



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

Fuzzy P+I 제어를 사용한  
풍력/디젤 하이브리드 시스템  
전력품질 제어

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

梁 守 亨

2012 年 6 月

# Fuzzy P+I 제어를 사용한 풍력/디젤 하이브리드 시스템 전력품질 제어

指導教授 金 豪 贊

梁 守 亨

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012 年 6 月

梁守亨의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2012 年 6 月

# Power Quality Control of Wind/Diesel Hybrid System using Fuzzy P+I Controller

Su-Hyung Yang  
(Supervised by professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING

Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2012. 6.

# 목 차

그림 목차 .....	iii
표 목차 .....	iv
SUMMARY .....	v
1. 서 론 .....	1
2. 풍력/디젤 하이브리드 시스템 모델링 .....	3
2.1 시스템 구성 .....	3
2.2 풍력발전기 .....	4
2.3 디젤발전기 .....	5
2.4 덤프로드 .....	6
2.5 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템의 전기적과 기계적 모델 .....	7
2.5.1 농형 유도발전기 .....	7
2.5.2 Drive train .....	8
2.5.3 돌극형 동기발전기 .....	8
2.5.4 전류 균형 .....	10
3. 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템 제어기 설계 .....	11
3.1 Fuzzy 제어기 .....	11
3.2 Fuzzy 제어기 설계 .....	12
3.3 Fuzzy P+I 제어기 설계 .....	16
4. 시뮬레이션 및 결과 분석 .....	18
4.1 시뮬레이션 .....	18
4.2 시뮬레이션 고찰 .....	20

4.2.1 Case-I 풍력/디젤 .....	21
4.2.2 Case-II 풍력/디젤/덤프로드 .....	24
5. 결론 .....	27
참 고 문 헌 .....	28

## 그림 목 차

그림 1. 풍력/디젤 하이브리드 발전 시스템의 구성 .....	3
그림 2. 계통과 연결된 유도발전기의 종류 .....	4
그림 3. 풍력발전기의 출력계수 .....	5
그림 4. 2진 크기 저항의 3상 덤프로드 구조 .....	6
그림 5. 트랜지스터 스위칭 신호 .....	7
그림 6. 풍력-디젤 제어 시스템 .....	11
그림 7. 일반적인 퍼지 제어기 구성 .....	12
그림 8. Fuzzy P+I 제어기 입력 E의 소속 함수 .....	13
그림 9. Fuzzy P+I 제어기 입력 $\Delta E$ 의 소속 함수 .....	13
그림 10. Fuzzy 제어규칙을 적용한 3차원 그래프 .....	15
그림 11. Fuzzy P+I 제어기에서 P의 이득을 결정하는 멤버십함수 .....	15
그림 12. Fuzzy PI 제어기의 구조 .....	16
그림 13. Fuzzy P+I 제어기의 구조 .....	16
그림 14. 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템 전체 구성 .....	18
그림 15. 시뮬레이션을 통한 Fuzzy PI 제어기 구조 .....	19
그림 16. 시뮬레이션을 통한 Fuzzy P+I 제어기 구조 .....	19
그림 17. 평균풍속 7[m/s]의 풍속데이터 .....	20
그림 18. Case-I의 경우 부하와 유도발전기의 출력 .....	21
그림 19. Case-I의 경우 동기발전기의 출력 .....	22
그림 20. Case-I의 경우 버스 전압 .....	23
그림 21. Case-I의 경우 버스 주파수 .....	23
그림 22. Case-II의 경우 부하와 유도발전기의 출력 .....	24
그림 23. Case-II의 경우 동기발전기와 덤프로드의 출력 .....	25
그림 24. Case-II의 경우 버스 전압 .....	26
그림 25. Case-II의 경우 버스 주파수 .....	26

## 표 목 차

표 1 P의 이득을 위한 멤버십함수 .....	14
표 2 Fuzzy제어 시스템의 언어변수 .....	14
표 3 시스템 파라미터 .....	20

## SUMMARY

This paper proposes a modeling and controller design approach for a wind-diesel hybrid system that includes a wind turbine and dump load. Wind turbine depends on nature such as wind speed. It causes power fluctuations of wind turbine. Excessive power fluctuation at stand-alone power grid is even worse power qualities than large-scale power grid.

The proposed control scheme for power quality at wind/diesel hybrid power system is Fuzzy P+I controller. This controller has advantages of PI and Fuzzy controller. Fuzzy P+I controller shows good performance both Linear and nonlinear systems.

The proposed model is carried out by using Matlab/Simulink simulation program. In the simulation study, the proposed controller is compared with a conventional PI controller. Simulation results show that the proposed controller is more effective against disturbances caused by wind speed and load variation than the PI controller, and thus it contributes to a better quality wind-diesel hybrid power system.

# 1. 서 론

계통연계가 힘든 외지나 도서지역에서는 중앙계통으로부터 전력을 공급을 받기 힘들기 때문에 독립적인 발전을 한다. 국내에서는 2007년 기준으로 평균전력 200kW 이상인 곳만 백령도를 포함하여 16개이며, 디젤발전기를 사용하여 자가발전하고 있다[1]. 디젤발전기는 상대적으로 낮은 초기설치비, 안정성, 운영의 간단함을 장점으로 자가 발전 및 비상용 발전기로 널리 사용되고 있다. 하지만 디젤발전기는 증가하는 국제 유가에 비례하여 연료비 상승 및 연료 수송비가 추가된다. 또한, 세계적으로 대두되고 있는 화석 연료의 고갈 및 탄소 배출 감축을 고려해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 신·재생에너지와 디젤발전기의 하이브리드 시스템을 구축한다. 하이브리드 발전시스템은 신·재생에너지가 발전을 하면 디젤발전기는 독립된 계통에서 부족한 전력을 보충하여 준다[2][3].

신·재생에너지는 친환경적이고 태양에너지, 바람에너지 등 다양한 형태로 이용이 가능하여 지역별 특성을 고려하며 최적의 발전기를 설치 할 수 있다. 풍력발전기는 바람에너지를 약 20 ~ 40%를 전기에너지로 변환 할 수 있어 다양한 신·재생에너지 원들 중에 효율이 높아 독립계통에서 하이브리드 시스템에 많이 사용되고 있다. 하지만 풍력발전기와 디젤발전기의 하이브리드 시스템은 풍속 변화에 따라 풍력발전기의 출력 변동이 크기 때문에 독립된 계통에서 주파수와 전압의 큰 변동을 가져온다. 이러한 변동은 대규모 계통에서는 상대적으로 적은 영향을 받지만 독립된 계통이나 마이크로 전력계통에서는 전력품질 저하의 원인이 된다. 전력품질 저하는 부하에 직접적인 영향을 미치므로 주파수와 전압을 일정 범위로 유지하는 것이 중요하다[4][5].

기존의 PI제어기는 알고리즘이 간단하고 선형시스템에서 우수한 성능을 보이지만, 비선형시스템에서는 선형시스템에 비해 성능이 떨어진다. Fuzzy제어기는 비선형시스템에서 논리적 제어 방식으로 쉽게 제어를 할 수 있고, 정교한 기법으로 설계 및 구현하기 쉽다. 그러므로 본 논문에서 사용하는 제어기는 두 제어기의 장점만을 가진 Fuzzy PI로서 비선형과 선형시스템 모두 우수한 성능을 보이며, 계산이 적어짐에 따라 기존 Fuzzy제어기의 동조 시간을 줄일 수 있다. 지난 10년간 많은 연구자들은 제어기의 성능을 향상시키기 위해 다양한 종류의 Fuzzy PI 하이브리드 제어기가 국내·외에서 연구가 활발히 진행되고 있다[6-10].

본 논문에서는 전력품질을 제어하기 위해 Fuzzy P+I제어기를 제안한다. 다양한 Fuzzy PI제어기들 중에서 Fuzzy제어기를 사용하여 P의 값을 선택하는 것과 기존의 PI제어기의 P의 값을 가감하는 것을 전통적인 PI제어기와 응답특성을 비교해본다. D제어기는 외란에 영향을 많이 받기 때문에 고려하지 않았다. 이러한 제어기의 성능 분석을 풍력/디젤 하이브리드 발전 시스템에 적용한 시뮬레이션은 Matlab/Simulink 시뮬레이션 프로그램을 통해 고찰해본다.

## 2. 풍력/디젤 하이브리드 시스템 모델링

### 2.1 시스템 구성

본 논문에서 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템의 구성은 그림 1과 같다[11].

