

# 농형유도 풍력발전시스템을 위한 유·무효전력보상장치

양승철 · 주영아 · 한병문  
명지대학교

## Active and Reactive Power Compensator for Wind Power System with Squirrel-Cage Induction Generator

Seung-Chul Yang · Young-Ah Ju · Byung-Moon Han  
Myong-Ji University

### ABSTRACT

Abstract - A wind power system with squirrel-cage induction generator has irregular change of output power according to the sudden change of wind speed. This paper describes the development of a active and reactive power compensator, which is composed of a 3-phase inverter and a bidirectional DC/DC converter with super-capacitor. The operational characteristic was analyzed through simulations with PSCAD/EMTDC and experimental works with a scaled model. The developed system can continuously compensate the active power change with energy storage and the reactive power change with 3-phase inverter.

### 1. 서 론

현재 화석연료의 고갈과 전력수요 증가, 국제적인 환경규제에 대한 능동적인 대처를 위해 신·재생에너지에 관한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 그런데 신재생에너지의 경우 기상조건에 따라 출력이 급작스럽게 변동하므로 에너지저장장치에 의한 출력보상이 필요하다.[1]

풍력발전시스템은 농형유도발전기, 권선형유도발전기, 영구자석동기발전기 등이 사용되고 있는데 농형유도발전기는 구조가 간단하고 별도의 전력변환기가 필요하지 않아 시스템이 간편하고 가격이 싼 장점이 있다. 그러나 유도발전기의 특성상 회전자계를 공급하기 위해 무효전력을 소모하고, 이 무효전력의 양은 풍속에 따라 변동한다.[2] 무효전력 변동은 연계된 전력계통의 안정도를 저하 시키는 원인이 되므로 인버터식 무효전력보상기인 STATCOM을 선로와 병렬로 연결하여 실시간으로 유도발전기에서 필요로 하는 무효전력을 공급한다.[3]

그런데 농형유도발전기는 소모하는 무효전력 뿐만 아니라 연계된 전력계통에 공급하는 유효전력도 풍력터빈에 공급되는 풍속에 따라 불규칙하게 변동이 나타난다. 그림 1은 미국 하와이에 설치된 풍력발전의 유효전력을 5분 동안 측정된 결과를 나타낸 것인데 최대 4.2MW에서 최소 3.3MW 까지 변하는 것을 알 수 있다. 이렇게 짧은 시간동안 나타나는 유효전력의 변화는 연계된 전력계통에 나쁜 영향을 주는 문제점으로 나타난다.[5]

본 논문에서는 풍속의 변동에 따라 농형유도발전기가 소모하는 무효전력과 생산하는 유효전력의 변동을 실시간으로 보상

하기 위해 3상인버터와 DC/DC 컨버터, 그리고 슈퍼캐패시터로 구성된 보상장치를 제안한다.

본 연구에서 제안하는 유·무효전력보상장치는 무효전력은 3상인버터를 STATCOM으로 동작하여 실시간 보상을 하고 유효전력은 DC/DC 컨버터와 슈퍼캐패시터를 통해 보상을 하도록 설계하였다. 제안하는 시스템의 동작은 PSCAD/EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션모델을 개발하여 확인하였고, 실질적인 성능검증은 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 통해 실시하였다.

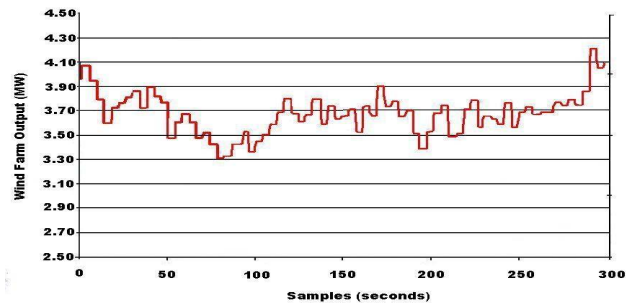


그림 1. 풍속에 따른 풍력발전기의 출력변동  
Fig 1. Output Change of Wind Power Due to Wind Speed Variation

