



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

풍력 복합발전 시스템을 위한
멀티에이전트 제어

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學專攻

姜承鎭

2014 年 8 月

풍력 복합발전 시스템을 위한
멀티에이전트 제어

指導教授 金 豪 贊
共同指導 李 範 錫

姜 承 鎭

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 8 月

姜承鎭의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2014 年 8 月

Multi-agent Control for Wind Hybrid Power Systems

Seung-Jin Kang
(Supervised by Professor Ho-Chan Kim)
(Cosupervised by Doctor Bum-Suk Lee)

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

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2014. 8.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
II. 풍력 복합발전 시스템 모델링	3
2.1 시스템 구성	3
2.2 풍력발전기 모델링	4
2.3 디젤발전기 모델링	11
2.4 배터리 모델링	16
2.5 덤프로드 모델링	19
2.6 부하 모델링	21
2.7 풍력 복합발전 시스템 모델링	22
III. 멀티에이전트 제어	24
3.1 멀티에이전트 시스템	24
3.2 멀티에이전트 기반 풍력 복합발전 시스템 제어	27
IV. 시뮬레이션 및 결과 분석	37
4.1 시뮬레이션 구성	37
4.2 Case study	38
4.3 시뮬레이션 분석 결과	46

V. 결 론	48
참 고 문 헌	49

LIST OF FIGURES

Fig. 1. The overall control scheme of the wind hybrid power systems	3
Fig. 2. A simplified block diagram of the wind turbine	5
Fig. 3. Induction generator interface	10
Fig. 4. Drive train model of diesel engine	12
Fig. 5. Synchronous generator interface	15
Fig. 6. Equivalent circuit of battery storage system in the rectifier operation ..	16
Fig. 7. The control scheme of battery storage system in the rectifier operation ..	17
Fig. 8. Converter interface	18
Fig. 9. The structure of the dumpload with binary resistor sizing	19
Fig. 10. Dumpload transistor switching signal	20
Fig. 11. Equivalent load model	21
Fig. 12. Electrical system topology model	22
Fig. 13. Energy management systems	24
Fig. 14. The operation of agent	25
Fig. 15. The single-layer structure of the multi-agent systems	26
Fig. 16. The multi-layer structure of the multi-agent systems	26
Fig. 17. Multi-agent configuration in wind hybrid power systems	27
Fig. 18. Battery agent	30
Fig. 19. Dumpload agent	31
Fig. 20. The operating characteristics of multi-agent systems	33
Fig. 21. The flowchart of multi-agent systems	34
Fig. 22. Simulation configuration of wind hybrid power systems	37
Fig. 23. Wind speed in Case 1	38
Fig. 24. Power outputs of multi-agent in Case 1	39
Fig. 25. SOC curve of battery in Case 1	40
Fig. 26. Bus outputs in Case 1	41

Fig. 27. Wind speed in Case 2	41
Fig. 28. Power outputs of multi-agent in Case 2	42
Fig. 29. SOC curve of battery in Case 2	43
Fig. 30. Bus outputs in Case 2	43
Fig. 31. Wind speed in Case 3	44
Fig. 32. Power outputs of multi-agent in Case 3	44
Fig. 33. SOC curve of battery in Case 3	45
Fig. 34. Bus outputs in Case 3	46

LIST OF TABLES

Table 1. Operating modes in multi-agent systems	35
Table 2. System parameters	38

SUMMARY

This thesis is devoted to study on multi-agent control of small-decentralized wind hybrid power systems. The main subjects are the modeling, multi-agent control, and simulation study. The main contribution of the modeling work is the development of component models for a flexible simulation tool that enables analysis of various wind hybrid system configurations. The component models are developed at an equal level of complexity, which are appropriate for multi-agent control. The models should be accurate enough to predict power quality in terms of bus voltage and (bus) frequency deviations. The proposed model framework is flexible, and can easily be extended to represent a general electrical network topology, and to include other renewable energy sources.

The design of multi-agent control is a development of a new type of the hybrid control that is made up of diesel, battery, and dumpload. This contributes an optimization approach for finding the optimal operations that are usually chosen by trial and error. In the simulation studies, five different modes of operations of the wind hybrid power system are performed: wind-diesel mode, wind-battery storage mode, wind-dumpload mode, wind-battery storage mode with the dumpload considering battery charging speed, and wind-diesel mode with the dumpload.

