

## 풍력발전시스템의 출력제어를 위한 에너지저장장치의 Fuzzy PI제어기 설계에 관한 연구

이희태\*, 구분길\*, 이상훈\*, 박준호\*  
부산대학교\*

### Wind turbine output control using Fuzzy PI controller of Energy storage system

Hee-tae Lee\*, Bon-gil Koo\*, Sang-hun Lee\*, June-ho Park\*  
Pusan National University\*

**Abstract** - This paper presents an active and reactive power compensator for the wind power system with multi-polar synchronous generator. The proposed compensator is composed of a charge/discharge PWM converter and battery.

The output power of a wind power system changes irregularly according to the variation of wind speed. The developed system is able to continuously compensate the active and reactive power.

The operational feasibility of the proposed model was verified by simulations with PSCAD/EMTDC.

#### 1. 서 론

경제의 지속적인 발달과 인구의 증가로 인해 에너지의 소비가 급증하고 이에 따른 에너지자원의 고갈과 화석연료 등의 이용으로 발생하는 이산화탄소의 배출 및 이로 인한 환경문제와 지구 온난화의 문제, 산성비 등으로 인류는 생존의 위협을 받고 있다. 특히 우리나라는 에너지자원의 90% 이상을 수입에 의존하고 있으며 에너지 수입액은 연간 200억\$, GNP 생산에 소비되는 에너지량은 선진국의 3배에 이르는 에너지 다 소비 국가이다. 최근 10년간 우리나라의 에너지 소비는 매년 10%라는 세계 최고의 증가율을 기록하고 있다. 따라서 대체에너지 개발의 필요성은 더욱 무게 중심을 더해가고 있는 실정이다.

대체에너지는 1990년대에 들어서 기후변화협약에 따른 환경문제가 범세계적으로 심각하게 대두됨에 따라 삶의 질을 향상시킬 수 있는 환경 친화적 에너지 기술로써 새로운 각광을 받게 되었으며, 그 동안의 저가·고효율 기술개발의 성과와 사회·환경비용의 정량적 평가기법의 확립과 적용에 의한 경제성의 상승효과 때문에 급격한 시장증가 추세를 나타내고 있다. 따라서 에너지의 해외의존도가 높은 우리나라는 대체에너지 개발과 보급이 경제난 극복을 위한 매우 시급한 과제라고 생각된다. 이에 대한 대책의 일환으로 풍력발전 및 태양광발전, 연료전지발전, 열병합발전 등이 환경 친화적인 대체 에너지원으로 주목받고 있으며 선진국에서는 이들 대체에너지의 개발사업을 본격적으로 추진하고 있다.

이미 1980년대 중반부터 유럽 지역에서는 청정 에너지의 필요성을 미리 내다 보고 풍력을 이용한 에너지 생산 기술이 꾸준한 발전을 거듭한 결과 지금은 유럽 전력 생산의 30~40%를 차지하는 성과를 얻을 수 있었다. 이것은 급기야 유럽만의 정책적인 방향으로 그치지 않고 범세계적인 정책적 방향으로 자리 잡게 되었고 한국에서는 향후 10년 이내에 풍력발전이 차지하는 비중을 전체 전기 생산의 20%까지 끌어올린다는 정책을 수립하게 되었다. 그런데 풍력발전과 같이 기상 조건에 따른 출력이 급작스럽게 변동하는 시스템의 경우 출력의 불규칙성으로 인해 주변 계통 수용가와 부하의 전압, 주파수 등의 전력품질에 악영향을 미칠 우려가 있다. 이러한 문제점에 대한 해결방법 중의 하나가 전력저장 기술이다.