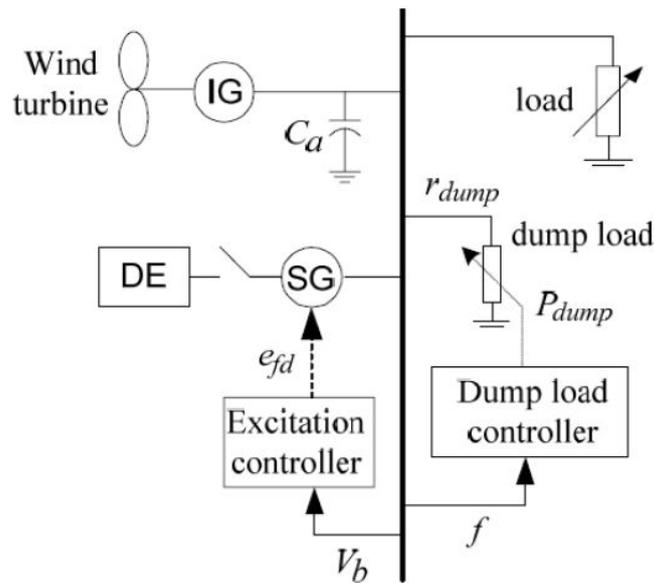


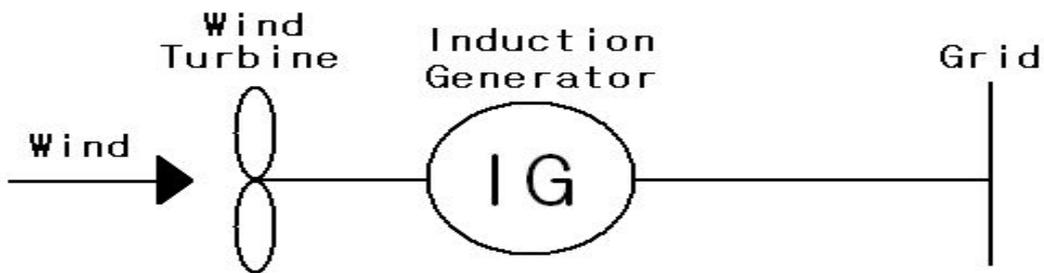
그림 1. 풍력/디젤 하이브리드 발전 시스템의 구성

풍력/디젤 하이브리드 발전시스템은 유도발전기(induction generator, IG)를 사용한 풍력터빈(wind turbine), 디젤 엔진(diesel engine, DE)과 동기발전기(synchronous generator, SG), 덤프로드(dump load), 부하(load)로 이루어져 있다. 디젤엔진은 전자기클러치(electromagnetic clutch)에 의해 동기발전기로부터 분리된다. 3상 덤프로드는 각상에 7개의 TCR(transistor-controlled resistor) बैं크로 구성된 것을 사용한다. 그림 1에서  $e_{fd}$ 는 여자전압,  $f$ 는 주파수,  $V_b$ 는 버스전압,  $C_a$ 는 커패시터뱅크,  $P_{dump}$ 는 요구된 덤프로드 전력이고  $r_{dump}$ 는 덤프로드 저항을 나타낸다 [12].

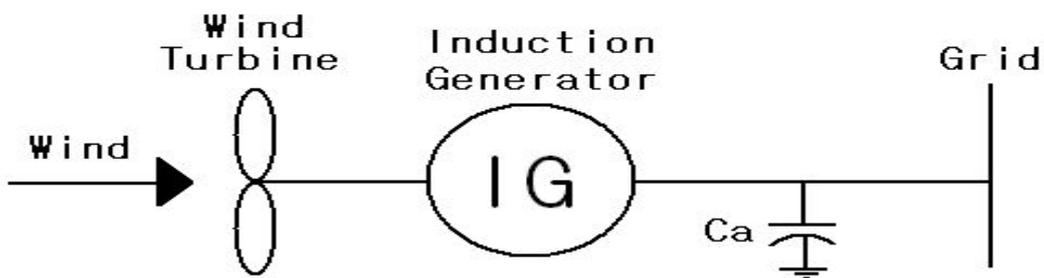
## 2.2 풍력발전기

풍력발전기로 많이 사용되고 있는 농형유도발전기는 구조가 간단하고 계통연계시 별도의 전력변환기를 필요로 하지 않아 시스템의 규모가 작고 가격이 싼 장점을 갖는다. 유지보수가 쉽지 않은 도서지역에서 견고한 농형유도발전기는 경제적인 측면에서 우수하다. 하지만 풍속이 변동함에 따라 회전자계를 공급하는데 필요한 여자전류를 충당하기 위해 연계된 전력계통으로부터 변동하는 무효전력은 전압안정도를 저하 시키는 원인이 된다[13][14].

그림 2의 (a)는 계통에 직접 연결되어 있기 때문에 풍력발전기의 유·무효전력이 전체 계통 안정에 악영향을 준다. 그림 2의 (b)는 전력용 커패시터를 추가적으로 연결하여 소모하는 무효전력을 보상해주며 계통의 안정된 전력을 유지한다.



(a) 계통에 직접 연결된 유도발전기



(b) 커패시터와 연결된 유도발전기

그림 2. 계통과 연결된 유도발전기의 종류

풍속  $v(t)[m/s]$ 으로부터 얻는 풍력발전기의 출력은 식(1)과 같다.

$$P_m(t) = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times (v(t))^3 \times C_p \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기밀도( $=1.225[kg/m^3]$ ),  $A$ 는 로터의 회전단면적 $[m^2]$ ,  $C_p$ 는 풍력발전기의 출력계수이다. 본 논문에서 사용한 출력계수(coefficient power,  $C_p$ )는 다음 그림 3과 같다.

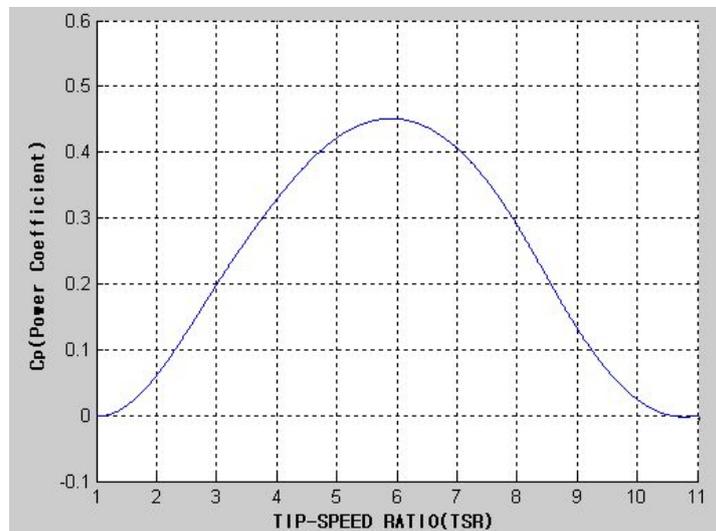


그림 3. 풍력발전기의 출력계수

## 2.3 디젤발전기

여러 장점을 가진 디젤발전기는 비상용과 자가발전용으로 널리 사용되고 있다. 일반적으로 디젤엔진을 이용한 발전기 시스템은 엔진에 발전기를 연결하고 엔진을 구동하게 되면 엔진의 힘에 의하여 발전기가 회전하고 이 회전력에 의하여 발전기에 단자전압이 발생한다. 이 단자전압을 AVR(automatic voltage regulator)을 이용하여 계자 전류 양을 조절하고 단자전압의 크기를 제어하게 된다. 그리고 부하가 증가하게 되면 엔진의 조속기(governor)를 이용하여 디젤 엔진의 주입연료량을 조절하여 엔진이 일정한 속도를 유지할 수 있도록 한다[15].

## 2.4 덤프로드

덤프로드는 독립된 계통에서 신재생에너지와 하이브리드 발전을 할 경우 필수적으로 설치되어야 한다. 신·재생에너지의 발전량이 요구된 부하보다 많은 전력을 생산할 경우 잉여 전력이 계통내의 전압이나 주파수에 변동을 가져와 전력품질에 악영향을 미친다. 덤프로드는 잉여 전력에 대한 제어 입력을 받고 전력을 소모한다. 본 논문에서 고려한 3상 덤프로드 모델은 그림 4와 같다.

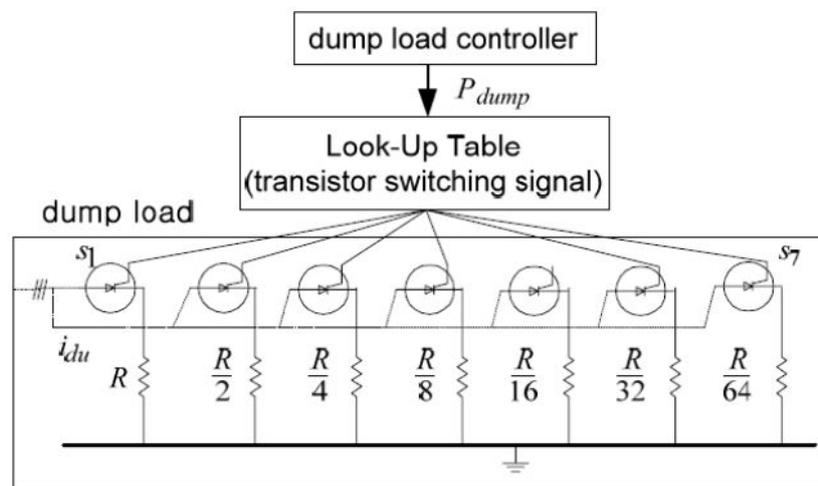


그림 4. 2진 크기 저항의 3상 덤프로드 구조

각 상은 2진 크기의 저항 7개의 TCR 뱅크로 구성되어 있다. 그림 5는 요구된 전력을 만족하기 위해 어떻게 스위칭 되는지 보여준다. 정격 AC 230[V]의 선 전압과 각 상의 저항  $R$ 은 120[ $\Omega$ ]을 기준을 잡고, 만약 덤프로드 제어기로부터 요구된 덤프로드 전력이 880W라면 Look-up Table을 통해 step-2에 해당하는 스위치 S2만이 ON된다[11].