I. 서 론

2011년 12월 남아공 더반에서 열린 제17차 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 당사국 총회에서 2020년까지 모든 국가가 새로운 기후체제 출범에 참여하는데 합의하였고, 이로 인하여 산업 부문별 또는 제품·설비에 대한 온실가스 감축 활동에 대한 요구가 강화될 전망이다. 새로운 기후협약 이행 시 이산화탄소배출 세계 10위인 우리나라의 경우 약 3억톤 정도의 이산화탄소를 저감해야 하는 실정이며 이산화탄소 저감을 위하여 현재 건설 중인 신도시의 경우 부분적인 신재생에너지 발전설비를 도입하고 있다 [1],[2].

이에 따른 대책으로 현재 우리나라의 경우 저탄소녹색성장기본법에 따라 2020년까지 2005년 대비 온실가스배출을 30%감축을 목표로 2014년 1월 확정된 제2차 에너지기본계획에서 2035년까지 총 에너지의 11%를 신재생 에너지로 보급하는 계획을 수립하였다. 또한 공급방식도 대규모 집중식 발전설비 공급방식에서 탈피해 발전량의 15% 이상을 분산형 전원으로 공급(현재 5%)하는 목표를 세웠다 [3],[4].

발전량의 15% 이상을 분산형 전원으로 공급하는 목표를 이루기 위해서는 도서, 산간지방과 같은 고립된 지역에는 보조 전력원이 투입 가능한 풍력 복합발전 시스템을 적용하여 풍력, 태양광 등의 신재생에너지를 활용해 전력을 공급할 수 있어야 한다. 그러나 풍력, 태양광 등의 신재생에너지를 이용한 발전의 경우 주변 환경과 기후에 따라 발전량이 변하기 때문에 안정적인 전력공급이 어렵다는 문제점이 있다. 이 문제점을 해결하기 위해 전력 발전원으로 풍력, 태양광 이외에 디젤발전기와 배터리 등 분산전원을 시스템에 함께 구성하는 방법이 있다.

일반적으로 풍력 복합발전 시스템은 풍력발전기와 디젤발전기를 기본으로 배터리와 덤프로드 등을 활용하여 제어기 역할을 하도록 구성한다. 풍력 복합발전 시스템은 실제로 복잡하게 구성되어 있어, 체계적인 제어 방법이 필요하고, 또한 일부 시스템의 고장으로 인한 정전 등의 문제가 생겼을 때 전체 시스템이 영향을

받는 문제가 발생한다 [5].

풍력 복합발전 시스템을 관리하는 방법으로 중앙관리시스템(centralized energy management system, CEMS)과 분산관리시스템(distributed energy management system, DEMS)을 고려할 수 있다. 중앙관리시스템은 고도의 IT, 통신기술을 기반으로 한 SCADA를 이용하여 많은 데이터를 중앙에서 통합적으로 판단할 수 있다는 장점이 있으나, 중앙관리 시스템 자체에 문제가 생겼을 때는 백업시스템이 있다고 하더라도 전체 시스템이 크게 영향을 받을 수 있다 [6]. 이러한 문제의 해결방안으로 나오는 것이 분산관리시스템으로 멀티에이전트(multi-agent system, MAS)라는 개념이 사용된다. 시스템에 고르게 분산된 각 에이전트들은 주변의 정보를 모아 시스템의 상태를 진단하고 판단하여 다른 에이전트들과의 협동을 통해 원하는 목표를 이루도록 한다 [7].

본 논문에서는 풍력 복합발전 시스템을 대상으로 멀티에이전트 기반의 제어방법을 제안하고 운영제어를 통해 시스템 관리의 효율성이 좋아짐을 확인하도록 한다. 이를 위해 풍력 복합발전 시스템의 모델링과 멀티에이전트 제어방법 제안, 그리고 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 성능평가를 다음과 같은 과정으로 진행하였다.

