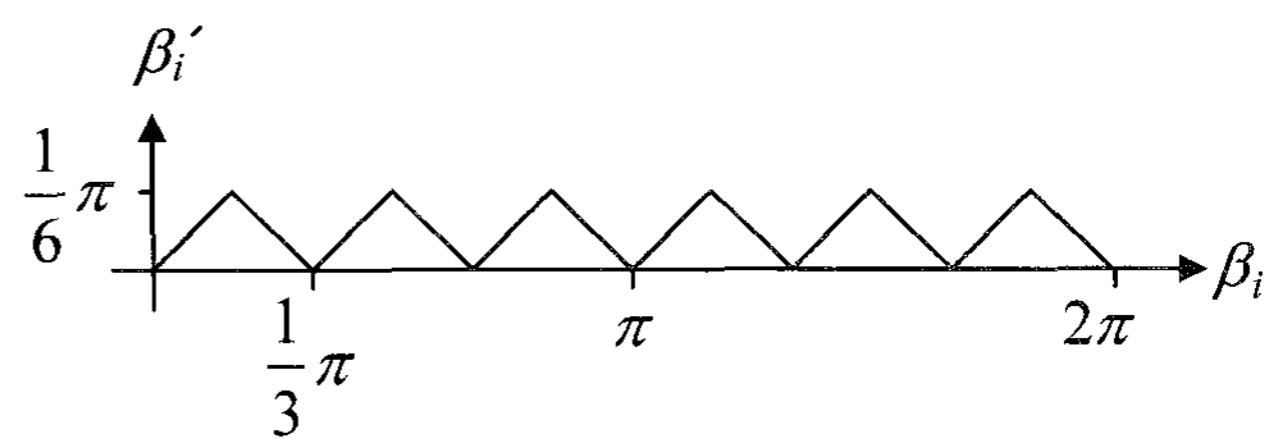


그림 5 β_i 와 β'_i 의 관계
Fig. 5 Relationship between β_i and β'_i

3. 제안하는 이중역자유도 풍력발전시스템

3.1 시스템의 개요

그림 6은 본 논문에서 다루는 이중역자유도 풍력발전 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 발전기는 극수가 4극 또는 6극인 권선형 유도기를 사용하며 유도기의 고정자는 차단기를 이용하여 블레이드에서 공급하는 기계적 에너지를 발전을 하기에 충분할 때 계통에 연결되고 부족하면 계통에서 분리된다. 유도기의 회전자는 매트릭스 컨버터에 의해 전력 계통과 연결된다.

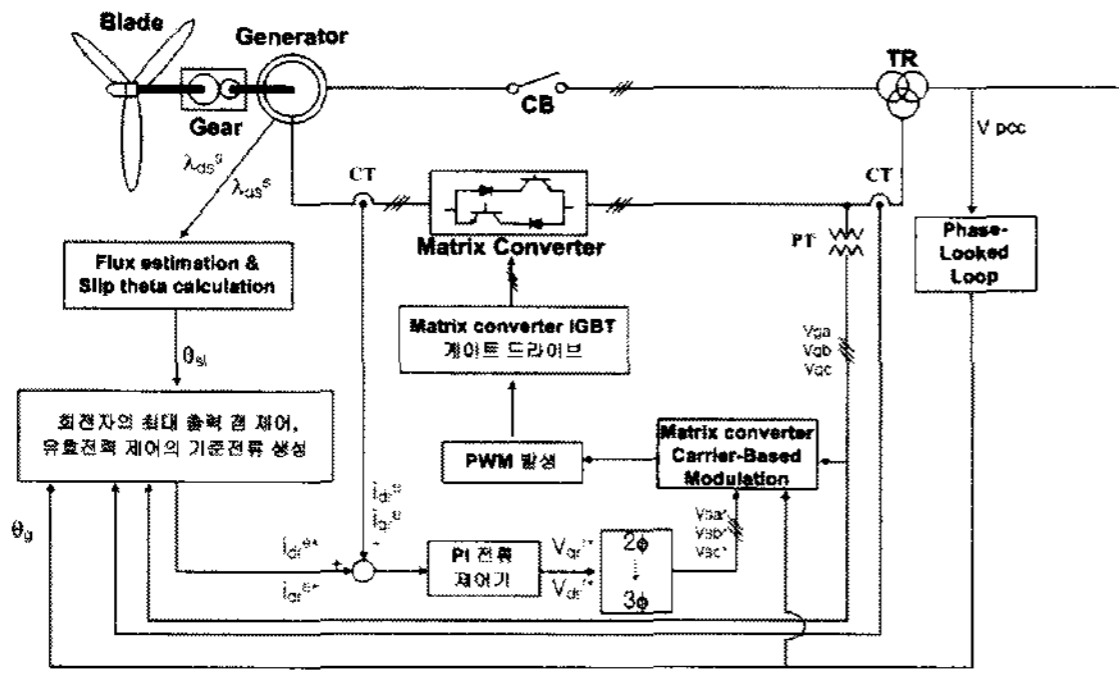


그림 6 제안하는 이중여자유도 풍력발전 시스템
Fig. 6 Proposed Doubly-Fed Induction Wind Power System

슬립이 제로보다 클 경우 즉 발전기의 회전속도가 동기속도 이하일 경우에는 바람으로부터 블레이드에 전해지는 전기적 에너지와 회전자에서 공급되는 유효전력의 합이 고정자의 유효전력이 되어 계통에 공급되게 된다. 반면 슬립이 제로보다 작을 경우 즉 발전기의 회전속도가 동기속도 이상일 경우에는 블레이드의 전기적 에너지는 고정자와 회전자에 각각 분담되어 계통에 유효전력을 공급하게 된다.

제안된 이중여자유도 풍력발전시스템은 기존 시스템에 포함된 Back-to-Back 컨버터 대신 9개의 스위치로 구성된 매트릭스 컨버터를 사용한 방식으로 DC-Link가 없어 손실이 적고 비교적 하드웨어구성이 간단하여 전체적으로 시스템 효율이 높고 규모가 작다.

3.2 시스템의 모델링

본 논문에서는 시스템해석을 실험실에서 용이하게 수행할 수 있도록 풍력터빈 대신에 농형유도전동기와 벡터드라이브로 구성된 모의 장치를 사용하였다. 모의 장치는 주어진 풍속에 대해 특정터빈이 생산하는 토크를 산출하여 스케일링을 한 후 이를 벡터드라이브에 공급한다.

회전반경이 R_{blade} 인 블레이드에 풍속 w_{blade} 인 바람이 불어올 때 공기가 가지는 전체 에너지 P_{blade} 는 식(7)과 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p \quad (7)$$

A 는 블레이드의 회전 단면적 [m^2]으로 $A = \pi R_{blade}^2$ 이고, ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.225[kg/m^3]$ 이다.