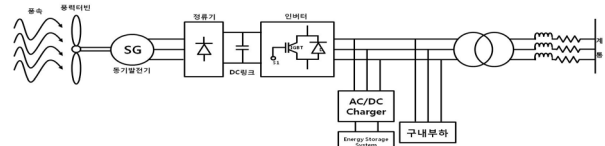
본 연구에서는 풍속에 따라 변동하는 다극형 동기 풍력발전시스템의 유·무효전력의 변동을 실시간으로 보상하기 위해 충·방전 PWM컨버터와 배터리로 구성된 보상장치를 구성하고, 계통에서 요구하는 유·무효전력과 실제 공급되는 유·무효전력의 오차를 이용하여 전력보상을 위한 Fuzzy PI제어기를 제안하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전체 시스템 구성

그림 1.은 전체적인 시스템 회로를 나타낸 것으로 가변속 드라이브, 고정 피치각 풍력터빈 및 동기발전기로 구성되며, AC-DC-AC 변환장치를 통해 발전된 전력이 로컬부하나 계통으로 안정하게 공급될 수 있도

록 한다. 마지막으로 충/방전 PWM 컨버터에서는 풍력 발전량과 계통에서 요구하는 전력량을 비교하여 그 차이만큼의 에너지를 배터리에서 충/방전 할 수 있도록 배터리의 전력량을 제어하여 전체 시스템의 에너지 흐름을 관리한다. 풍력발전이 접속된 계통은 그 용량이 풍력발전 정격용량에 비해 매우 커서 풍력발전 출력의 변동에 의해 전압 및 주파수가 동요되지 않는 무한 모션으로 고려한다.

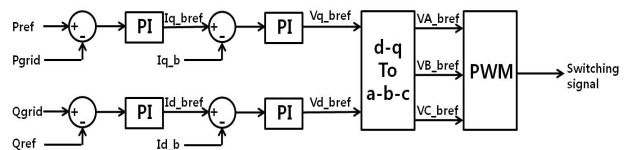


〈그림 1〉 전체적인 시스템 회로도

##### 2.2 전지전력저장 시스템

전지전력저장시스템은 전력을 저장할 수 있는 전지부, 충/방전 PWM 컨버터로 구성되어 있다.

##### 2.2.1 유·무효 전력보상을 위한 PI 제어기

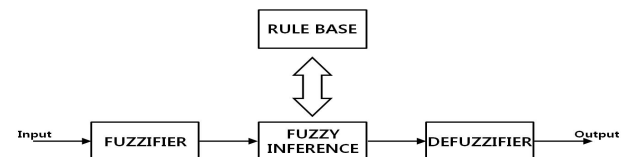


〈그림 2〉 에너지저장장치의 충/방전 PI제어 개념도

발전계획에 따라 계통으로 보내어야 할 유효전력 기준값  $P_{ref}$ 와 실제 계통으로 보내어지는 유효전력 출력  $P_{grid}$ 의 차이로 PI제어를 이용하여 q축 전류의 기준값  $I_{q\_bref}$ 를 구하고 이를 에너지저장장치에 실제 흐르는 q축 전류  $I_{q\_b}$ 와 비교하여 다시 PI제어를 이용하여 배터리의 q축 기준출력전압  $V_{q\_bref}$ 를 정하고, 마찬가지로 계통으로 보내어야 할 무효전력 기준값  $Q_{ref}$ 와 실제 계통으로 보내어지는 무효전력 출력  $Q_{grid}$ 의 차이로 PI제어를 이용하여 d축 전류  $I_{d\_bref}$ 를 구하고 이를 에너지저장장치에 실제 흐르는 d축 전류  $I_{d\_b}$ 와 비교하여 다시 PI제어를 이용하여 에너지저장장치의 d축 기준출력전압  $V_{d\_bref}$ 를 정한다. 이렇게 결정된 q축과 d축의 기준값  $V_{q\_bref}$ 와  $V_{d\_bref}$ 을 dq-abc변환을 통해  $V_{A\_bref}$ ,  $V_{B\_bref}$ 와  $V_{C\_bref}$ 로 변환된 값은 임의의 스위칭 주파수를 갖는 삼각파형과 비교하여 인버터의 각 IGBT에 스위칭 신호를 전달하게 된다.