제 1장에서는 멀티에이전트 기반의 풍력 복합발전 시스템의 필요성에 대하여 간단히 살펴보고, 제 2장에서는 풍력 복합발전 시스템 모델링을 나타낸다. 제 3장에서는 멀티에이전트 시스템에 대하여 기술하고, 풍력 복합발전 시스템에 적용할 수 있는 멀티에이전트 시스템을 제안한다. 제 4장에서는 제안한 멀티에이전트 기반의 복합 풍력발전 시스템의 성능을 살펴보기 위한 Matlab/Simulink 프로그램 작성과 3개 Case에 대한 시뮬레이션 수행을 통해 에이전트별 동작 특성과 시스템의 성능을 분석한다. 마지막 제 5장에서 논문의 결론에 대하여 기술한다.

II. 풍력 복합발전 시스템 모델링

2.1 시스템 구성

본 논문에서 고려한 풍력 복합발전 시스템은 유도발전기(IG) 기반의 풍력발전기, 디젤 엔진(DE)을 동력원으로 갖는 동기발전기(SG), 3상 사이리스터 브리지 컨버터를 포함하는 배터리, 저항 장치로 구성되어있는 덤프로드와 부하로 구성된다. 3상 덤프로드는 각상에 7개의 트랜지스터로 구성된다.

풍력발전기의 출력이 부하에서 요구되는 전력을 충분히 공급할 수 있다면, 동기발전기는 디젤 엔진으로부터 분리되어지고, 전압 유지를 위해 동기콘덴서로 동작한다. 덤프로드와 배터리의 주요 목적은 시스템 주파수를 조정하는 것이다. 동기발전기는 전압제어를 위하여 여자기 시스템의 무효전력 제어기능을 수행하고, 유도발전기의 무효전력을 보상하기 위해서도 사용된다. 전압형 컨버터보다 비교적 간단한 구조의 전류형 컨버터는 배터리 시스템에 이용되는데, 이는 충전 전류가 배터리 수명에 큰 영향을 끼칠 수 있기 때문이다. 배터리의 완만한 충전은 DC 버스에서 큰 용량의 인덕터를 사용하여 전류의 변동을 최소화하면 가능하다.

Fig. 1은 전반적인 풍력 복합발전 시스템을 보여준다 [5].

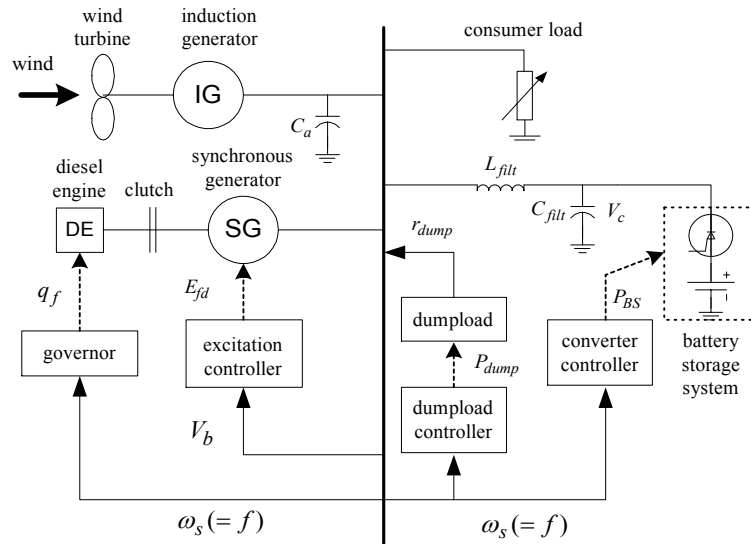


Fig. 1. The overall control scheme of the wind hybrid power systems

여기서,

C_a	캐패시터 뱅크
q_f	조속기 밸브에서 연료 흐름 비율
E_{fd}	여자기 필드 전압
V_b	버스 전압
f	주파수
P_{dump}	덤프로드 전력
r_{dump}	덤프로드 저항
P_{BS}	배터리 전력
L_{filt}	AC측 필터의 인덕턴스 값
C_{filt}	AC 측에서 캐패시턴스 값
V_c	AC 측 컨버터 전압

2.2 풍력발전기 모델링

본 시스템에서 사용한 농형 유도발전기(squirrel-cage induction generator)는 회전자의 구조가 간단하고 튼튼하며 가격도 저렴하고 계통연계 시 전력 변환기가 불필요하여 계통에 연결이 용이하다. 유지보수가 쉽지 않은 도서지역에서 견고한 농형 유도발전기는 경제적인 측면에서 우수하다. 하지만 발전기의 역률을 제어할 수 없기 때문에 발전기에서 발생한 무효전력이 계통에 영향을 준다 [8]. 이러한 이유로 농형 유도발전기는 무효전력 보상장치가 필요하고, 동기 속도 이상에서만 발전을 하기 때문에 가용 풍속범위가 좁다는 단점이 있다.