이 때 출력계수는 C_p 는 주속비(Tip speed ratio) λ 의 함수로서 바람이 가지는 에너지를 블레이드의 기계적 에너지로 바꾸어주는 비율이다. 주속비 λ 는 풍속과 회전속도의 비율로서 식(8) 과 같이 정의한다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{V_{wind}} \quad (8)$$

ω_{blade} : 블레이드의 회전 각속도
 R_{blade} : 블레이드의 회전자 반경

블레이드에서 발전기에 공급하는 토크 T_{blade} 는 식(9) 와 같다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} \quad (9)$$

이렇게 산출된 블레이드의 토크는 풍력발전기의 용량에 맞게 스케일링한 후 농형유도전동기의 벡터드라이브에 입력하여 터빈의 기계적 특성을 발전기에 전달한다.

그림 7은 터빈특성을 모의하는 부분을 제외한 매트릭스 컨버터를 이용한 이중여자유도 풍력발전시스템의 전체 제어기 모델이다. Grid측을 입력 측으로 그리고 발전기의 회전자 측을 출력 측으로 가정하여 제어기 모델을 나타내었다. 제어기는 그림에 표시한 것처럼 기능을 중심으로 3개의 블록으로 구분할 수 있다.

그림 7의 블록①에서는 Flux estimation과 Slip theta calculation 등의 과정을 수행한다. 발전기를 모델링하기 위해 고정자와 회전자 권선이 모두 Y로 결선된 유도기의 등가회로로 표현하고 이를 고정자와 회전자의 3상 상태 방정식을 d-q 좌표계로 변환하면 식(10)과 같이 정리된다.

$$V_{dr}^g = r_r i_{dr}^g + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^g - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}^g \quad [V] \quad (10)$$

$$V_{qr}^g = r_r i_{qr}^g + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^g + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}^g$$

식(10)에서 위첨자 g 는 기준 좌표계를 의미하기 때문에 정지좌표계이면 's', 동기좌표계이면 'e'로 치환한다. 아래첨자에서 d 와 q 는 d-q 좌표축을 의미한다. 아래첨자의 s 와 r 은 각각 고정자와 회전자를 의미한다. V_x 는 전압을, r_x 는 저항을, i_x 는 전류를, 그리고 λ_x 는 자속을 의미한다. 예를 들어 V_{ds}^s 라고 표기하면 고정자 d축 전압을 정지좌표계로 표현한 것이다. ω_r 은 유도기의 전기적 회전각속도를 의미하고 ω 는 좌표계에 따라서 다른 값을 대입한다. 정지좌표계에서는 $\omega = 0$, 동기좌표계에서는 $\omega = \omega_e$ (동기각속도)를 대입한다.

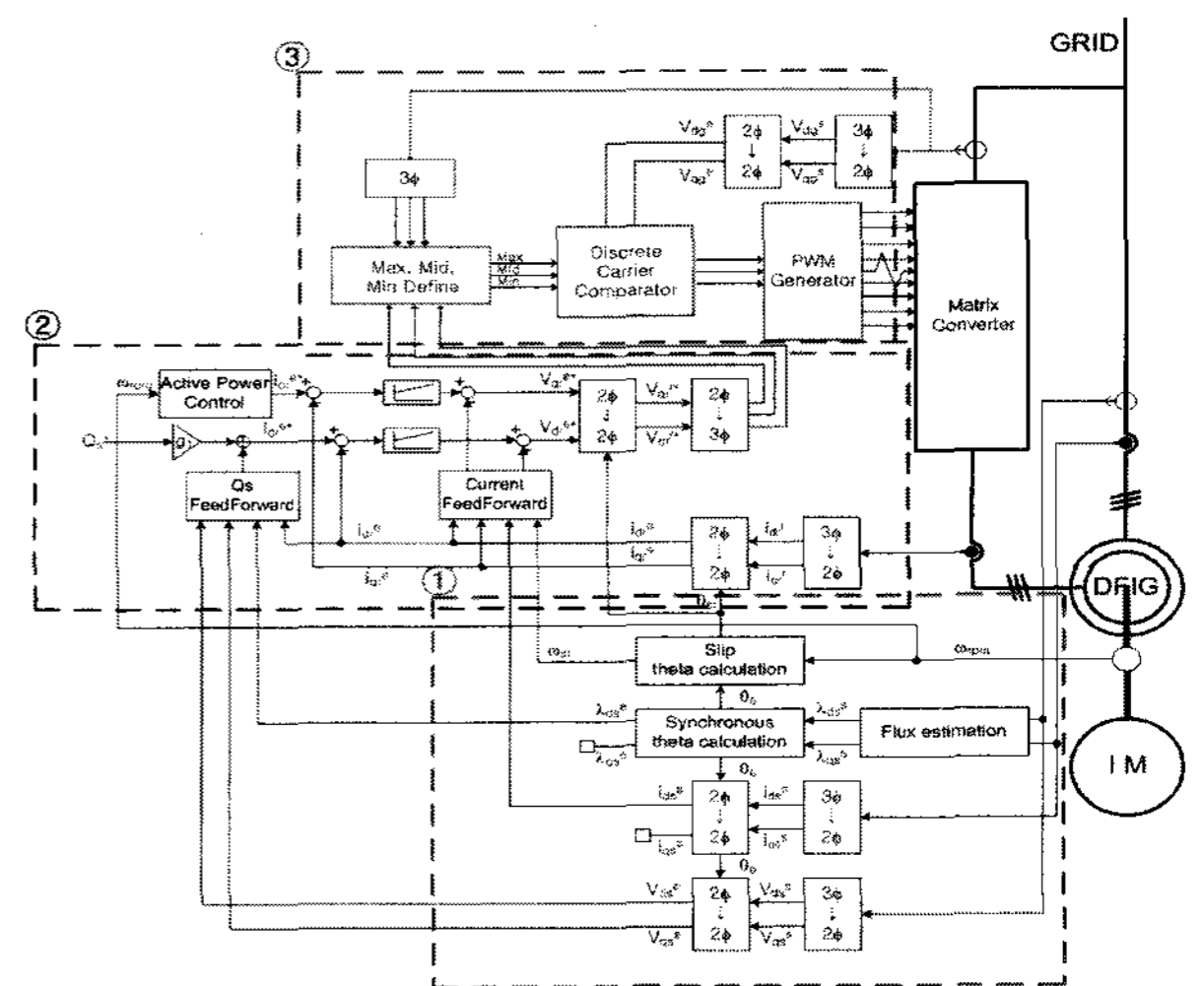


그림 7 매트릭스컨버터를 이용한 풍력시스템 제어기 모델
Fig. 7 System Controller Model of Using Matrix Converter

유도기의 자속은 임피던스와 전류의 곱에 비례한다. 고정자와 회전자 자속은 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^g &= L_s i_{ds}^g + L_m i_{dr}^g \\ \lambda_{qs}^g &= L_s i_{qs}^g + L_m i_{qr}^g \\ \lambda_{dr}^g &= L_m i_{ds}^g + L_r i_{dr}^g \\ \lambda_{qr}^g &= L_m i_{qs}^g + L_r i_{qr}^g \end{aligned} \quad [\text{Wb}] \quad (11)$$

L_m 은 유도기의 자화 인덕턴스, L_s 는 고정자 인덕턴스, L_r 은 회전자 인덕턴스를 의미한다.