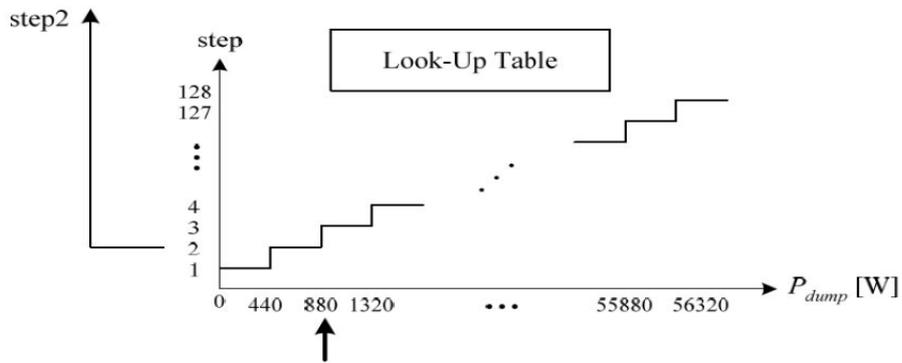
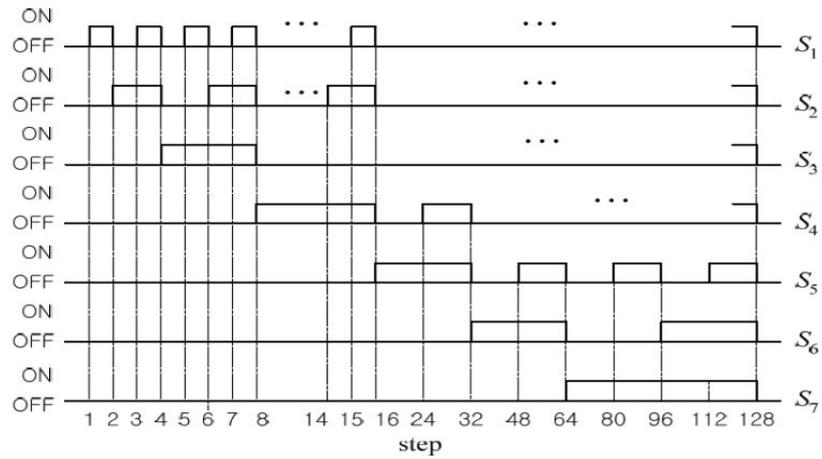


그림 5. 트랜지스터 스위칭 신호

## 2.5 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템의 전기적과 기계적 모델

동기발전기와 유도발전기의 모델링은 [16-18]을 바탕으로 하였다.

### 2.5.1 농형 유도발전기

독립형 발전시스템에서 많이 사용되고 있는 농형 유도발전기의 모델은 다음의 식과 같다.

$$\dot{\psi}_{rq} = \frac{1}{\tau_{do}}(-\psi_{rq} + L_m I_{aq}) + w_b(w_s - w_a)\psi_{rd} \quad (2)$$

$$\dot{\psi}_{rd} = \frac{1}{\tau_{do}}(-\psi_{rd} + L_m I_{ad}) - w_b(w_s - w_a)\psi_{rq} \quad (3)$$

여기서,

- $C_a, w_a$  : 풍력발전기의 커패시터 뱅크 및 각속도
- $\psi_{rq}, \psi_{rd}$  : 동기발전기의 회전자 자속쇄교
- $I_{aq}, I_{ad}, V_{aq}, V_{ad}$  : 유도발전기의 고정자 종단 전류 및 전압
- $R_a, L'_s, L_r$  : 동기발전기의 회전자 저항 및 인덕턴스
- $R_2, L_2$  : 유도발전기와 버스 사이 저항 및 리액턴스
- $\tau'_{do}$  : 순간 개로 시정수
- $L_m$  : 동기발전기의 상호인덕턴스

### 2.5.2 Drive train

유도발전기와 풍력발전기의 로터 사이의 샤프트의 각속도는 다음의 식과 같다.

$$\dot{\theta}_c = w_t - w_a \quad (4)$$

$$\dot{w}_t = \frac{1}{J_t} \left( \frac{P_w}{w_t} - C_c \theta_c - (D_t + D_c) w_t + D_c w_a \right) \quad (5)$$

$$\dot{w}_a = \frac{1}{J_a} (C_c \theta_c - D_c w_t - (D_a + D_c) w_a - T_a) \quad (6)$$

여기서,

- $w_t$  : 버스 주파수(혹은 유도발전기의 각속도)
- $T_a$  : 유도발전기의 공극 토크

### 2.5.3 돌극형 동기발전기

디젤 엔진과 연결된 동기발전기는 일일기동 및 일일정지가 특별한 제약 없이 운전이 가능하여 침두 부하용으로 많이 사용되고 있다. 저속기에 적합한 돌극형 동기발전기를 모델링 하였고 다음의 식과 같다.

$$\dot{Q}_f = \frac{1}{\tau_d} (-Q_f + Q_d(t - \tau_d)) \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_d = w_d - w_s \quad (8)$$

$$\dot{w}_d = \frac{1}{J_d}(k_c k_v Q_f - (D_d + D_{cl})w_d + D_{cl}w_s - k_v p_o - C_d \theta_d) \quad (9)$$

$$\dot{\psi}_f = \frac{1}{\tau'_{do}}(-\psi_f + L_{md}I_{sd}) + E_{fd} \quad (10)$$

$$\dot{w}_s = \frac{1}{J_s}(C_d \theta_d + D_{cl}w_d - T_s - (D_{cl} + D_s)w_s) \quad (11)$$

여기서,  $T_s = -\frac{L_{md}}{L_f}\psi_f I_{sq} - (L'_d - L_q)I_{sq}I_{sd}$

$w_s$  : 버스주파수

$E_{fd}, \psi_f$  : 동기발전기의 계자전압 및 계자 자속 쇄교

$V_{sq}, V_{sd}$  : 동기발전기의 고정자 단자전압

$R_1, L_1$  : 동기발전기와 버스 사이의 저항과 리액턴스

$R_s$  : 동기발전기 고정자 저항

$L_q, L_d, L_f$  : 동기발전기의 q, d축과 계자 인덕턴스

$I_{sq}, I_{sd}$  : 버스로 들어가는 동기발전기 전류요소

$L_{md}, L'_d$  : d축 계자 상호 인덕턴스 및 순간 인덕턴스

$J_s, D_s$  : 동기발전기의 관성 및 마찰 감쇠

$T_s$  : 동기발전기의 공극 토크

$\tau'_{do}$  : 순간 개로 시정수

$Q_f$  : 연소실로 들어가는 연료 공급량

$Q_d$  : 조속기 체임버 밸브에서 연료 공급량

$p_o$  : Idle 상태에서 zero 토크압력

$\tau_d$  : 연소의 시간지연

$k_v$  : 엔진의 행정 값

$k_c$  : 연소의 효율 상수

$\theta_d$  : 엔진과 발전기 축 사이의 뒤틀림 각

## 2.5.4 전류 균형

dq변환된 유도발전기 및 동기발전기 전류요소에서 부하와 덤프로드의 전류 요소와의 차를 통해 전체 독립된 계통에서 안정적인 전류 균형을 이룰 수 있게 해주며 다음의 식과 같다.

$$i_{sq} + i_{iq} - i_{lq} - i_{duq} = 0 \quad (12)$$

$$i_{sd} + i_{id} - i_{ld} - i_{dud} = 0 \quad (13)$$

$$i_{iq} = i_{aq} + w_s C_a V_{ad} \quad (14)$$

$$i_{id} = i_{ad} - w_s C_a V_{aq}, \quad i_{duq} = V_{bq}/r_{dump}, \quad i_{dud} = V_{bd}/r_{dump} \quad (15)$$

$$i_{lq} = \frac{r_3}{r_3^2 + x_3^2} V_{bq} + \frac{x_3}{r_3^2 + x_3^2} V_{bd}, \quad i_{ld} = -\frac{x_3}{r_3^2 + x_3^2} V_{bq} + \frac{r_3}{r_3^2 + x_3^2} V_{bd} \quad (16)$$

여기서,

$i_{sq}, i_{sd}, i_{iq}, i_{id}$  : 부하와 덤프로드 전류요소

$w_s$  : 버스주파수

$C_a, r_{dump}$  : 커패시터와 덤프로드의 저항

$i_{lq}, i_{ld}, i_{duq}, i_{dud}$  : 버스로 유입하는 동기발전기와 유도발전기의 전류요소

$r_3, x_3$  : 부하 저항과 리액턴스

### 3. 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템 제어기 설계

풍력/디젤 발전 시스템의 제어관점에서 입력과 출력의 관계를 그림 6으로 나타내었다[11].

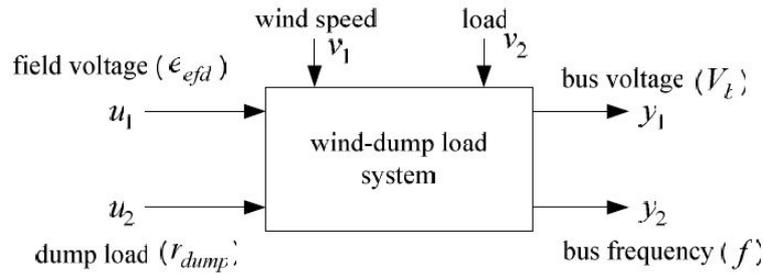


그림 6. 풍력-디젤 제어 시스템

제어 입력으로는 동기발전기(SG)의 계자전압( $u_1$ )과 덤프로드의 저항( $u_2$ )이다. 출력으로는 AC 버스 전압( $y_1$ )과 주파수( $y_2$ )이다. 풍속( $v_1$ )과 부하( $v_2$ )는 외란으로 고려된다. 풍력발전기와 덤프로드는 부하를 위해 평행으로 운영된다. 시스템을 제어 관점으로 봤을 경우, MIMO(multi-input-multi-output)의 비선형 시스템이다. 그러므로 각 입력은 하나 이상의 출력이 제어 되어야 하고, 각 출력은 하나 이상의 입력으로 제어되어야 한다.

#### 3.1 Fuzzy 제어기

퍼지제어는 전문가의 지식을 바탕으로 제어규칙을 언어적으로 쉽게 표현할 수 있으며, 외란에 대해 매우 강인한 특성을 가질 뿐만 아니라 제어대상을 수학적으로 정확히 근사화 할 수 없는 경우에 제어대상의 입력과 출력관계 만으로 탁월한 성능을 발휘한다. Fuzzy 제어기는 오차를 입력으로 이용하여 퍼지추론을 하며, 퍼지추론의 결과로 제어입력의 변화량을 출력으로 동작한다. 그림 7은 일반적인 규칙에 근거한 추론 과정의 제어 블록도를 나타낸다[19][20].