풍력발전기의 블록다이어그램은 Fig. 2와 같다.

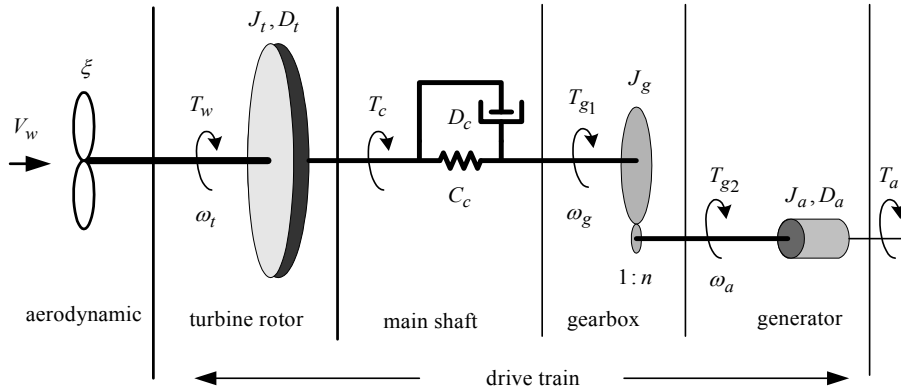


Fig. 2. A simplified block diagram of the wind turbine

공기역학적 모델은 바람의 운동 에너지로부터 풍력발전기 로터의 기계적 에너지로의 변환을 나타낸다. 공기역학적 모델은 입력으로 풍속 V_w , 날개 피치 각 ζ 그리고 로터의 회전 속도 ω_t 를 받고, 로터의 기계적 토크 T_w 을 출력하여 드라이브 트레인으로 전달한다. 드라이브 트레인은 로터의 기계적 토크 T_w 와 발전기의 전기적 토크 T_a 를 전달받는다. ω_a 와 ω_g 는 각각 기어박스의 고속축과 저속축의 회전속도를 의미하고, ω_t 는 풍력발전기 로터의 회전 속도이다. J_t , J_a 그리고 J_g 는 각각 로터, 발전기 그리고 기어의 관성을 의미한다. D_c 는 회전체의 마찰 감쇠 계수이고, C_c 는 스프링 상수이며, D_a 는 발전기의 마찰 감쇠 계수이고, D_t 는 로터의 마찰 감쇠 계수이다.

풍력발전기의 공기역학적 특성 출력은 식 (1)과 같다 [9].

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \zeta) \rho A_r V_w^3 \quad (1)$$

여기서,

$C_p(\lambda, \zeta)$ 출력 계수

λ 주속비, $\lambda = \lambda_0 + 0.08\zeta$, $\left(\lambda_0 = \frac{\omega_t r}{V_w} \right)$

ζ	피치 각
ρ	공기밀도 [Kg/m^3]
A_r	회전자의 회전 단면적 [m^2]
V_w	풍속 [m/s]

로터의 기계적 토크는 식 (2)에 주어진다.

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_t} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \zeta) \rho A_r \frac{V_w^3}{\omega_t} \quad (2)$$

모델의 입력은 풍속 V_w 와 기계적 회전 속도 ω_t 이다. 모델의 출력은 공기역학적 출력 P_w 와 기계적 로터 토크 T_w 이고, 이 출력을 전달 받는 드라이브 트레인의 입력값이 된다.

풍력발전기 로터와 기어, 발전기의 수학적 모델을 구하면 식 (3)과 같다.

$$J_t \dot{\omega}_t = T_w - D_t \omega_t - T_c \quad (3)$$

$$J_g \dot{\omega}_g = T_c - D_g \omega_g - T_{g1}$$

$$J_a \dot{\omega}_a = T_{g2} - D_a \omega_a - T_a$$

여기서, T_a 는 발전기의 회전자 전기적 토크이다. 커플링을 통하여 전달되는 토크 T_c 는 다음의 식과 같이 강성도 및 감도 계수로 표현할 수 있다.