### 2. 본 론

#### 2.1 제안하는 유·무효전력보상장치

그림 2는 본 논문에서 제안하는 유·무효전력 보상기의 제어블록다이어그램을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 농형유도풍력발전 시스템과 계통을 직접 연결하여 양방향 DC/DC 컨버터와 STATCOM을 통해 유·무효전력을 보상하였다. 보상기의 동작원리는 다음과 같다. 우선 DC링크 전압을 제어하기 위해 DC링크 제어를 통해 유효전류 기준값  $I_{dc}^*$ 를 생성하고 이를 d-q 변환된 실제 유효전류  $I_{dc}$ 와 DC/DC 컨버터를 통해 흐르는 전류  $I_{dcn}^*$ 을 비교한 후 전류제어를 한다. 또 무효전력을 보상하기 위해 무효전류 기준값  $I_{qe}^*$ 를 만들고 이를 실제 무효전류  $I_{qe}$ 와 함께 전류제어를 한다. 이렇게 전류제어를 통해 생성된 기준전압 유·무효성분  $V_{dc}^*$ ,  $V_{qe}^*$ 를 역변환 한 다음 PWM발생기를 통해 발생된 신호는 게이트 드라이브를 통해 STATCOM에 게이트 펄스 신호를 보낸다. 또한 유효전력을 보상하기 위해서 발전기측 유효전력  $P_g^*$ 와 계통측 유효전력  $P_s^*$ 를 비교한 후 슈퍼캐패시터 전압으로 나누어 캐패시터에 흐르는 기준전류

값  $I_{edlc}^*$ 를 만들어 낸다. 이 기준값은 전류제어기, PWM발생기를 거쳐 DC/DC 컨버터에 게이트 펄스 신호를 보낸다.

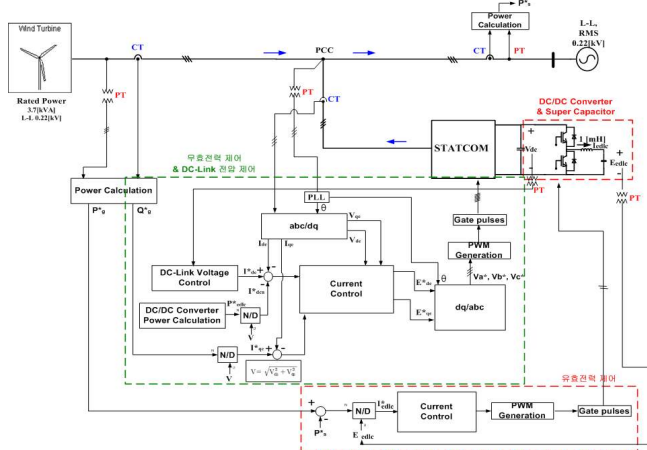


그림 2. 제안하는 유·무효전력 보상장치 구성도

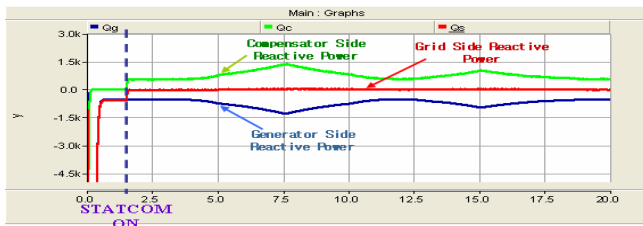
Fig 2. Configuration of proposed Active and Reactive Power compensator

수퍼캐패시터는 발전기측 전력이 계통으로 보내고자 하는 일정전력 보다 클 때, 충전을 하고 일정전력 이하로 내려갈 때 방전을 시작한다.