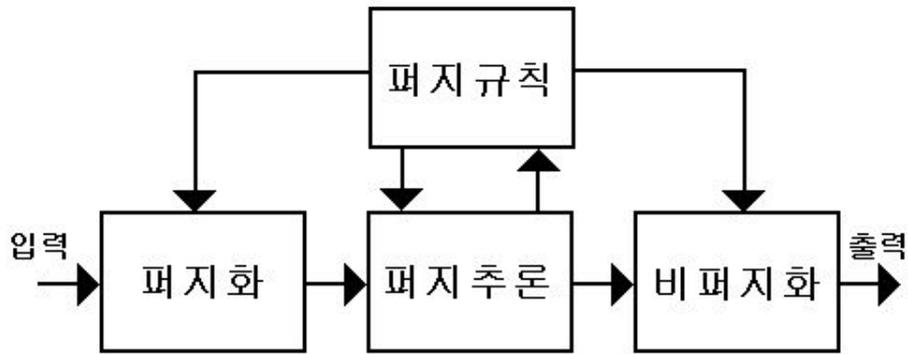


그림 7. 일반적인 퍼지제어기 구성

1) 퍼지화(fuzzification) : 퍼지화란 퍼지의 도입부에서 입력변수값을 적절한 퍼지값으로 바꾸는 연산으로 퍼지화 방법에는 퍼지 싱글톤과 이등변삼각형 등이 있다.

2) 퍼지추론(fuzzy reasoning) : 퍼지추론이란 퍼지규칙을 이용하여 출력을 계산하는 과정이다. 퍼지추론에는 여러 가지 방법이 있다. 직접법에는 Mamdani 방법, Larsen 방법, Mizumoto 방법 등이 있고, 간접법에는 Baldwin 방법, Tsugamoto 방법이 있으며, 혼합법에는 Sugeno 방법, Simplified 방법이 있다.

3) 비퍼지화(defuzzification) : 비퍼지화란 출력부 전체집합에서 정의된 퍼지제어 조작량을 명확한 비퍼지제어 조작량으로 변화시켜주는 작업을 말한다. 비퍼지화 방법으로는 최대값방법(max criterion method), 최대평균법(mean of maximum method), 그리고 무게중심법(center of area method) 등이 있다.

### 3.2 Fuzzy 제어기 설계

Fuzzy P+I 제어기 설계를 위해 퍼지화를 위해 출력오차 E와 출력오차의 변화량  $\Delta E$ 의 소속 함수는 그림 8와 9로 나타내었다. 본 논문에서는 PI와 Fuzzy 제어를 결합하여 Fuzzy P+I 제어를 구성하므로 간단한 소속 함수들을 사용하였다.

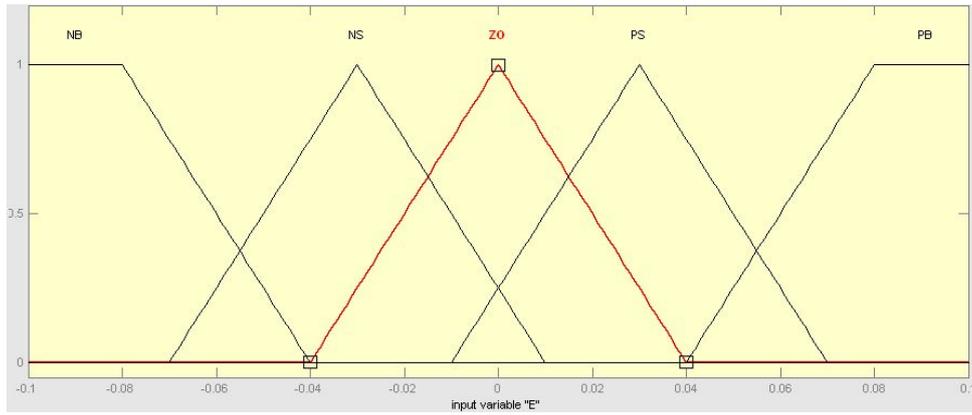


그림 8. Fuzzy P+I 제어기 입력 E의 소속 함수

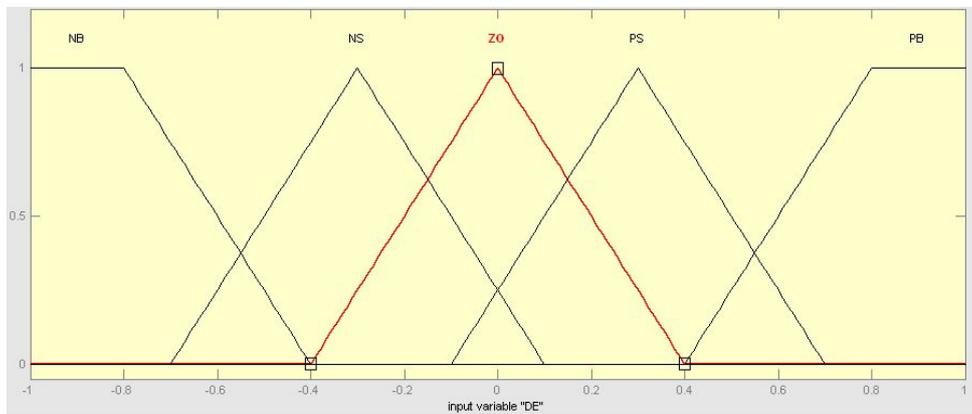


그림 9. Fuzzy P+I 제어기 입력  $\Delta E$ 의 소속 함수

입력 소속 함수에 의해 만들어진 규칙은 IF-THEN 방법을 사용하였고, 표 1과 같다.

표 1. P의 이득을 위한 멤버십함수

P gain		DE				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	NB	NB	NB	NS	ZO
	NS	NB	NB	NS	ZO	PS
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NS	ZO	PS	PB	PB
	PB	ZO	PS	PB	PB	PB

여기서 사용된 언어변수는 표 2과 같이 5가지를 사용하였다.

표 2. Fuzzy제어 시스템의 언어변수

약자	명칭
NB	Negative Big
NS	Negative Small
ZO	Zero
PS	Positive Small
PB	Positive Big

퍼지추론 방법으로는 Mamdani방법으로 PROD-PROBOR 방법을 사용하였고 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned}
 PROD: \quad \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \\
 PROBOR: \quad \mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

그림 10은 제어규칙을 3차원으로 나타낸 것이다.

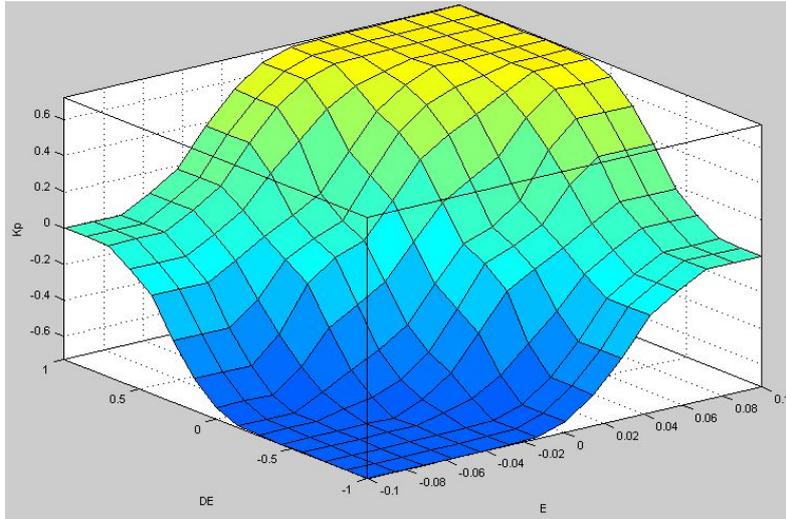


그림 10. 퍼지 제어규칙을 적용한 3차원 그래프

비퍼지화 방법으로 싱글톤 방법으로 무게 중심법을 사용하였고 식 (18)과 같다.

$$dU = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(dU_j) \cdot dU_j}{\sum_{j=1}^n \mu(dU_j)} \quad (18)$$

그림 11은 P의 이득을 얻기위한 비퍼지화된 출력의 소속함수를 나타낸다.

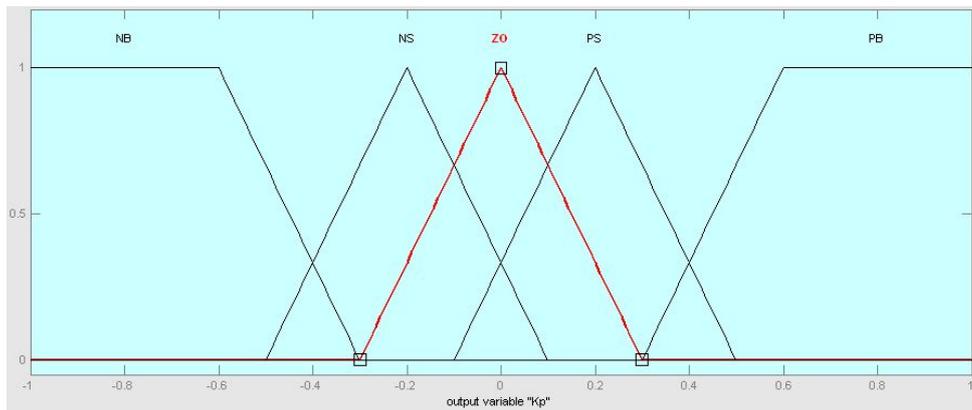


그림 11. Fuzzy P+I 제어기에서 P의 이득을 결정하는 멤버십함수

### 3.3 Fuzzy P+I 제어기 설계

본 논문에서는 2가지의 Fuzzy P+I 제어기의 응답 특성을 비교하기 위해 그림 12, 13와 같은 구조를 갖는 Fuzzy P+I 제어기를 설계하였다.

그림 12은 Fuzzy 제어기를 통해 변화되는 시스템에 따라  $K_p$ 의 값을 선정하여 I 제어기와 결합하여 하나의 PI 제어기로 동작하게 되는 구조를 가진다. 구조가 가장 단순해진다는 장점을 갖지만,  $K_p$ 의 값이 선형시스템에서도 변동하기 때문에 시스템이 불안정할 수 있다.