$$T_c = C_c \theta_c + D_c \dot{\theta}_c \quad (4)$$

이 때, 상대 축방향 변위 θ_c 의 표현 식 (5)와 같다.

$$\dot{\theta}_c = \omega_t - \omega_g \quad (5)$$

기어비가 n 인 이상적인 기어 변속장치(무손실)라고 가정하면, 로터와 발전기 사이의 각속도와 토크는 다음 관계를 만족한다.

$$\omega_g = \frac{1}{n}\omega_a, \quad T_{g2} = \frac{1}{n}T_{g1} \quad (6)$$

식 (3)과 (6)을 이용하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$(J_a + \frac{1}{n^2}J_g)\dot{\omega}_a = \frac{T_c}{n} - (D_a + \frac{1}{n^2}D_g)\omega_a - T_a \quad (7)$$

식 (4)를 식 (3)과 (7)에 대입하면, 전체적인 풍력발전기의 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta}_c = \omega_t - \frac{1}{n}\omega_a \quad (8)$$

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_t} \left(T_w - C_c \theta_c - (D_t + D_c)\omega_t + \frac{D_c}{n}\omega_a \right)$$

$$\dot{\omega}_a = \frac{1}{J_a + \frac{1}{n^2}J_g} \left(\frac{C_c}{n}\theta_c + \frac{D_c}{n}\omega_t - \left(D_a + \frac{(D_c + D_g)}{n^2} \right)\omega_a - T_a \right)$$

여기서,

T_w	로터의 기계적 토크
ω_t, ω_a	풍력발전기와 동기발전기의 회전속도
T_a	발전기 로터측 공극토크
J_t, J_a	회전자의 관성과 발전기의 관성

D_c	비틀림 감쇠 계수
C_c	스프링 계수
D_a	발전기의 마찰 댐핑 계수
D_t	로터의 마찰 댐핑 계수
θ_c	축 방향 변위

풍력발전기의 전기적 구성요소인 유도발전기는 농형 유도발전기를 이용한다. 유도발전기는 발전기 시스템 모델에 적합하기 위해 동기발전기의 $d-q$ 동기좌표 계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다 [10].

$$V_{aq} = -R_s I_{aq} + \omega_s \psi_{ad} \quad (9)$$

$$V_{ad} = -R_s I_{ad} - \omega_s \psi_{aq}$$

$$0 = -R_r I_{rq} - \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{rq} + (\omega_s - \omega_a) \psi_{rd}$$

$$0 = -R_r I_{rd} - \frac{1}{\omega_b} \dot{\psi}_{rd} - (\omega_s - \omega_a) \psi_{rq}$$

$$\psi_{aq} = L_s I_{aq} + L_m I_{rq}$$

$$\psi_{ad} = L_s I_{ad} + L_m I_{rd}$$

$$\psi_{rq} = L_m I_{aq} + L_r I_{rq}$$

$$\psi_{rd} = L_m I_{ad} + L_r I_{rd}$$

$$T_a = T_b (\psi_{ad} I_{aq} - \psi_{aq} I_{ad})$$

여기서,

V_{aq}, V_{ad} 유도발전기의 고정자 전압

I_{aq}, I_{ad} 유도발전기의 고정자 전류

I_{rq}, I_{rd} 유도발전기의 회전자 전류

ω_s	동기 레퍼런스 회전속도
ω_a	유도발전기 회전자 회전속도
ψ_{aq}, ψ_{ad}	유도발전기 고정자 자속쇄교
ψ_{rq}, ψ_{rd}	유도발전기 회전자 자속쇄교
R_s, R_r	고정자와 회전자의 저항
L_s, L_r, L_m	고정자와 회전자의 인덕턴스 및 상호 인덕턴스
T_a, T_b	유도발전기의 공극토크와 기준 토크값

유도발전기의 과도 인덕턴스와 과도 개방회로 시정수를 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{L}'_s &= L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \\ \tau'_o &= \frac{L_r}{\omega_b R_r} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{rq} &= \frac{1}{\tau'_o} (-\psi_{rq} + L_m I_{aq}) + w_b (w_s - w_a) \psi_{rd} \\ \dot{\psi}_{rd} &= \frac{1}{\tau'_o} (-\psi_{rd} + L_m I_{ad}) - w_b (w_s - w_a) \psi_{rq} \\ V_{aq} &= -R_s I_{aq} + \omega_s \dot{L}'_s I_{ad} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \\ V_{ad} &= -R_s I_{ad} - \omega_s \dot{L}'_s I_{aq} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} \end{aligned} \quad (11)$$