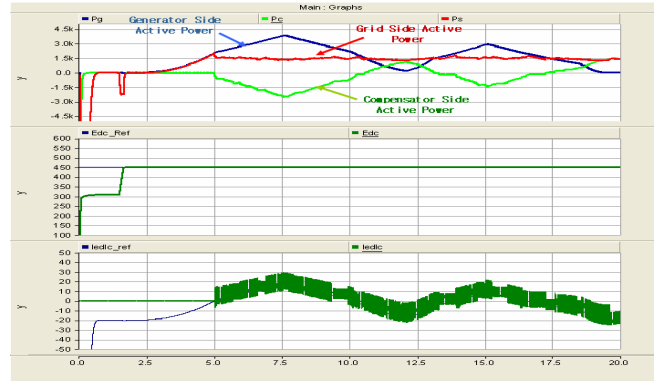
### 2.3 시뮬레이션

본 연구에서 제안하는 유·무효전력 보상기의 동작과 성능을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 다양한 시뮬레이션을 실시하였다.

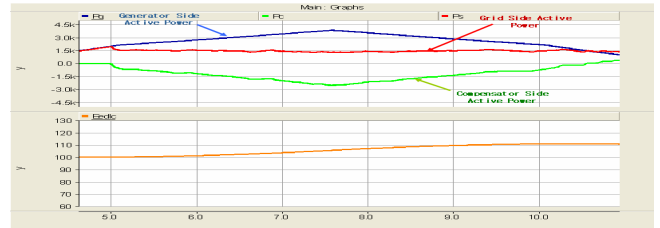
그림 3은 가변속 풍속에 따른 유·무효전력보상 동작을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 유효전력과 동시에 이루어지는 실시간 무효전력보상 동작의 모습을 나타낸다. 계통측 전력의 역률은 1로 보상되고 있다. 그림 3(b)는 5초에서 유효전력 보상기를 투입하였을 때 계통으로 보내는 전력을 1.5kW로 일정하게 보상하는 모습을 나타낸다. 이 때 DC링크 전압이 안정적으로 제어됨을 확인 할 수 있고 수퍼캐패시터에 흐르는 실제전류가 기준 전류값을 추종함을 확인 할 수 있다. 그림 3(c)와 (d)는 유효전력 보상기를 투입하였을 때 수퍼캐패시터가 계통으로 전력을 일정하게 보내면서 최대전압 범위 안에서 충·방전하는 모습을 나타낸다. 그림 3(c)에서 발전전력이 기준치 이상일 때 수퍼캐패시터의 충전과 함께 일정전력을 계통으로 보내는 것을 확인 할 수 있고 그림 3(d)는 발전전력이 기준치 이하로 떨어졌을 때 수퍼캐패시터가 방전하면서 계통으로 보내는 전력을 일정하게 유지하고 있음을 확인 할 수 있다.



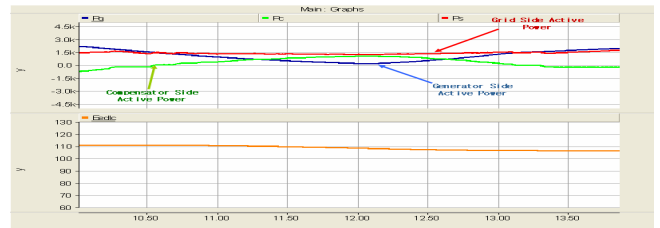
(a) 실시간 무효전력 보상



(b) 전체구간에서의 유효전력 보상, DC링크 전압, 수퍼캐패시터 기준 전류값에 대한 실제전류



(c) 충전구간에서의 유효전력 및 수퍼캐패시터 전압



(d) 방전구간에서의 유효전력 및 수퍼캐패시터 전압

그림 3. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과

Fig 3. Simulation Results of PSCAD/EMTDC

### 2.4 하드웨어 제작 및 실험

제안하는 유·무효전력 보상기의 하드웨어 구현을 통한 동작검증을 위해 그림 4와 같이 유도전동기와 농형유도발전기로 구성된 MG-Set는 MCCB를 통해 계통에 직접 연계된다. 보상기는 병렬로 연결하여 실험을 실시하였다. DC/DC 컨버터와 3상 인버터의 스위칭 소자로는 1200V/750A 듀얼 IGBT 4개를 사용하였다. 제어기는 TI사의 DSP인 TMS320vc33을 이용하였으며 풍력터빈시뮬레이터의 풍속은 개발한 HMI프로그램에 의해 RS232통신으로 받게 된다.