그림 7의 블록②에서는 발전기의 유효전력을 제어한다. 유도기의 토크는 유도기에서 발생하는 또는 소비하는 기계적 힘을 의미하며 고정자와 회전자 전류로 표현하면 다음 식(12)와 같다.

$$T_{gen} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s} (\lambda_{qs}^g i_{dr}^g - \lambda_{ds}^g i_{qr}^g) \quad [\text{Nm}] \quad (12)$$

고정자 유효전력과 무효전력을 식(13)에서 정리하였다.

$$\begin{aligned} P_{stator} &= \frac{3}{2} (V_{ds}^g i_{ds}^g + V_{qs}^g i_{qs}^g) \quad [\text{W}] \\ Q_{stator} &= \frac{3}{2} (V_{qs}^g i_{ds}^g - V_{ds}^g i_{qs}^g) \quad [\text{VAR}] \end{aligned} \quad (13)$$

회전자 유효전력과 무효전력도 고정자와 동일한 방법으로 식(14)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{rotor} &= \frac{3}{2} (V_{dr}^g i_{dr}^g + V_{qr}^g i_{qr}^g) \quad [\text{W}] \\ Q_{rotor} &= \frac{3}{2} (V_{qr}^g i_{dr}^g - V_{dr}^g i_{qr}^g) \quad [\text{VAR}] \end{aligned} \quad (14)$$

그림 7의 블록③번에서는 매트릭스 컨버터의 스위칭 신호를 주기 위한 컨버터의 전압변조 과정을 수행한다. 앞의 과정에서 구한 토크 값은 매트릭스 컨버터의 유효 축과 무효 축의 기준 값으로 정의되며 그에 맞게 실측값을 제어하게 된다. 또한 Grid 측의 입력전압을 PLL을 거쳐 Discrete 캐리어 생성을 위한 T1 과 T2 값을 계산 한다. 이렇게 구해진 모든 값을 비교기를 통하여 9개의 매트릭스 컨버터의 스위칭에 인가될 게이트신호를 생성하게 된다.

4. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션

매트릭스 컨버터로 구성된 이중여자유도 풍력발전의 동작을 확인하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 모델은 3상 220V 계통전압과 3.7KW의 권선형 유도발전기를 이용하여 풍력발전 시스템을 구성하였으며 기존의 회전자를 매트릭스 컨버터와 변압기를 이용하여 전력계통에 연계하였다.

표 1 시뮬레이션모델의 정수

Table 1 Parameters of Simulation Model

모선 전압 (L-L)	220 [V]
모선 주파수	60 [Hz]
블레이드 정격 풍속	12 m/s
블레이드 길이	1.78 m
발전기 정격	3.7 [KW]
회전자 축 변압기	110:220 (Δ-Y)
스위칭 주파수	5000 [Hz]
유도 발전기 극수	6극
Cp(max)	0.323