유도발전기의 공극토크와 유/무효 전력은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$T_a = T_b \left[\frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} I_{aq} - \psi_{rq} I_{ad}) \right] \quad (12)$$

$$P_a = S_b (V_{aq} I_{aq} + V_{ad} I_{ad})$$

$$Q_a = S_b (V_{ad} I_{aq} - V_{aq} I_{ad})$$

유도발전기는 선로 임피던스를 통하여 모선에 연결되고, 자화를 위한 무효전력이 필요하기 때문에, 출력단에 무효전력 보상을 위한 커패시터 뱅크를 연결한다. Fig. 3은 버스와 연결되는 모델을 보여준다.

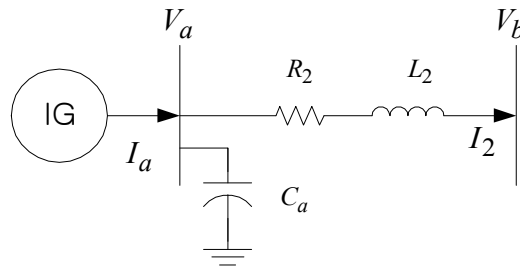


Fig. 3. Induction generator interface

식 (13)은 버스 전압과 고정자 전류 및 전압의 구성 요소간의 관계를 보여준다.

$$V_{bq} = -R_2 I_{aq} + \omega_s L_2 I_{ad} + (1 - \omega_s^2 C_a L_2) V_{aq} - \omega_s R_2 C_a V_{ad} \quad (13)$$

$$V_{bd} = -R_2 I_{ad} - \omega_s L_2 I_{aq} + (1 - \omega_s^2 C_a L_2) V_{ad} + \omega_s R_2 C_a V_{aq}$$

식 (11)과 식 (13)을 활용하면 최종적으로 식 (14)와 같이 행렬을 통하여 대수 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \dot{L}_s & 1 & 0 \\ \omega_s \dot{L}_s & R_s & 0 & 1 \\ R_2 & -\omega_s L_s (\omega_s^2 C_a L_2 - 1) & \omega_s R_2 C_a & \\ \omega_s L_2 & R_2 & -\omega_s R_2 C_a & (\omega_s^2 C_a L_2 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aq} \\ I_{ad} \\ V_{aq} \\ V_{ad} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bq} \\ V_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \\ -\omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.3 디젤발전기 모델링

일반적으로 디젤엔진을 이용한 발전기 시스템은 엔진에 발전기를 연결하고 엔진을 구동하게 되면 엔진의 힘에 의하여 발전기가 회전하고 이 회전력에 의하여 발전기에 단자전압이 발생한다. 이 단자전압은 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 [11].

디젤 엔진 모델에서 연소 모델은 다음과 같이 표현된다 [12].

$$\dot{q}_{eff} = \frac{1}{\tau_c} (-q_{eff} + q_f(t - \tau_d)) \quad (15)$$

$$p_e = \epsilon k_c q_{eff}$$

$$T_d = k_v (p_e - p_o)$$

여기서,

q_{eff}, q_f	연소실과 조속기 밸브에서 연료 흐름 비율
p_o, ϵ	제로 토크 압력 및 연비
τ_d	연소 지연 시간
τ_c	액추에이터와 연소 공정 다이내믹을 나타내는 시정수
k_v	엔진의 박출량
k_c	압력과 연료 소비의 관계량

T_d, p_e

샤프트 토크와 엔진실 압력

Fig. 4에서 디젤 엔진의 기계적인 모델은 풍력발전기와 같은 방법으로 유도할 수 있다. 중요한 차이점은 디젤엔진과 발전기 사이에 기어가 아닌 서로의 클러치로 결합되어 있다. 이 클러치는 엔진과 발전기를 연결 혹은 분리할 수 있도록 매우 유연한 결속 방법을 사용해야 한다.