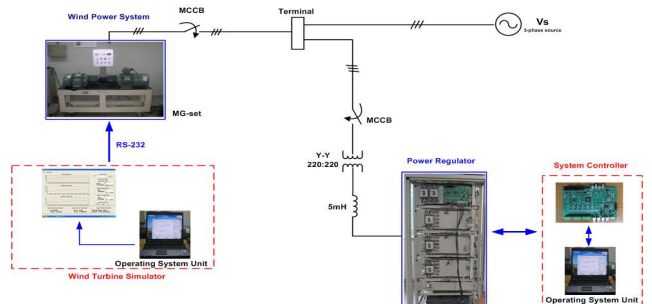


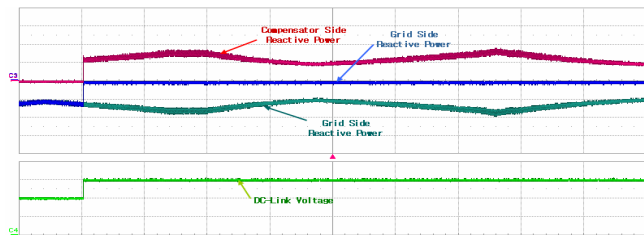
그림 4. 하드웨어 실험 구성도

Fig 4. Configuration of Hardware Experiment

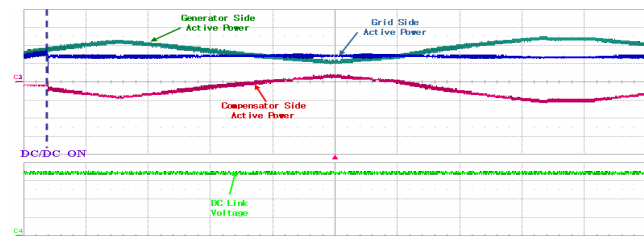
실험에 사용한 모든 전력파형의 크기는 1k/div로 하였다.

그림 5(a)는 STATCOM동작을 하였을 때 실시간 무효전력 보상의 모습을 나타낸다. 계통측 전력의 역률은 1로 보상된다. 이 때 DC링크 전압은 안정적으로 제어 되고 있다.

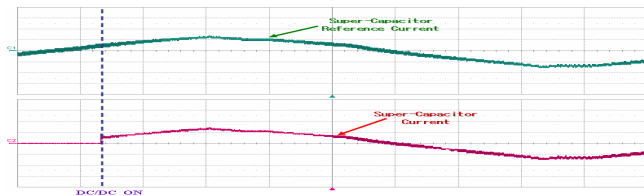
그림 5(b)는 1.5kW로 유효전력을 보상 하였을 때의 각 부분 유효전력 파형이다. 발전기측 유효전력이 발생하였을 때 이에 대한 보상기측 유효전력이 발생하여 계통측 유효전력을 1.5kW로 일정하게 유지시켜 주고 있다. 이 때 DC링크 전압은 일정하게 유지 하고 있다. 그림 5(c)는 슈퍼캐패시터에 흐르는 전류가 기준값을 추종함을 보여준다. DC/DC 컨버터 스위치 ON시 실제 전류가 기준 전류값을 추종함을 확인할 수 있다. 그림 5(d)는 발전기 전력이 1.5kW이상 일 때 충전구간에서의 유효전력 보상동작의 모습이다. 1.5kW의 유효전력을 계통으로 일정하게 보내는 것과 동시에 슈퍼캐패시터의 전압이 상승하는 것을 알 수 있다. 그림 5(e)는 방전구간에서의 유효전력 보상동작의 모습을 나타낸 것이다. 발전기의 유효전력이 1.5kW이하로 떨어질 때 계통의 유효전력을 1.5kW로 일정하게 보내는 것과 동시에 슈퍼캐패시터의 전압이 하강하는 것을 알 수 있다.