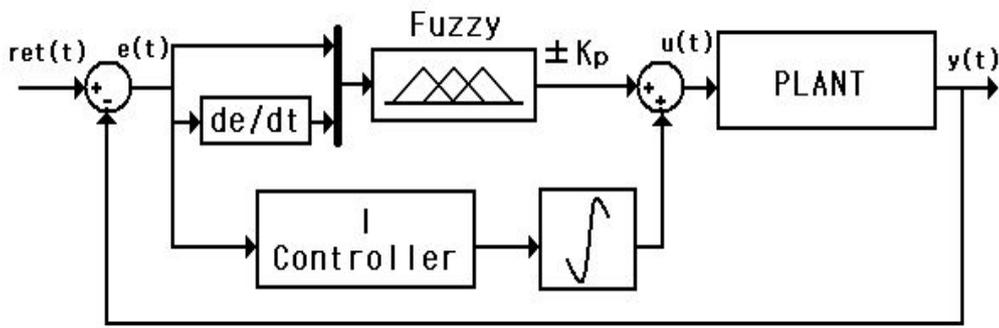


그림 12. Fuzzy PI 제어기의 구조

그림 13는 하이브리드 발전시스템에서 기본적으로 PI 제어기로 동작하다 풍속과 부하에 따라 급변하는 비선형적인 발전시스템에서는 Fuzzy 제어기가 빠르게 P값을 찾아 제어를 하며, 안정이 되면 다시 PI제어기로 동작하는 것이다. 이러한 동작으로 전통적인 PI제어기와 Fuzzy 제어기의 장점을 모두 가질 수 있다.

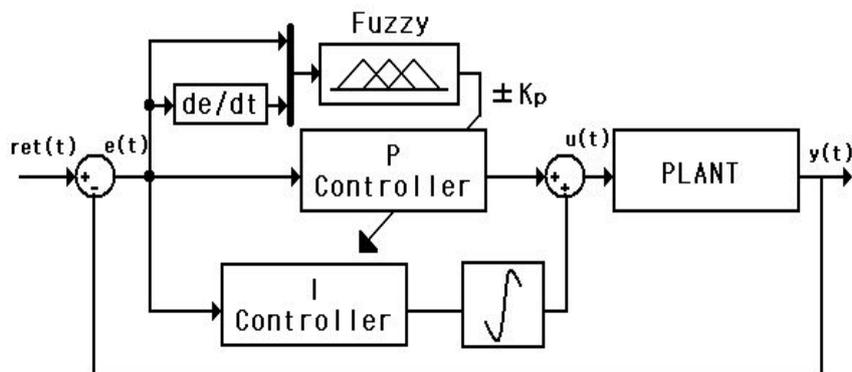


그림 13. Fuzzy P+I 제어기의 구조

Kp와 Ki의 값은 Fuzzy를 제외한 하이브리드 발전 시스템에서 찾은 최적 값을 이용하였다.

## 4. 시뮬레이션 및 결과 분석

### 4.1 시뮬레이션

모델링한 풍력/디젤 하이브리드 발전 시스템은 Matlab/Simulink 프로그램을 이용하여 구성을 하였다. 전체 구성도는 그림 14와 같다.

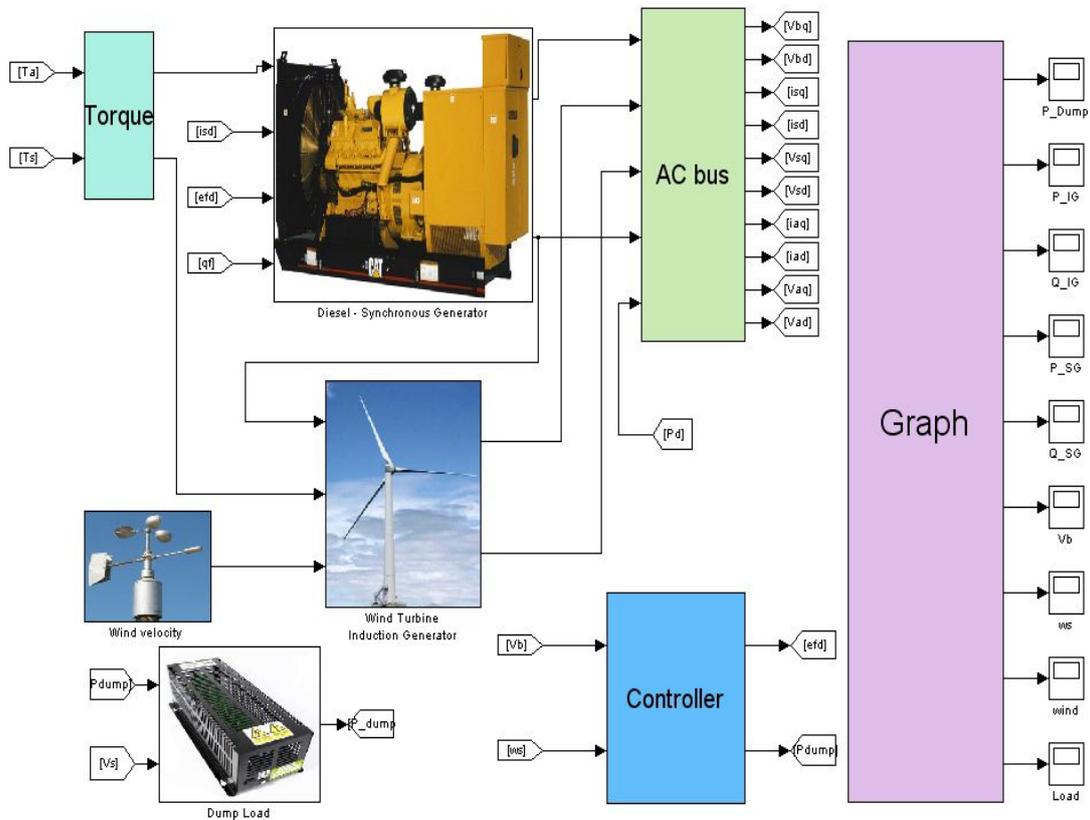


그림 14. 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템 전체 구성

디젤발전기, 풍력발전기, 덤프로드는 AC 버스로 연결이 되어 제어기에 의해 전압과 주파수를 일정범위로 조절이 된다. Matlab/Simulink 프로그램으로 모델링한 Fuzzy PI 제어기와 Fuzzy P+I 제어기는 각각 그림 15과 그림 16로 나타낸다.

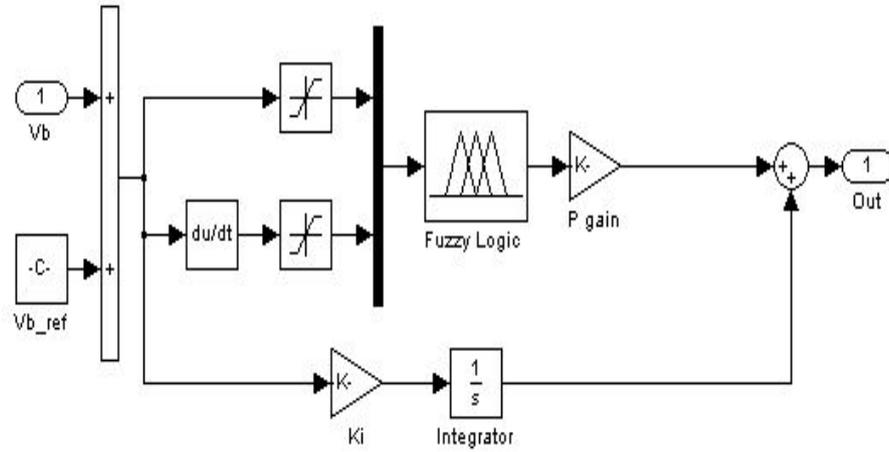


그림 15. 시뮬레이션을 통한 Fuzzy PI제어기 구조

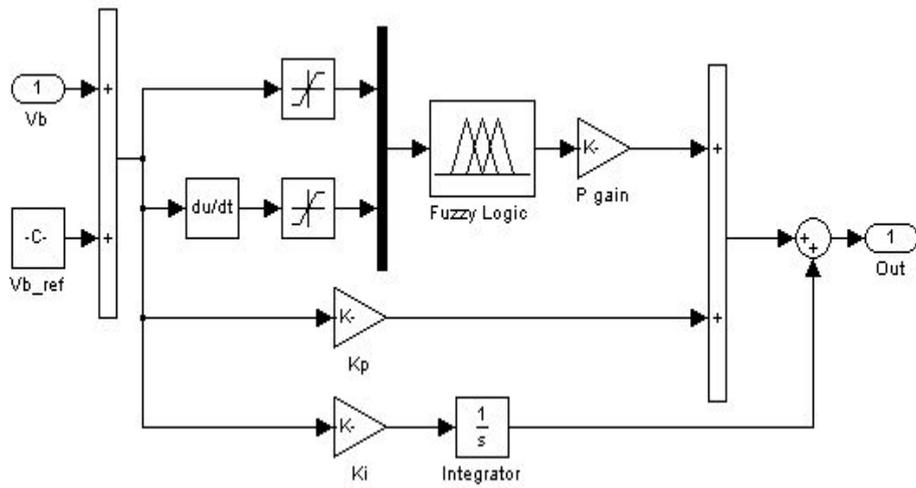


그림 16. 시뮬레이션을 통한 Fuzzy P+I제어기 구조

## 4.2 시뮬레이션 고찰

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 그림 17과 같은 평균풍속 7[m/s]의 풍속데이터를 사용하였다.