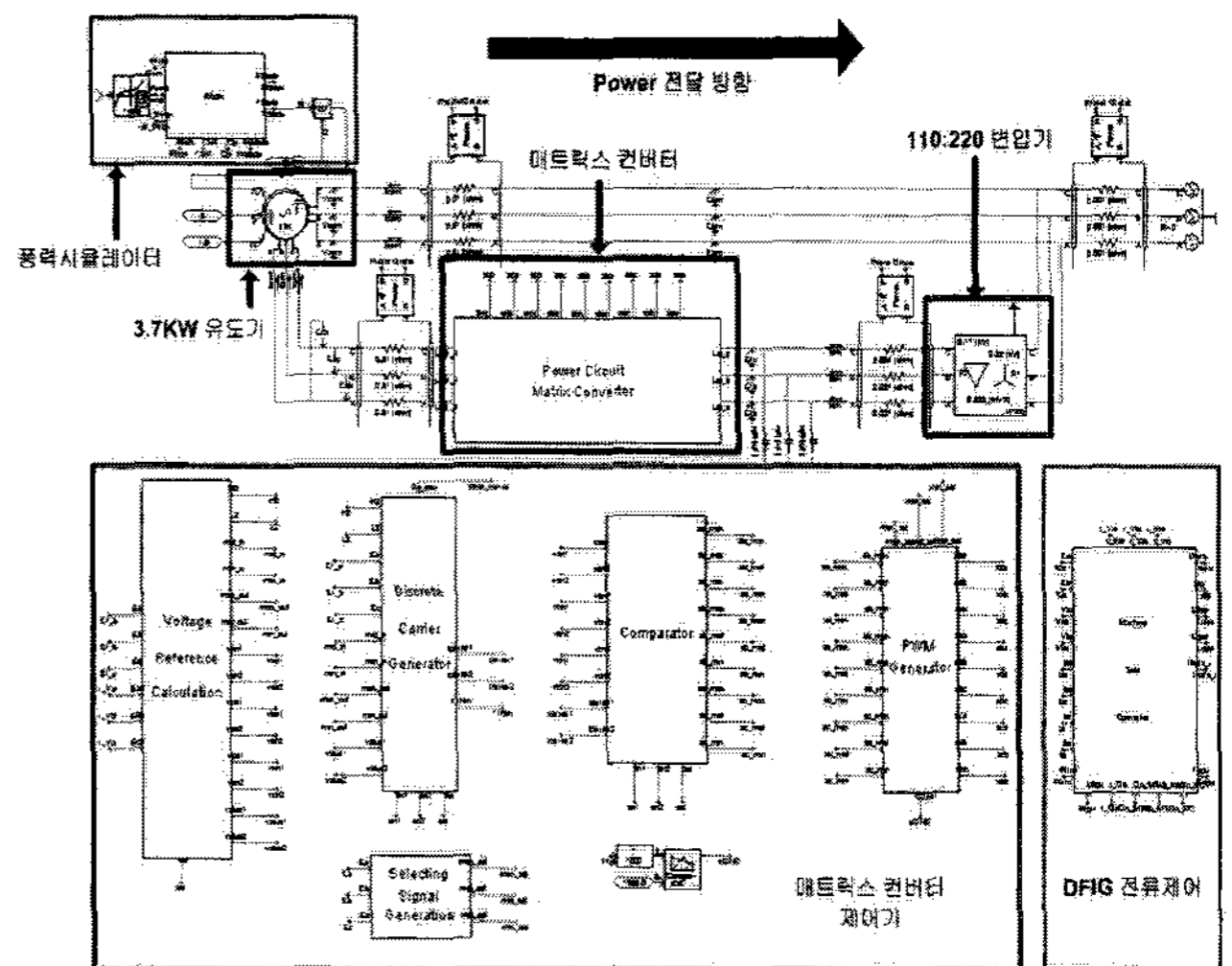


그림 8 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델

Fig. 8 Simulation Model using PSCAD/EMTDC

표 1은 시뮬레이션 모델의 중요파라미터를 나타낸 것이다. 계통전압은 220[V]이며 정격풍속 12 m/s일 때 6극 유도발전기가 동기속도를 내는 것으로 가정하였다. 그림 8은 제안하는 풍력발전 시스템의 전체 시뮬레이션 구성도이다. 시뮬레이션모델은 터빈시뮬레이터, 권선형 유도발전기, 매트릭스 컨버터, 그리고 제어기로 구성되어 있다. 회전자 측에 연결된 매트릭스 컨버터의 출력전압을 전력계통전압과 원만하게 결합하기 위해 110/220V의 변압기를 사용하였다.

그림 9는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그림 9(a)와 같이 풍속이 40초에서 50초까지 11m/s로 증가하고 50초에서 60초까지는 13m/s로 증가한다. 이 때 풍속에 따른 발전기의 회전속도, 고정자와 회전자의 유효전력 그리고 발전기에서 계통에 공급하는 유효전력은 각각 9(b), 9(c), 9(d), 그리고 9(e)와 같다. 이때 고정자의 유효전력은 계통에서 발전기로 공급될 때 (+)의 부호를 갖기 때문에 그림과 같이 부호가 (-)인 경우는 고정자에서 계통으로 유효전력을 공급한다.

회전자의 유효전력도 계통에서 발전기로 공급될 때 (+)의

부호를 갖는다. 따라서 부호가 (-)인 경우는 회전자에서 계통으로 유효전력을 공급한다. 한편 계통으로 전달되는 전체 유효전력도 계통으로 유효전력을 공급할 때 (+)의 부호를 갖게 된다.

그림에서 동기속도보다 느린 경우 고정자는 유효전력을 계통으로 공급하나 회전자는 계통으로부터 유효전력을 공급받는다. 그러나 두 전력의 합은 양으로 터빈이 공급하는 유효전력은 계통으로 공급된다. 동기속도보다 조금 높은 1280rpm에서 회전자의 유효전력은 (+)에서 (-)로 바뀌고 고정자와 회전자의 전체전력이 계통으로 공급된다.

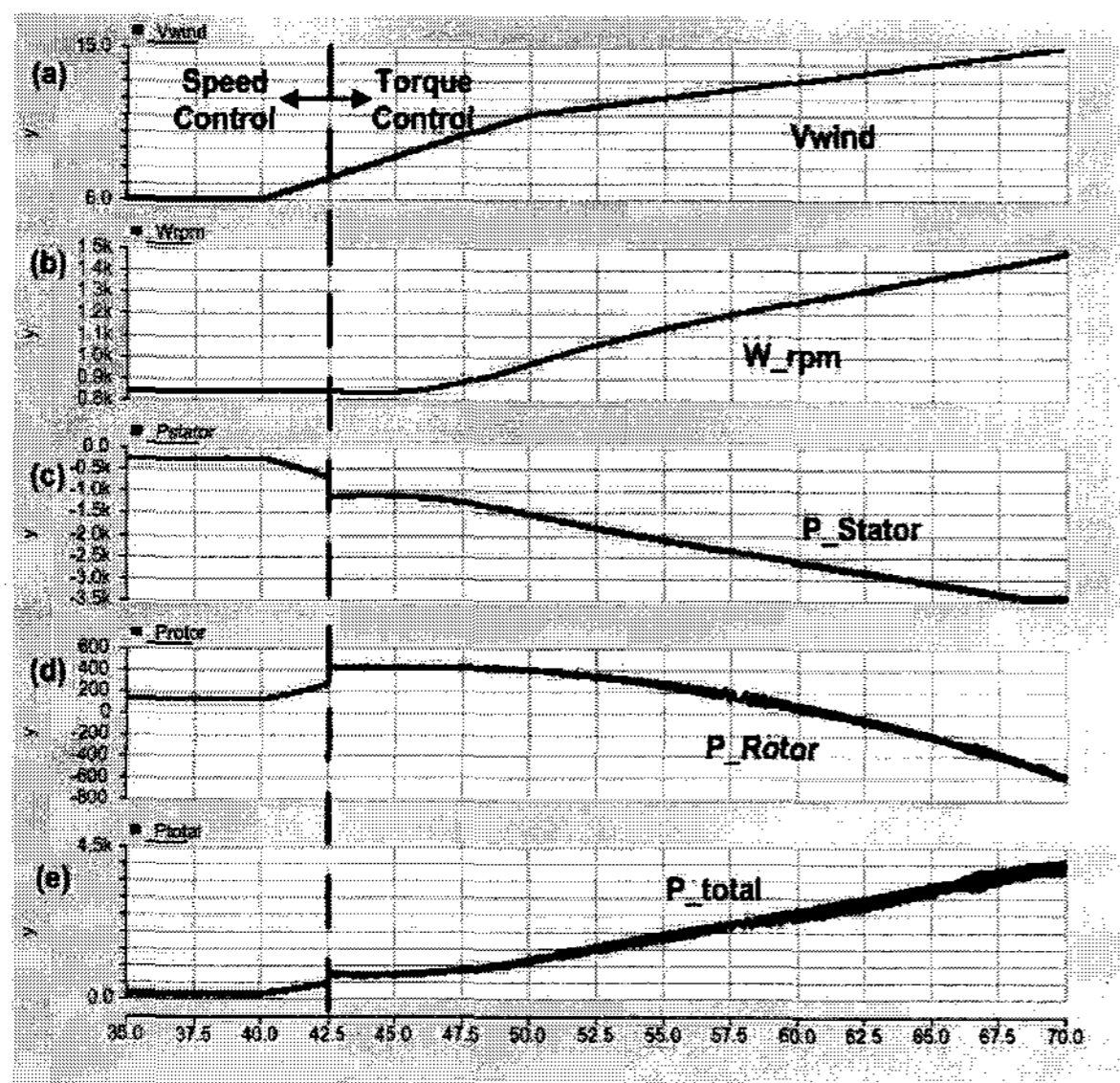


그림 9 발생된 유효전력
Fig. 9 Generated Active Power

그림 10은 발전기의 회전속도 변화에 따른 회전자의 전류, 고정자의 전압, 그리고 회전자의 유효전력을 나타낸 것이다. 발전기의 회전속도는 840rpm에서 동기속도 1200rpm을 지나 1310rpm 까지 동작하는 것을 알 수 있다. 이때 고정자는 계통에 연결되어 있기 때문에 회전속도에 관계없이 전압과 주파수가 일정하다. 또한 고정자에서 계통으로 공급되는 유효전력은 회전속도가 증가함에 따라 증가하고 있다. 한편 회전자의 전류와 주파수는 회전속도에 비례하고 계통으로 공급되는 유효전력도 회전속도에 크기와 부호가 다르다.