##### 2.2.1 유·무효 전력보상을 위한 Fuzzy PI 제어기

일반적인 퍼지제어기는 퍼지화(fuzzification), 퍼지추론(fuzzy reasoning), 비퍼지화(defuzzification)과정으로 구성되어 있고, 구조는 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 일반적인 퍼지제어기의 구성도

퍼지제어기 설계 과정은 다음 다섯 단계를 따른다.

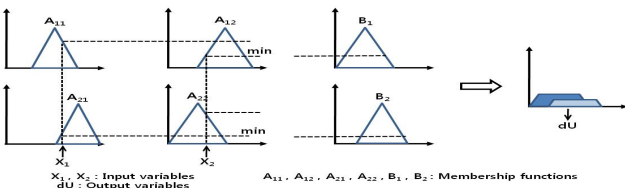
- 1) 제어변수 선택 : 입·출력 제어 변수는 요구하는 출력과 제어시스템의 특성에 의해 선택되어진다. 본 논문은 유효전력 보상제어에서는 계통에 투입되어야 할 유효전력과 실제 투입되는 유효전력의 오차( $E_1$ )와 그 오차의 변화량( $CE_1$ )을 제어기의 입력으로 하였고, 무효전력 보상제어에서는 계통에 투입되어야 할 무효전력과 실제 투입되는 무효전력의 오차와 그 오차의 변화량을 제어기의 입력으로 하였다.
- 2) 소속함수 정의 : 퍼지제어기의 퍼지언어 변수는 기본적으로 이용되는 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Medium), NB(Negative Big)로 정하였다.
- 3) 제어규칙 구축 : 표 4. 1은 퍼지제어기의 제어규칙을 나타내는데, 행렬의 각각의 요소들은  $E_1$ ,  $CE_1$  와 기준전류 변화량  $dU_1$  를 나타낸다.

〈표 1〉 퍼지 규칙 표

$E_1$ / $CE_1$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

"IF  $E_1$  is PB AND  $CE_1$  is ZO The  $dU$  is PB." 즉, 계통으로 들어가는 전력이 기준값과 오차가 매우 크고, 계통으로 투입전력의 오차변화량이 Zero일 경우에는 제어출력값인 기준출력전류의 값을 매우 크게 증가시켜야 한다는 의미이다.

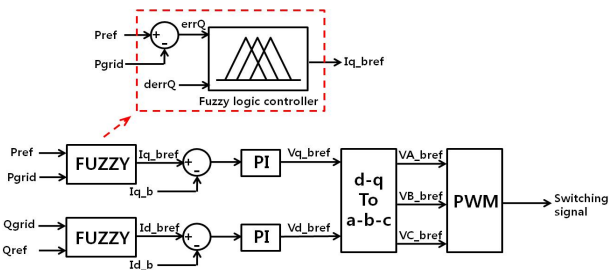
4) 퍼지추론 : 퍼지추론이란 퍼지규칙을 이용하여 출력을 계산하는 과정이다. 본 논문에서는 퍼지추론 방법으로 널리 이용되고 있는 Mamdani 방법인 min-max 방법을 사용하였다. 그림 4는 적용한 퍼지추론 방법의 개념도이다.



〈그림 4〉 Min - max 방법

5) 비퍼지화 : 퍼지추론에 의해 결정된 퍼지값을 실제 사용할 수 있는 값으로 바꾸어 주는 과정을 말한다. 본 논문에서는 무게중심법을 사용하고, 이산적인 계산을 수행하기 위해서는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$dU = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(dU_j) \cdot dU_j}{\sum_{j=1}^n \mu(dU_j)} \quad (1)$$



〈그림 5〉 에너지저장장치의 총/방전 Fuzzy PI제어 개념도

발전계획에 따라 계통으로 보내어야 할 유효전력 기준값  $P_{ref}$  와 실제 계통으로 보내어지는 유효전력 출력  $P_{grid}$  의 차이로 Fuzzy제어를 이용하여 q축 전류의 기준값  $I_{q\_bref}$  를 구하고 이를 에너지저장장치에 실제 흐르는 q축 전류  $I_{q\_b}$  와 비교하여 다시 PI제어를 이용하여 배터리의 q축