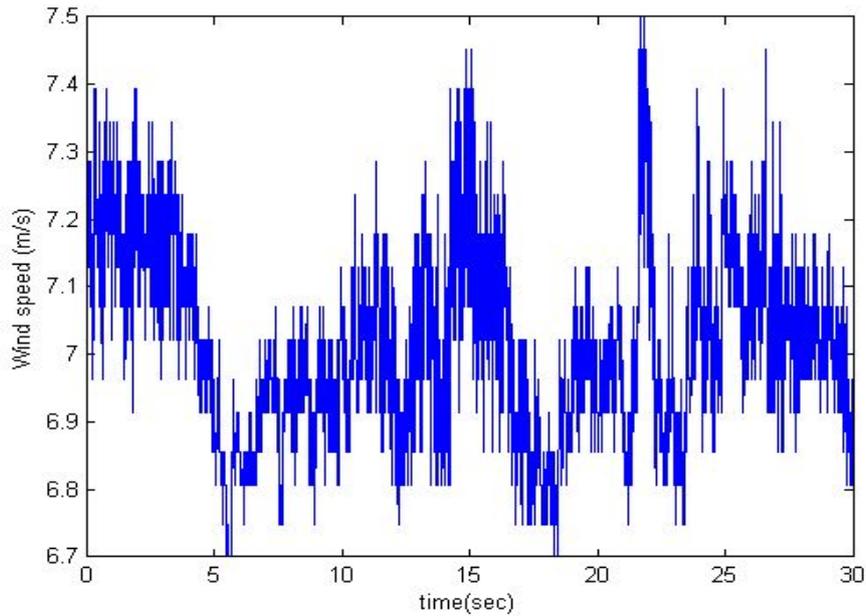


그림 17. 평균풍속 7[m/s]의 풍속데이터

표 3은 시뮬레이션을 위한 풍력/디젤 하이브리드 시스템의 파라미터들을 나타낸다.

표 3. 시스템 파라미터

종류	정격
풍력발전기(유도발전기)	55 [kW]
디젤발전기(동기발전기)	55 [kW]
덤프로드	55 [kW]
부하	40 [kW]
공칭 주파수	50 [Hz]
AC 전압	230 [V]

#### 4.2.1 Case-I 풍력/디젤

부하변동에 따른 계통내의 특성을 알아보기 위해 시뮬레이션 10초 후에 초기 부하 38[kW]에서 26[kW]로 변화를 주었다. 부하변동에 따른 전통적인 PI 제어기와 Fuzzy PI 및 Fuzzy P+I 제어기의 비교는 그림 18, 19, 20, 21로 보여준다. 그림 18은 부하와 유도발전기의 출력을 보여준다.

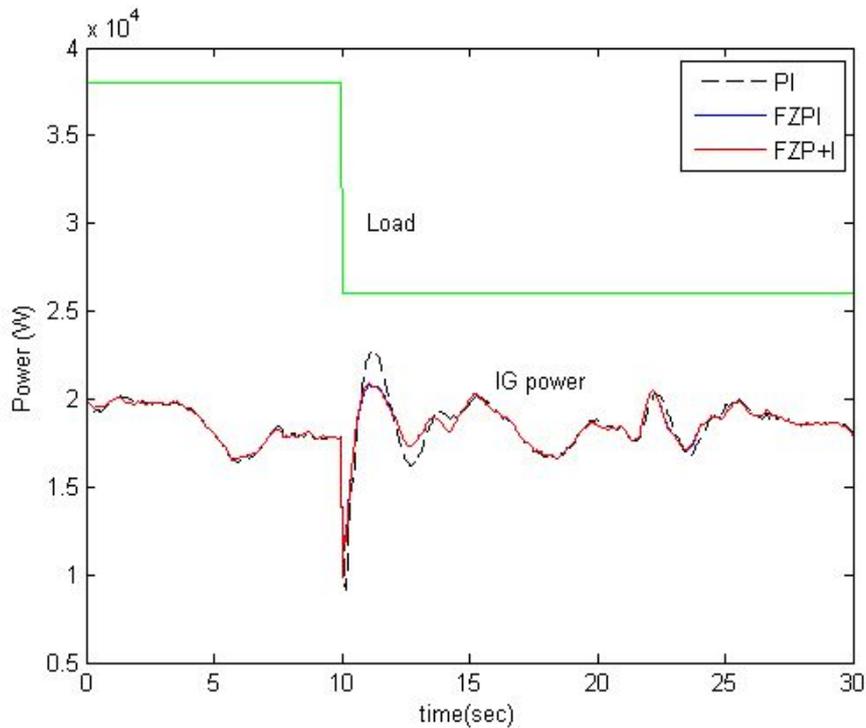


그림 18. Case-I의 경우 부하와 유도발전기의 출력

그림 19은 동기발전기의 출력을 보여준다. 부하의 갑작스런 변화에 따라 동기발전기는 빠르게 출력을 낮춰 독립 계통에 안정을 도모한다. 하지만 부하가 이보다 크게 감소한다면 디젤발전기의 출력은 0이 되더라도 풍력발전기로부터 발생된 전력은 부하보다 크기 때문에 초과된 전력은 그대로 독립계통에 들어가게 된다. 이러한 잉여전력은 계통에 악영향을 주기 때문에 이에 대한 대응책이 필요하다.

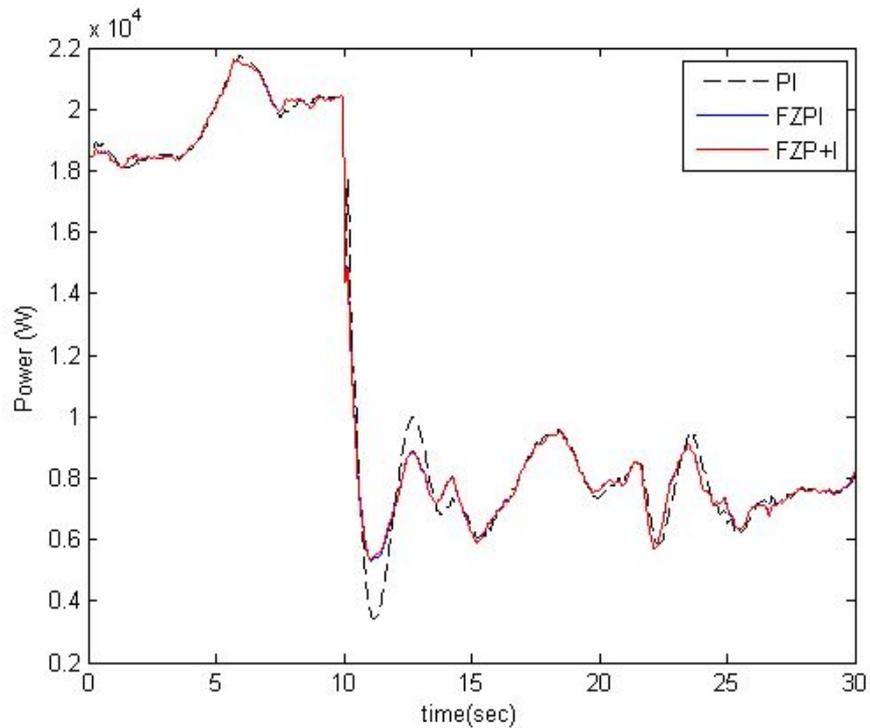


그림 19. Case-I의 경우 동기발전기의 출력

그림 20과 21은 전력품질에 중요한 요소인 버스 전압과 버스 주파수를 나타낸다. Fuzzy PI 제어기 버스전압에서는 PI 제어기보다 오버슈트가 감소하였지만, Fuzzy P+I 제어기보다 응답특성이 나쁜 것을 알 수 있다. 그 이유는 Fuzzy 제어기만으로 P의 값을 산정하는 경우에 급속한 부하 변동을 빨리 보상하기가 쉽지 않기 때문이다. 버스 주파수에서는 Fuzzy PI와 Fuzzy P+I 제어기가 같은 응답특성을 보이며, 전통적인 PI 제어기보다 우수한 것을 보여준다.