그림에서 회전속도가 840rpm일 경우 회전자 전류의 주파수는 슬립에 비례하는 18Hz이다. 회전자 전류는 발전기의 토크에 따라 정해지고 회전속도가 동기속도인 1200rpm 보다 낮은 경우 매트릭스 컨버터에서 회전자로 유효전력을 공급하기 때문에 회전자 측의 유효전력은 (+) 값을 나타낸다.

회전속도가 동기속도일 경우는 슬립이 0 이어서 회전자전류의 주파수는 0의 값을 가지기 때문에 그림에서와 같이 직류형태를 보인다. 또한 동기속도에서는 이론상 회전자의 유효전력은 0을 나타내나 발전기의 손실에 의하여 약간의 (+) 값을 가지는 것을 알 수가 있다.

회전속도가 동기속도 이상인 1310rpm에서는 회전자전류의 주파수는 다시 슬립이 증가하여 교류형태로 나타나며, 회전자의 유효전력은 (-)값을 나타낸다. 즉 발전기의 회전자 측에서 계통으로 유효전력을 공급하게 됨을 알 수 있다.

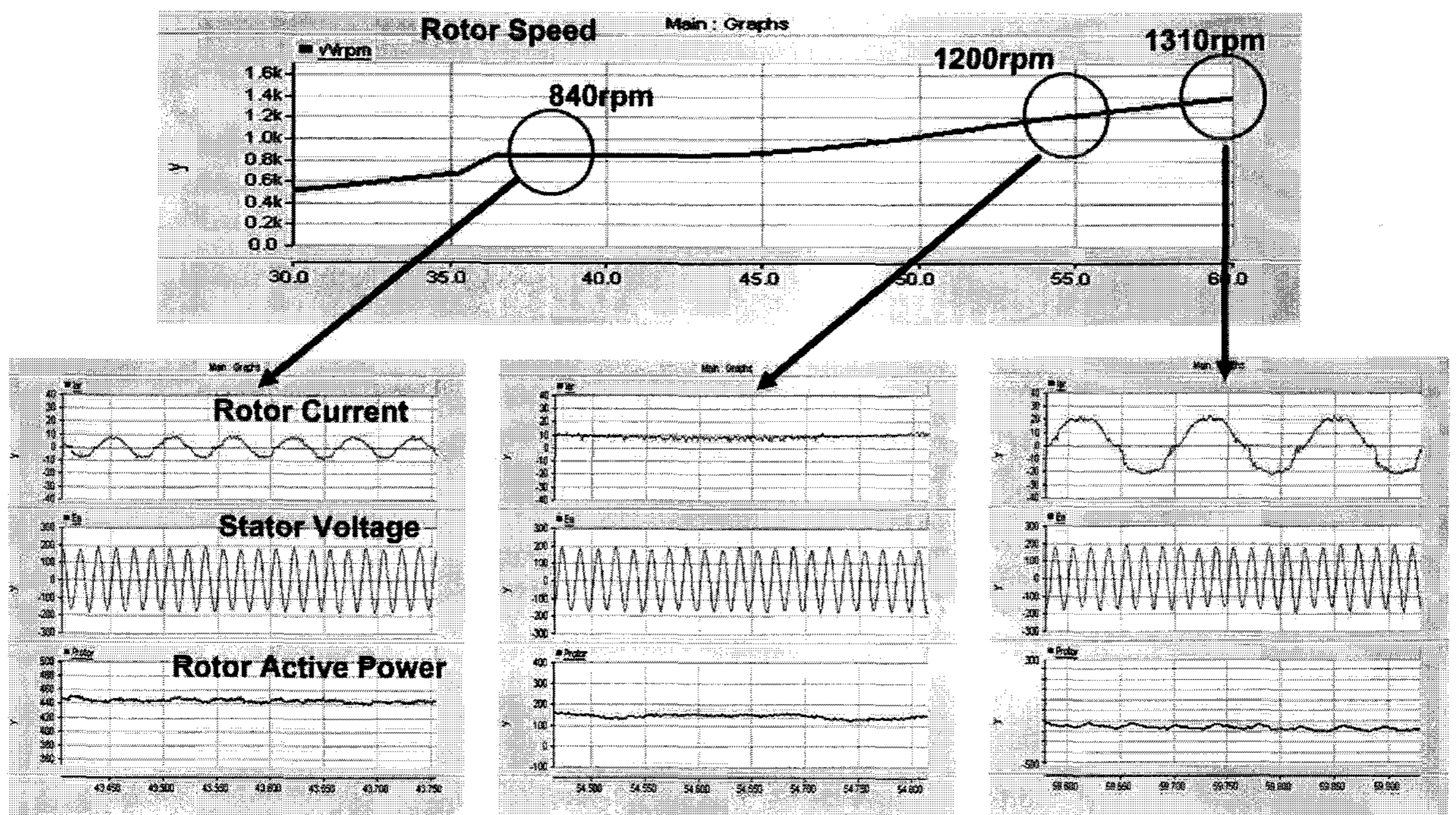


그림 10 회전자속도에 따른 회전자전류, 고정자전압, 회전자유효전력
Fig. 10 Rotor Current, Stator Voltage, Rotor Active Power with respect to Rotor Speed

5. 하드웨어 시뮬레이터

제안하는 시스템의 하드웨어구현 가능성을 확인하기 위해서 유도전동기와 권선형 유도발전기로 구성된 풍력발전 하드웨어 시뮬레이터를 제작하였다. 풍력터빈의 기계적인 특성은 농형유도전동기와 벡터드라이브를 이용하여 모의하도록 설계하였고, 풍력발전기의 전기적인 특성은 권선형 유도발전기와 매트릭스컨버터를 이용하여 모의하도록 설계하였다. 그림 11은 실험에 사용한 풍력발전 시뮬레이터의 사진을 나타낸 것이다. 풍력터빈을 모의하는 농형유도전동기와 벡터드라이브, 그리고 권선형유도발전기는 하나의 모터-제너레이터는 세트로서 구성되어 있다. 매트릭스 컨버터와 제어기는 별도의 판넬에 제작하여 발전기의 회전자와 계통을 결합할 수 있도록 하였다. 제어기는 32bit Floating-Point DSP인 TMS320vc33을 사용하여 제작하였다.