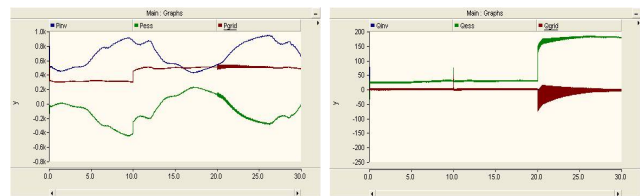
기준출력전압  $V_{q\_bref}$  를 정하고, 마찬가지로 계통으로 보내어야 할 무효전력 기준값  $Q_{ref}$  와 실제 계통으로 보내어지는 무효전력 출력  $Q_{grid}$  의 차이로 Fuzzy제어를 이용하여 d축 전류  $I_{d\_bref}$  를 구하고 이를 에너지저장장치에 실제 흐르는 d축 전류  $I_{d\_b}$  와 비교하여 다시 PI제어를 이용하여 에너지저장장치의 d축 기준출력전압  $V_{d\_bref}$  를 정한다. 이렇게 결정된 q축과 d축의 기준값  $V_{q\_bref}$  와  $V_{d\_bref}$  을 dq-abc변환을 통해  $V_{A\_bref}$ ,  $V_{B\_bref}$  와  $V_{C\_bref}$  로 변환된 값은 임의의 스위칭 주파수를 갖는 삼각파형과 비교하여 인버터의 각 IGBT에 스위칭 신호를 전달하게 된다.

### 2.3 성능모의

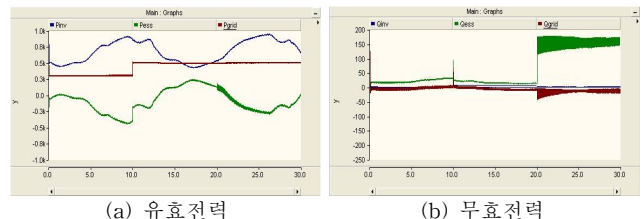
본 연구에서 계통연계형 풍력발전시스템 모델은 정격출력 1MW, 출력전압 1195V로서 연계변압기를 통해 22.9kV의 배전선로에 연계되고, 에너지저장장치를 이용하여 유·무효전력을 보상한다.

〈표 2〉 모의상황

시 간	0 ~ 10초	10 ~ 20초	20초 이후
유효전력부하	150kW		
무효전력부하	150kVAR		
계통요구전력량	300kW	500kW	



(a) 유효전력 (b) 무효전력  
〈그림 6〉 총/방전 PI제어기 이용한 무효전력 시뮬레이션 결과



(a) 유효전력 (b) 무효전력  
〈그림 7〉 총/방전 Fuzzy PI제어기 이용한 무효전력 시뮬레이션 결과

## 3. 결 론

본 연구에서 제안하는 유·무효전력보상장치의 제어기의 성능 시험은 PSCAD/EMTDC 소프트웨어로 시뮬레이션 모델을 개발하여 확인하였다. 시뮬레이션을 통하여 그림 5.11에서 알 수 있듯이, 전력보상을 위한 Fuzzy PI 제어기가 PI 제어기보다 안정적이고, 좀 더 빠른 시간 안에 원하는 결과에 도달시켜주는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과에서 보는 것처럼 Fuzzy PI 제어기는 퍼지규칙과 퍼지함수의 동조가 필요한 면은 있으나 전력보상을 위한 우수한 성능을 보임을 알 수 있으며, 향후 최적화 알고리즘 등을 도입한다면 퍼지 규칙 및 함수의 동조는 보다 용이해 질 것으로 생각된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김슬기, "계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석", 전기학회논문지B, Vol. 52, No. 8, pp.413-419, 2005
- [2] 심명보, "농형유도 풍력발전기의 성능개선을 위한 에너지 저장장치의 동작특성 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 58, No. 6, pp.1138-1145, 2009
- [3] 김용상, "PSCAD/EMTDC를 이용한 배전계통연계 전지전력저장시스템의 모델링", 대한전기학회 논문지, Vol. 47, No. 2, pp.155-161, 1998

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20104010100670)