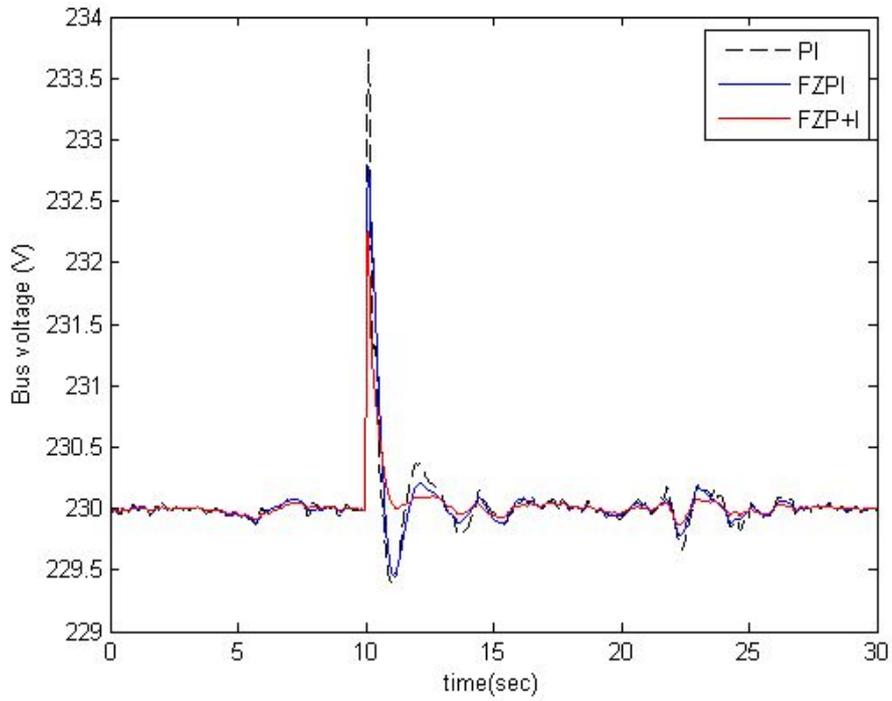


그림 20. Case-I의 경우 버스 전압

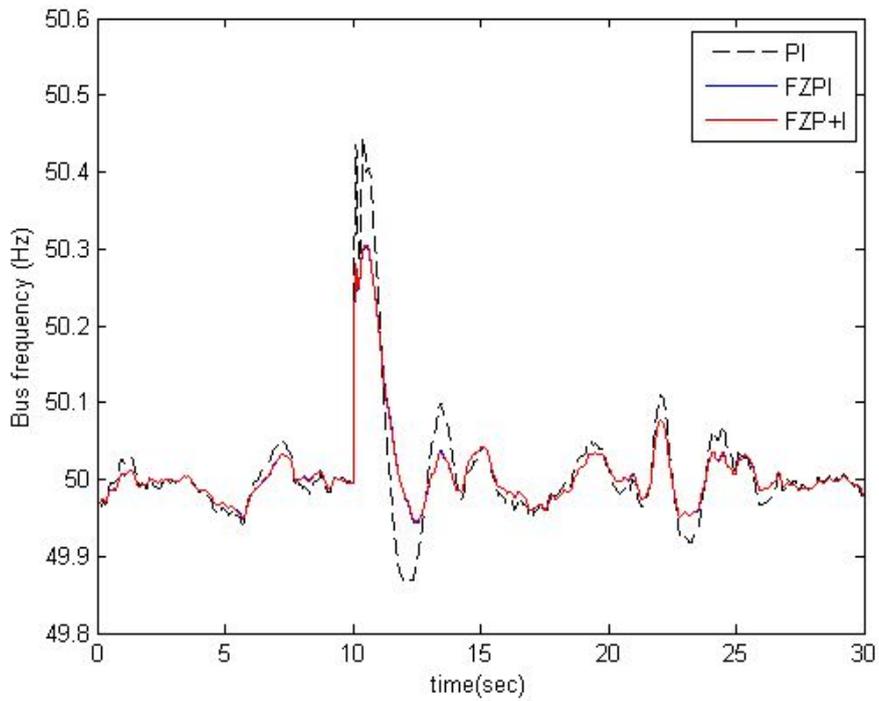


그림 21. Case-I의 경우 버스 주파수

#### 4.2.2 Case-II 풍력/디젤/덤프로드

Case-II는 Case-I에서 급작스런 부하변동에 따른 잉여전력을 소비하기 위해 덤프로드를 추가하였다. Case-II의 경우도 시뮬레이션 10초 후에 초기 부하 38[kW]에서 26[kW]로 변화를 주었다. 그림 22, 23, 24, 25은 PI 제어기, Fuzzy PI 제어기 그리고 Fuzzy P+I 제어기의 응답을 비교하는 것을 보여준다. 그림 23은 부하와 유도발전기의 출력을 보여준다.

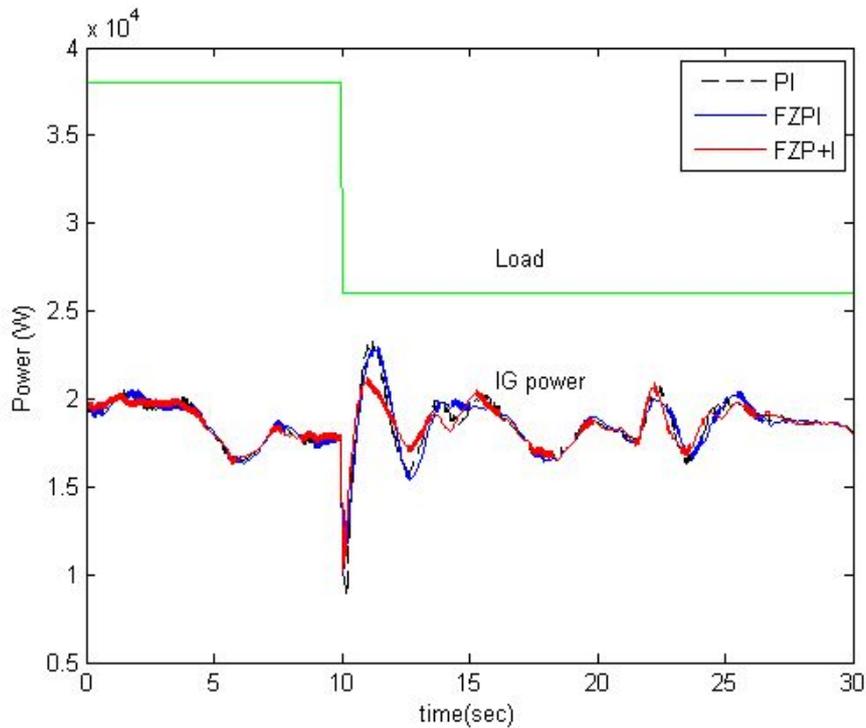


그림 22. Case-II의 경우 부하와 유도발전기의 출력

그림 23은 동기발전기와 덤프로드의 출력을 보여준다. 덤프로드는 잉여전력을 소비함과 동시에 디젤발전기의 출력 변동을 줄여주므로 디젤발전기의 효율을 향상시킨다.

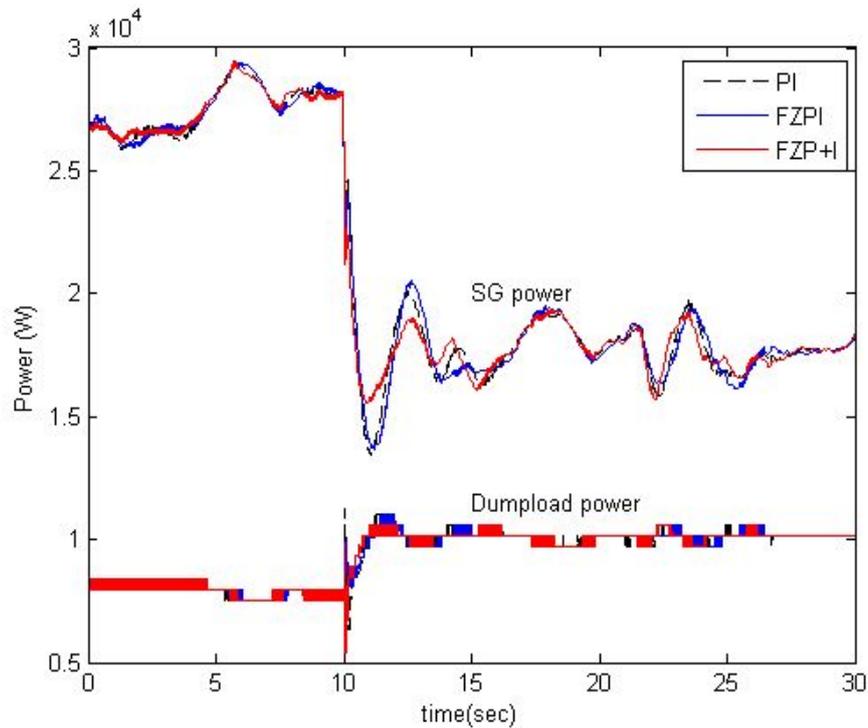


그림 23. Case-II의 경우 동기발전기와 덤프로드의 출력

그림 24와 25은 버스 전압과 버스 주파수를 나타낸다. Case-II의 경우 버스 전압에서 Fuzzy PI 제어기는 PI 제어기에 비해 오버슈트는 감소하였지만, 언더슈트가 증가하였다. 이에 반해 Fuzzy P+I 제어기는 PI 제어기와 Fuzzy PI 제어기보다 우수한 응답특성을 보여준다.

버스 주파수에서는 Fuzzy PI 제어기가 PI 제어기보다 응답특성이 나빠졌다. 이는 시스템이 복잡해짐에 따라  $K_p$ 의 값의 변화량이 증가되어 PI 제어기와 비슷하거나 나빠진 것을 볼 수 있다. 하지만 Fuzzy P+I 제어기는 전압과 주파수 모두에서 우수한 응답특성을 보이는 것을 볼 수 있다.