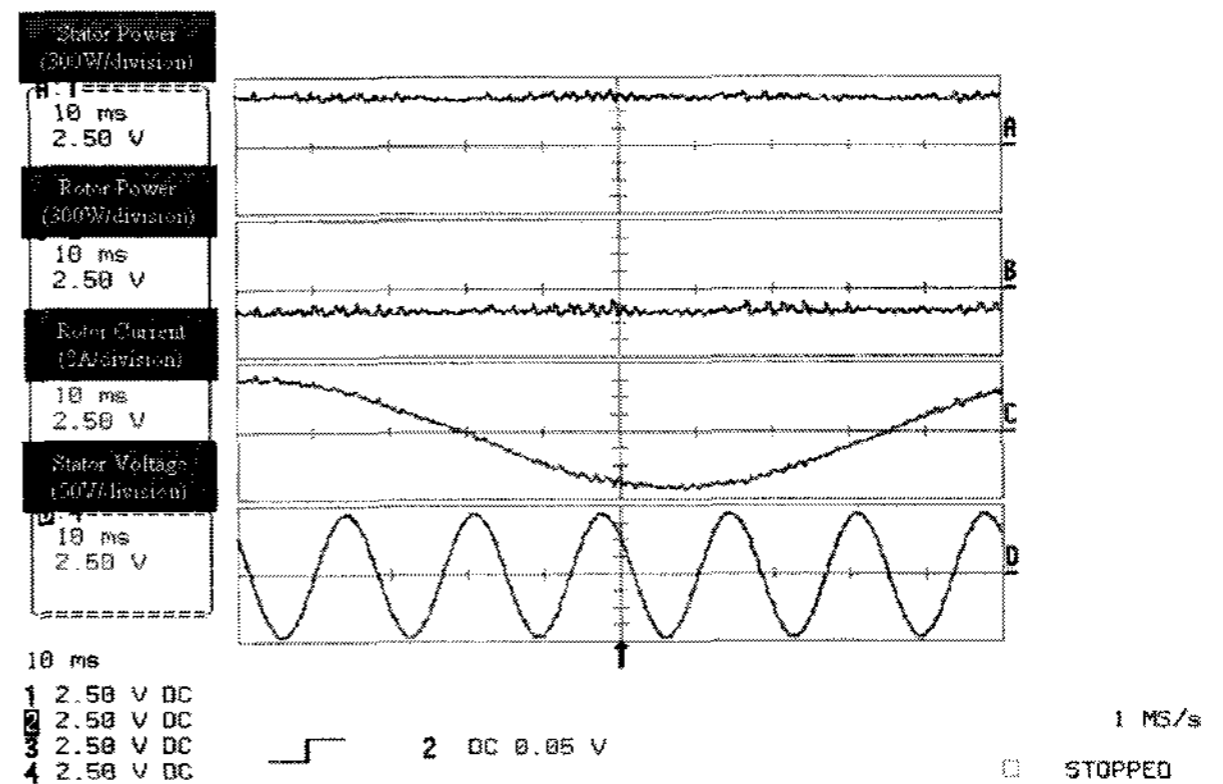
그림 11 하드웨어 축소모형
Fig. 11 Hardware Scaled-model

그리고 표 2는 실험에 사용된 하드웨어 시뮬레이터의 중요회로정수를 나타낸 것이다. 터빈을 모의하는 농형유도전동기는 다양하게 풍력특성을 모의하기 위해 발전기 용량 3.7kW보다 큰 7.5kW를 사용하였다. 또한 매트릭스 컨버터의 낮은 출력전압을 계통전압에 적정하게 결합하기 위해 110/220 변압기를 사용하였다.

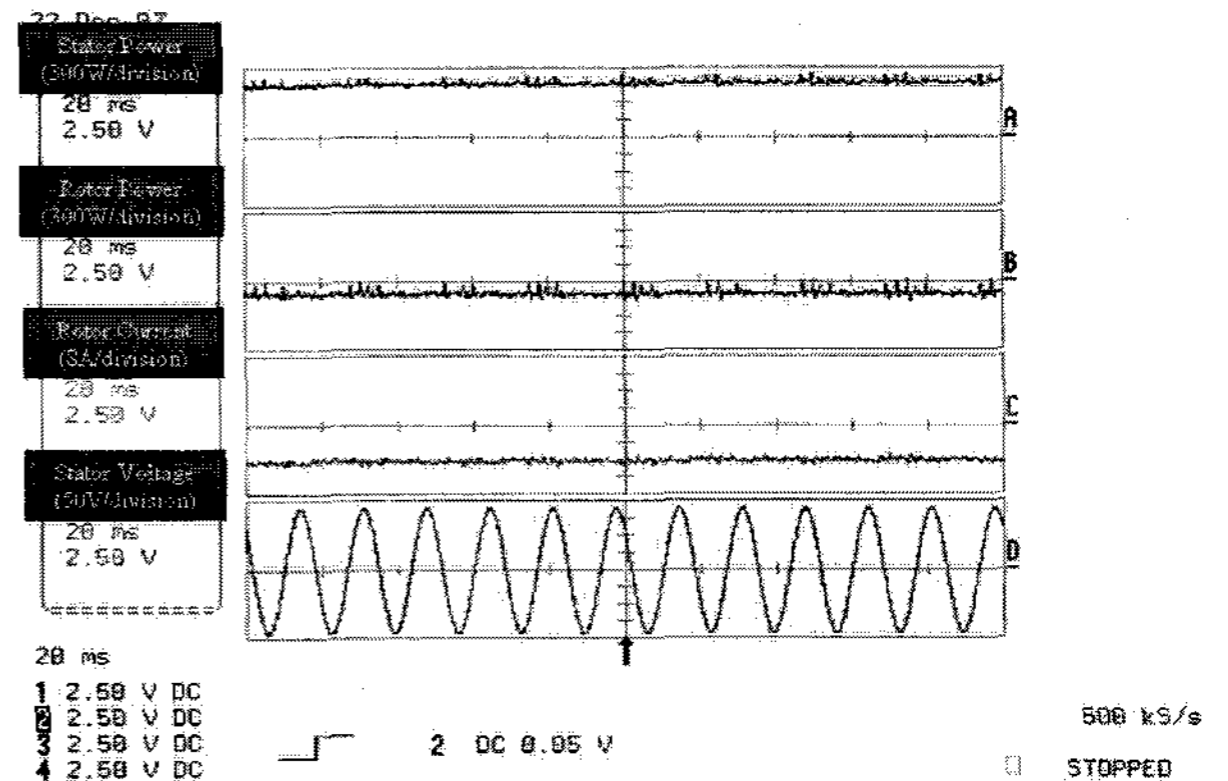
표 2 하드웨어 시뮬레이터의 회로정수
Table 2 Circuit Parameters of Hardware Simulator