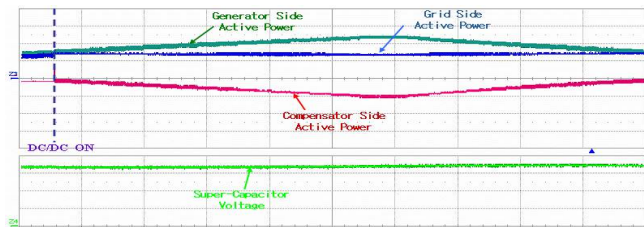
(a) 실시간 무효전력 보상, DC링크 전압



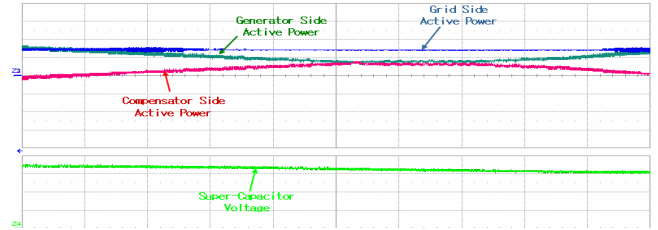
(b) 전체 구간에서 유효전력 보상, DC링크 전압



(c) 슈퍼캐패시터 기준전류, 실제 흐르는 전류



(d) 충전구간에서의 유효전력 및 슈퍼캐패시터 전압(1.5kW이상)



(e) 방전구간에서의 유효전력 및 슈퍼캐패시터 전압(1.5kW이하)  
그림 5. 하드웨어모델 실험 결과

Fig 5. Experimental Results of Hardware Model

### 3. 결론

본 논문에서는 풍속의 변동에 따라 농형유도발전기가 소모하는 무효전력과 생산하는 유효전력의 변동을 실시간으로 보상하기 위해 3상인버터와 DC/DC 컨버터, 그리고 슈퍼캐패시터로 구성된 보상장치를 제안하였다.

본 연구에서 제안하는 유·무효전력보상장치는 무효전력은 3상인버터를 STATCOM으로 동작하여 실시간 보상을 하고 유효전력은 DC/DC 컨버터와 슈퍼캐패시터를 통해 보상 하도록 설계하였다. 제안하는 시스템의 동작은 PSCAD/EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션모델을 개발하여 확인하였고, 실질적인 성능검증은 하드웨어 축소모형을 제작하고 실험을 통해 실시하였다.

또한 실험에 사용된 풍력발전시스템은 유도전동기와 농형유도발전기로 이루어진 하드웨어시뮬레이터로, 별도로 개발한 HMI 프로그램에 의해 풍속데이터를 입력받아 특정 풍력터빈의 토크를 소프트웨어적으로 산출한 후 유도전동기드라이브에 통신으로 공급하여 유도전동기가 풍력터빈과 유사한 축 토크를 유도발전기에 전달하도록 제작되어있다.

본 논문에서 개발한 유·무효전력보상장치는 농형유도 풍력발전에서 급작스런 풍속변동이나 Tower Effect 등에 의한 순간 전력강하를 보상하는데 유용하다.

본 연구내용은 지식경제부가 지원하는 고급인력양성 프로그램에 의하여 명지대학교 분산전원복합운용연구센터를 통해 달성된 결과입니다.

### 참고 문헌

- [1] TATSUTO KINJO, TOMONOBU SENJYU, KATSUMI UEZATO, HIDEKI FUJITA, "Output Leveling of Wind Power Generation System by EDLC Energy Storage System", Vol.154, No.4,2006
- [2] 송승호, 김일환, 한 병문, "풍력발전기의 전기적 특성과 계통연계시 상호작용", 전력전자학회지, 제8권 제6호, 2003. 12, pp. 21 ~ 27 (7pages)
- [3] 한병문, 이범규, 전영수, 이광열, "유도발전기식 풍력발전시스템의 STATCOM 적용 타당성 분석", 대한전기학회논문지, v.53, no.6, pp.309-315, 2004년 6월
- [4] 이두영, 윤동진, 정종규, 양승철, 한병문, 송승호, "영구자석동기발전기 풍력시스템의 하드웨어 시뮬레이터 개발", 대한전기학회논문지 (2007), v.57, no.6, pp.951-958
- [5] S&C Electric Company, "Pure Wave Power Protection Systems", Technologies for Renewable Energy, pp.33~34