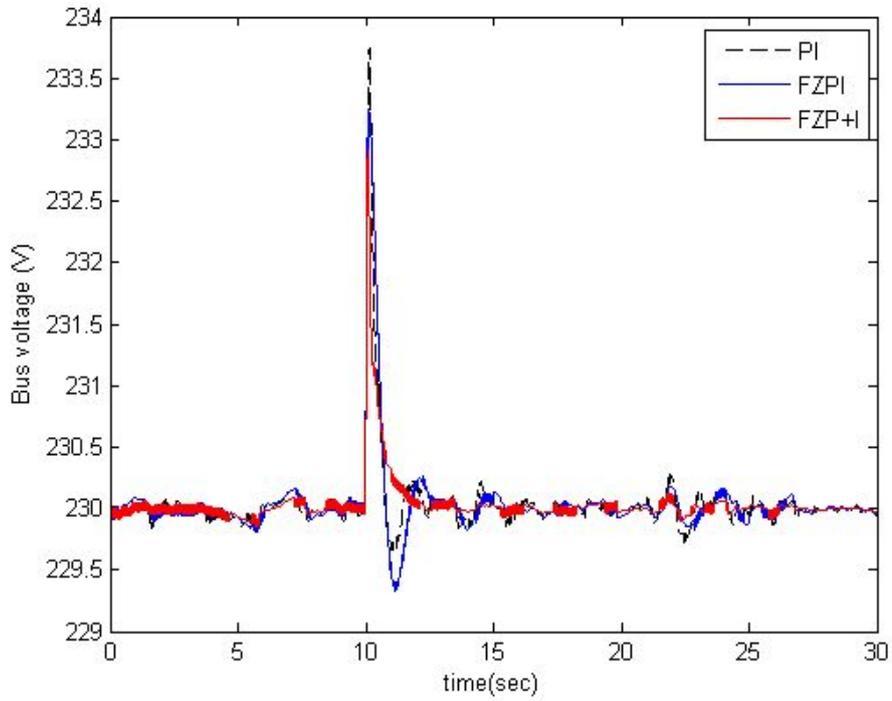


그림 24. Case-II의 경우 버스 전압

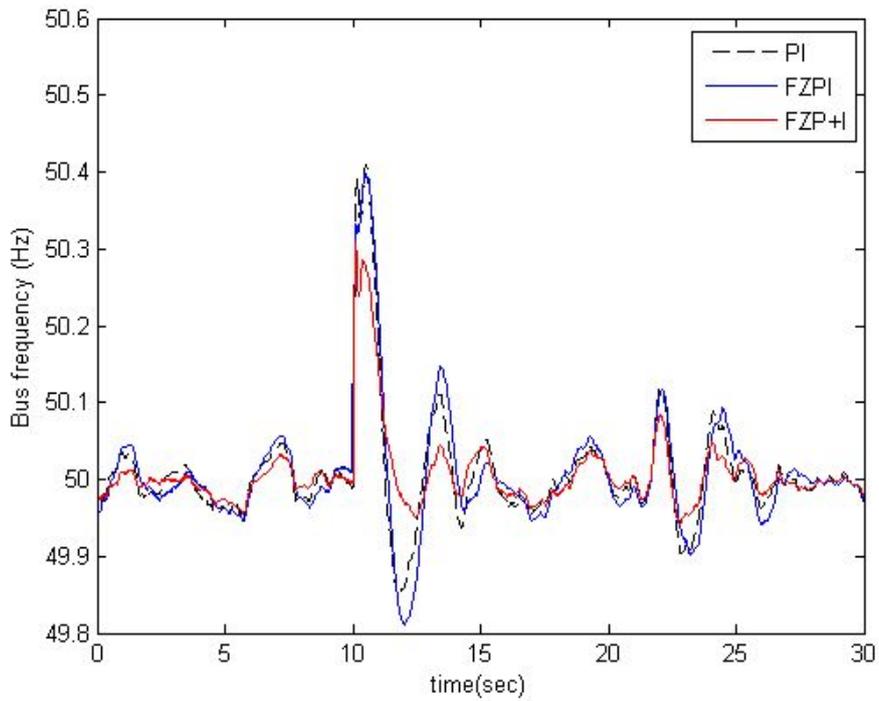


그림 25. Case-II의 경우 버스 주파수

## 5. 결론

본 논문은 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템의 전력품질을 위해 Fuzzy P+I 제어를 제안하여 PI 제어기와의 응답특성 비교에 관한 연구를 수행하였다. Fuzzy 제어기 설계를 위해 Mamdini의 추론방법과 5개의 멤버십 함수를 사용하였다. 풍력/디젤 하이브리드 발전시스템과 Fuzzy제어기를 Matlab/Simulink 프로그램을 사용하여 모델링과 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

1. 부하가 감소하여 풍력발전기에 의해 발생된 잉여전력은 덤프로드로 소비함으로써 디젤발전기의 출력 변동 폭을 감소시켜 효율이 향상됨과 동시에 독립된 계통의 전력품질을 향상시킨다.
2. Fuzzy PI 제어기는 Case-I의 경우 전통적인 PI 제어기보다 우수한 응답 특성을 보이는 반면, Case-II의 경우 시스템이 복잡해짐에 따라 PI 제어기와 비슷하거나 나빠진 응답특성을 보인다.
3. 제안하는 Fuzzy P+I 제어기는 전통적인 PI 제어기와 Fuzzy PI 제어기보다 시스템을 효과적으로 제어하여 버스 주파수, 전압이 적은 폭으로 변동 하여 독립된 계통에서 우수한 전력품질을 얻을 수 있었다.

이상의 결과를 토대로 풍력뿐만 아니라 신·재생에너지를 포함한 독립형 하이브리드 발전 시스템에 Fuzzy P+I 제어기를 활용하면 우수한 전력품질을 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이탁기 외, “서해 도서지역의 풍력-디젤 하이브리드 발전에 대한 경제성 분석”, 한국향해항만학회지 제 35권 제5호, pp. 381~385, 2011.
- [2] Z. Chen and Y. Hu, “A hybrid generation system using variable speed wind turbines and diesel units”, IEEE Ind. Electron. Soc. Annual Meeting Conference, Virginia, USA, vol. 3, pp. 2729-2734, 2003.
- [3] A.M.O. Haruni et al.. “Dynamic operation and control of a hybrid wind-diesel stand alone power systems”, in Proceedings of IEEE APEC, pp. 162-169, 2010.
- [4] K. Pandiaraj, P. Taylor, N. Jenkins, “Distributed load control autonomous renewable energy systems”. IEEE Trans. on Energy Conversion 16, 14-19, 2001.
- [5] G.S. Stavrakakis and G.N. Kariniotakis, “A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel - wind turbines systems interaction: part 1: A general multimachine power system model”. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 10, pp. 577-583, 1995.
- [6] 조세희 외, “정압제어를 위한 최적 Fuzzy PI 제어기 설계”, 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1950-1951, 2011.
- [7] Li. Wei, “Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 6, no.4, pp. 449-463, 1998.
- [8] B. Akbiyik et al., “Evaluation of the performance of various fuzzy PID controller structures on benchmark systems”. in Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey, pp. 388-393, 2005.
- [9] G.K.I. Mann et al., “Analysis of direct action fuzzy PID controllers structures”, IEEE Trans. Syst. Man&Cybern, vol. 29, no. 3, pp. 371-388, 1999.
- [10] 이상훈, 태양광 발전 및 풍력발전 연계시스템에서 Fuzzy PI제어에 의한 에너지

- 지저장장치의 출력제어 성능개선에 관한 연구, 부산대학교 전자전기공학과 석사학위논문, 2012
- [11] H.S. Ko et al., “Power quality control of hybrid wind power generation system using fuzzy-robust controller”, LNCS, vol. 4985, pp. 127-136, 2008.
- [12] H.S. Ko et al., “Power quality control of wind-hybrid power generation system using fuzzy-LQR controller”, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 516-527, 2007.
- [13] 송승호, 김일환, 한병문, “풍력발전기의 전기적 특성과 계통연계시 상호작용, 전력전자학회지”, 제8권 제6호, pp. 21-27, 2003.
- [14] L.H. Hansen et al., “Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines”, Technical Report, Riso Nat. Lab., Denmark, 2001.
- [15] 한상석, 한후석, 이창구, “분산전원의 계통연계를 위한 디젤발전기의 부하변동에 따른 제어기 개발연구”, 조명·전기설비학회논문지 제22권 제5호, pp. 53-57, 2008.
- [16] International Electrotechnical Commission, Publication 34-10, Rotating electrical machines, Part 10: Conventions for description of synchronous machines, Geneva, 1975.
- [17] E.R. Barnes, Affine transform method. Mathematical Programming, vol. 36, pp. 174-182, 1986.
- [18] H.S. Ko et al, “control of hybrid wind power generation system with dump load using advanced fuzzy-robust controller”, in proceedings of international Conference on Electrical Machines and Systems, pp.219-226, 2007.
- [19] 이현희, 최대근, 이교범, “뉴로-퍼지 제어를 이용한 계통연계형 풍력발전시스템의 센서리스 MPPT제어”, 전력전자학회논문지 제16권 제5호, pp. 484-493, 2011.
- [20] C.T. Lin and C. S. George Lee, Neural Fuzzy Systems, CRCPress, 1996.

## 감사의 글

대학원에서 어떻게 공부를 하고 연구를 해야 하는지 조금씩 알아갈 쫘 하니 어느새 2년 6개월이라는 시간이 흘러 졸업논문을 작성하고 있습니다. 이 논문이 완성하게 될 때까지 도움을 주신 모든 분들에게 감사하다는 말을 하고 싶습니다.

석사과정동안 다양한 연구의 기회와 항상 긍정적인 마인드로 지도를 해주신 김호찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 대학원 생활을 잘 모르던 제게 나아가야 할 방향과 적극적인 지원을 해주신 것에 대해 평생 잊지 않도록 하겠습니다.

대학원 생활과 전기공학과로 편입 후 적응을 잘 하지 못하였지만, 전기공학의 기초와 응용을 지도해주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김일환 교수님, 김호민 교수님께 다시 한번 감사드립니다. 그리고 논문 심사를 해주셨던 강민제 교수님과 풍력특성화협동과정을 함께 할 수 있게 해주시고 덴마크 교환학생을 위해 힘 써주신 허종철 교수님, 최경현 교수님께 감사드립니다. 풍력특성화대학원을 위해 일해주시고 계시는 김익선 행정실장님, 이창림 선생님, 김복술 선생님께 감사드립니다. 그리고 전기공학과를 힘써주신 이진재, 이길연 조교 선생님과 현재 힘쓰고 계시는 강지훈과 김윤희 선생님께 감사합니다.

풍력특성화대학원 1기생인 박사과정 혁준이 형, 정우 형, 석사과정 승건이 형, 치훈이 형, 형택이 형, 대영이 형, 경현이 형, 민이 형, 충욱, 수영, 명석, 의장, 정운, 석현, 정민, 상혁에게 감사하고 고맙습니다. 또한 전기기기 연구실의 김도진 선배님, 동기 지형, 전력전자 연구실의 김재홍 선배님, 동기 승현과 던, 후배인 경민, 동완, 지한, 전력 계통 연구실의 동기 호산, 봉언과 후배인 정석, 전력 통신선 연구실의 동기 진이에게 항상 고마움과 감사함을 느낍니다.

늦은 시간까지 계측제어 연구실에서 연구를 하며, 제게 가장 큰 도움을 주신 부창진 선배님, 김정혁 선배님, 연구실 후배인 승진, 보성, 윤석, 지환, 영균, 지원, 승용, 진우, 경훈이와 제어공학 멘티 였던 수철, 성욱, 경호에게 고마움과 감사함을 느낍니다.

마지막으로 대학원 생활과 저를 믿고 지지해주시는 아버지, 어머니, 형 그리고 동생에게 사랑한다는 말을 전합니다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 사람들에게 감사하다는 말을 전하며, 대학원 생활 동안 배우고 느꼈던 것들은 앞으로 인생을 살면서 잊지 않으며 멋진 인생을 설계하도록 하겠습니다.

2012년 6월  
양수형 올림