전원 전압 (L-L)	220 [V]
모선 주파수	60 [Hz]
Motor 정격용량	7.5 [KW]
Motor 정격 회전속도	1750 rpm
Generator 정격용량	3.7 [KW]
Generator 정격 회전속도	1130 rpm
변압비	110:220 (Δ -Y)
권선형 유도 발전기 극수	6극

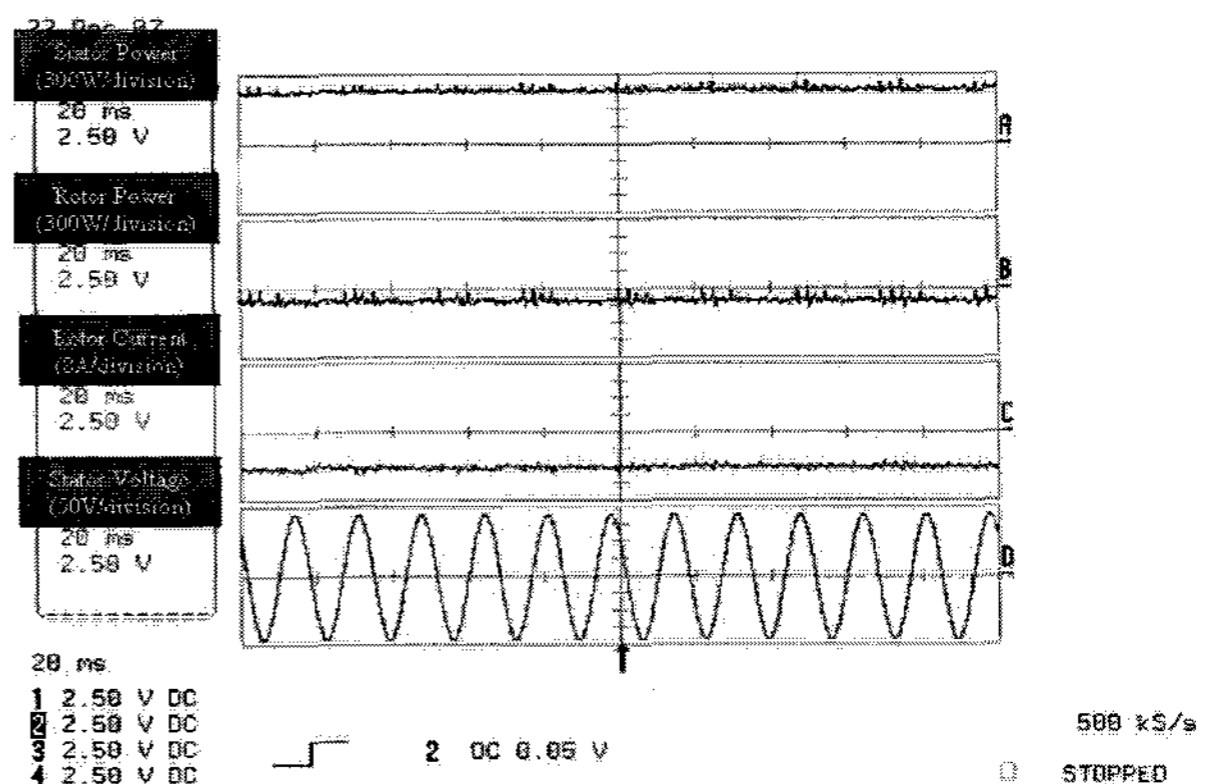
그림 12는 하드웨어 축소모형의 실험결과를 나타낸 것이다. 실험은 권선형 유도발전기를 동기속도 이하인 1000rpm 그리고 1200rpm, 1400rpm 그리고 동기속도 이상인 1600rpm에서 고정자의 유효전력, 회전자의 유효전력, 회전자 A상 전류, 그리고 고정자 A상 전압을 나타낸 것이다. 동기속도는 1200rpm이지만 하드웨어의 특성 때문에 실제적으로 동기속도 특성은 1400rpm에서 나타났다.



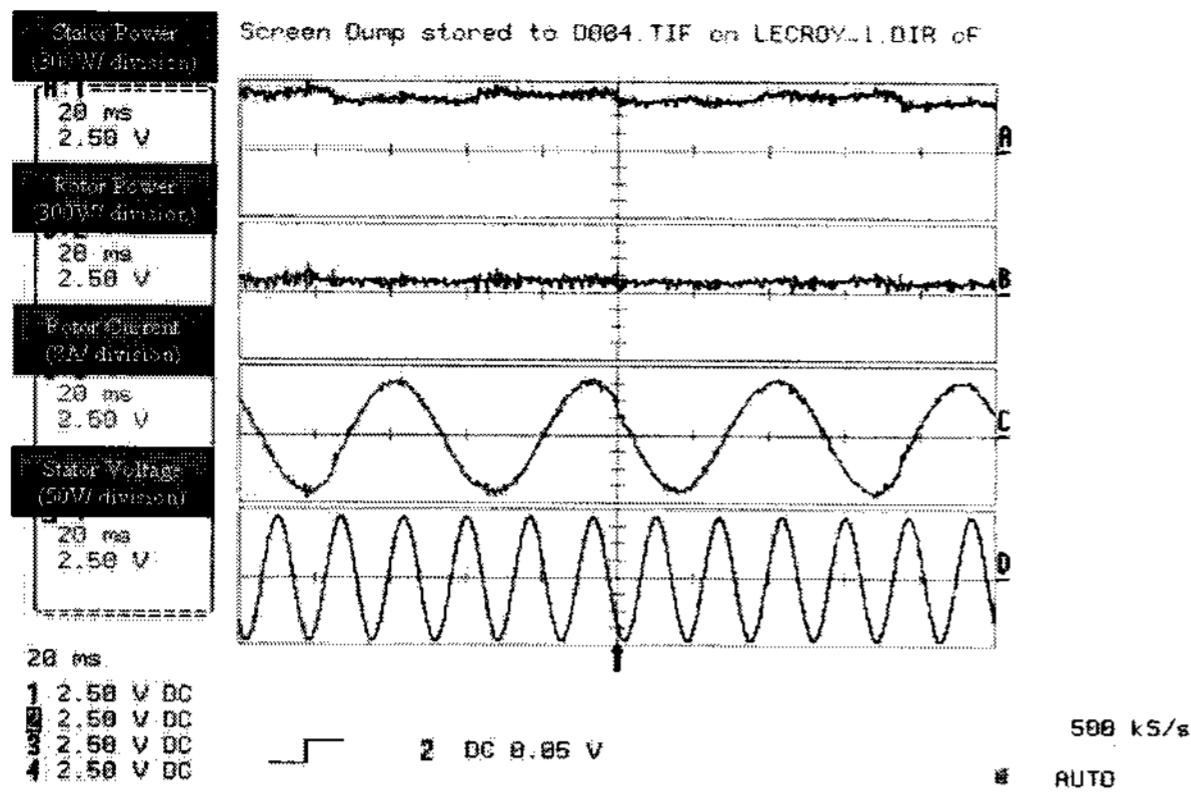
(a) 1000rpm의 실험결과



(b) 1200rpm의 실험결과



(c) 1400rpm의 실험결과



(d) 1600rpm의 실험결과

그림 12 하드웨어 축소모형의 실험 결과

Fig. 12 Experimental Results of Hardware Scaled-Model

그림 12(a)에서와 같이 동기속도 이하인 1000rpm에서는 고정자가 계통에 공급하는 유효전력은 양의 값을 가지나, 회전자의 유효전력은 음의 값을 가져 회전자에서는 유효전력이 발전기 측으로 유입됨을 알 수 있다. 그러나 고정자 측의 유효전력과 회전자 측의 유효전력의 합은 양의 값으로 전체적으로는 블레이드에서 형성된 유효전력이 계통으로 공급됨을 알 수 있다. 또한 고정자의 전압은 계통전압을 유지하고 회전자의 전류는 저주파 교류임을 알 수 있다.

그림 12(c)에서와 같이 동기속도 특성을 나타내는 1400rpm에서는 고정자가 계통에 공급하는 유효전력은 양의 값을 가지고, 회전자의 유효전력은 음의 값을 가져 회전자에서는 유효전력이 발전기 측으로 유입됨을 알 수 있다. 그러나 시스템의 손실에 의해 회전자 측의 유효전력은 영은 아니나 그 크기가 매우 작다. 전체적으로는 블레이드에서 형성된 유효전력이 계통으로 공급됨을 알 수 있다. 또한 고정자의 전압은 계통전압을 유지하고 회전자의 전류는 슬립이 영이어서 직류임을 알 수 있다.

그림 12(d)는 동기속도 이상인 1600rpm에서의 실험 파형을 나타낸 것인데, 고정자와 회전자의 유효전력이 모두 양임을 알 수 있어 블레이드에서 형성된 유효전력이 2개의 경로로 계통에 공급됨을 알 수 있다. 또한 고정자의 전압은 계통전압을 유지하고 회전자의 전류는 다시 슬립이 증가하여 교류가 됨을 알 수 있다.

6. 결 론

매트릭스컨버터를 이중여자유도발전 풍력발전시스템에 적용하는 연구는 이미 제안되었으나 시뮬레이션으로 확인하는 정도였다. 그러나 매트릭스컨버터는 양방향 전력제어를 할 경우 스위칭동작이 커뮤테이션에 민감하여 하드웨어구현이 대단히 어렵다.

본 논문에서는 스위칭조작이 간단하고 신뢰성이 높은 출력전압 변조기법을 갖는 매트릭스컨버터를 이중여자유도발전 풍력발전시스템에 적용하였다. 제안하는 풍력발전시스템의 동작을 검증하기 위해 시뮬레이션모델을 개발하고, 실험실에 하드웨어축소모형을 제작하여 실험을 통해 하드웨어구현 타당성을 입증하였다.

제안하는 이중여자유도 풍력발전시스템은 Back-to-Back 컨버터를 사용하는 기존시스템과는 달리 DC-Link 제거로 시스템의 효율향상과 간소화가 가능한 이점을 갖는다. 또한 영구자석형 풍력발전시스템에도 적용 가능하다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 기초전력 연구원 중기과제(과제번호 RB-2005-B-136)와 에너지 자원인력양성사업의 결과물입니다.

참 고 문 헌

- [1] Dr. Eggaert, S. Franko, "Innovative Variable Speed Drive for Doubly Fed Wind Turbine Application," 2002 Global Wind Power Conference, July 2002.
- [2] 한병문, 이범규, 전영수, 이광열, "유도발전기식 풍력발전시스템의 STATCOM 적용 타당성 분석", 대한전기학회 논문지, 53A권 6호, pp.309-315, 2004년 6월.
- [3] Chad Abbey, Geza Joos, "Optimal Reactive Power Allocation in a Wind Powered Doubly-Fed Induction Generator," 2004 IEEE Power Engineering General Meeting, pp. 1492-1496, June 2004.
- [4] Rajib Datta, V. T. Ranganathan, "A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 18. no. 1, pp. 163-168, March 2003.
- [5] L. Zhang and C. Watthanasarn, "A Matrix Converter Excited Doubly-Fed Induction Machine as A Wind Power Generator", IEE 7th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, pp. 532-537, London, Sept. 1998.
- [6] K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E. Berkouk, "Application of Matrix Converter for Variable Speed Wind Turbine Driving an Doubly-Fed Induction Generator", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006, pp. S3-38-42, 2006.
- [7] S. Pinto, L. Aparicio, and P. Esteves, "Direct Controlled Matrix Converters in Variable Speed Wind Energy Generation Systems", International Conference on Power Engineering 2007, Setubal, Portugal, pp. 654-659, April 12-14, 2007.
- [8] Young-Doo Yoon and Seoul-Ki Sul, "Carrier-Based Modulation Technique for Matrix converters." IEEE Trans. Power Electron, vol. 21, no.6, pp.16.1691-1703, Nov.2006.

저 자 소 개



이 동 근 (李 東 根)

1981년 7월 23일생.
2006년 명지대 전기공학과 졸업.
2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
현재 LS전선 중앙연구소 연구원.
Tel : 031-450-8249
FAX : 031-321-0271
E-mail : dongkn@lscable.co.kr



리 위 룡 (李 玉 龍)

1982년 8월 14일생.
2004년 8월 중국 북경석유화학대학교 전자통신공학과 졸업.
2006년 2월 전남대학교 전기공학과 졸업(석사).
현재 전남대학교 전기공학과 박사과정.



권 기 현 (權 起 鉉)

1966년 4월 12일생.
1988년 부산대학교 전기공학과 졸업.
1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
현재 LS산전 중앙연구소 책임연구원.
명지대학교 박사과정.
E-mail : ghkwon@lssis.biz



최 남 섭 (崔 南 燮)

1963년 3월 5일생.
1987년 고려대 전기공학과 졸업.
1989년 KAIST 전기 및 전기공학과 졸업(석사).
1994년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학박).
1995년~현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수.



한 병 문 (韓 炳 文)

1953년 7월 5일생.
1976년 서울대 전기공학과 졸업.
1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
미 Westinghouse중앙연구소 선임연구원.
현재 명지대 전기공학과 교수.
Tel : 031-330-6366
FAX : 031-321-0271
E-mail : erichan@mju.ac.kr



최 영 도 (崔 泳 道)

2000년 명지대학교 전기전자공학부 졸업.
2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
2005년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 근무.