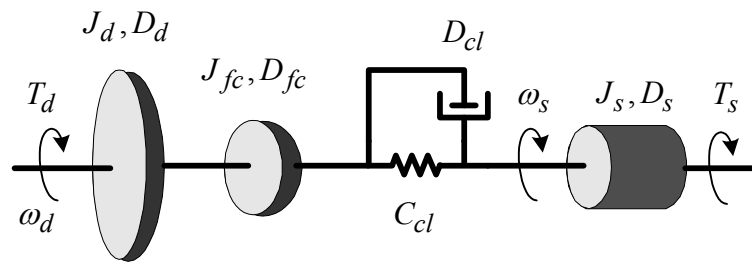


Fig. 4. Drive train model of diesel engine

풍력발전기의 유사한 드라이브 트레인 모델은 구동을 위한 대부분의 구성요소를 생략할 수 있다. 디젤엔진이 항상 동작하지 않고 운전과 정지를 반복하기 때문이다. 그래서 연결과 분리에 의한 기계적 반작용이 발생한다. 이러한 특성을 고려하여 디젤엔진의 드라이브 트레인 모델링은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\theta}_d = \omega_d - \omega_s \tag{16}$$

$$(J_d + J_{fc})\dot{\omega}_d = T_d - (D_d + D_{fc})\omega_d - T_{cl}$$

$$J_s\dot{\omega}_s = T_{cl} - D_s\omega_s - T_s$$

$$T_{cl} = C_{cl}\theta_d + D_{cl}\dot{\theta}_d$$

여기서,

ω_d 디젤 엔진의 회전속도

θ_d	엔진과 발전기 샤프트 사이의 비틀림 각도
ω_s	발전기의 회전 속도
T_d	클러치에 의한 토크
T_s	발전기에서의 공극 토크
J_d, J_{fc}	디젤 엔진의 관성과 클러치의 관성
J_s, D_s	발전기의 관성과 발전기의 마찰 댐핑
D_d, D_{fc}	엔진의 마찰 댐핑과 클러치의 마찰 댐핑
D_d, C_d	커플링의 댐핑과 커플링의 비틀림 강성도

식 (16)에 식 (15)를 대입하면 식 (17)을 구할 수 있다.

$$\dot{q}_{eff} = \frac{1}{\tau_c} (-q_{eff} + q_f(t - \tau_d)) \quad (17)$$

$$\dot{\theta}_d = \omega_d - \omega_s$$

$$\dot{\omega}_d = \frac{1}{J_d + J_{fc}} [\varepsilon k_v k_c q_{eff} - C_d \theta_d - (D_d + D_{fc} + D_{cl}) \omega_d + D_{cl} \omega_s - k_c p_o]$$

$$\dot{\omega}_s = \frac{1}{J_s} [C_d \theta_d + D_{cl} \omega_d - (D_s + D_{cl}) \omega_s - T_s]$$

디젤 엔진과 연결된 전기적인 특성을 갖는 동기발전기는 일일기동 및 일일정지가 특별한 제약 없이 운전이 가능하여 침투부하용으로 많이 사용되고 있다. 조속기에 적합한 돌극형 동기발전기의 모델링은 식 (18)과 같다 [13].

$$V_{sq} = -R_a I_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \quad (18)$$

$$V_{sd} = -R_a I_{sd} - \omega_s \psi_{sq}$$

$$E_{fd} = \omega_b R_f I_f + \dot{\psi}_f$$

$$\psi_{sq} = L_q I_{sq}$$

$$\psi_{sd} = L_d I_{sd} + L_{md} I_f$$

$$\psi_f = L_{md} I_{sd} + L_f I_f$$

$$T_s = T_b (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd})$$

여기서,

V_{sq}, V_{sd}	동기발전기의 고정자 단자전압
E_{fd}	동기발전기의 계자전압
ψ_f	동기발전기의 계자 자속 쇄교
I_{sq}, I_{sd}	모선으로 출력되는 동기발전기 전류
ψ_{sq}, ψ_{sd}	고정자 계자 자속 쇄교
ω_s	유도발전기 회전자의 각속도/계통 주파수
L_q, L_d	유도발전기의 q 축과 d 축의 계자 인덕턴스
R_a, R_f	전기자 저항과 필드 저항
L_{md}, L_f	d 축 필드 상호 인덕턴스와 필드 인덕턴스
I_f	동기 발전기의 계자 전류
T_s	동기 발전기의 공극 토크
ω_b	로터의 각속도
T_b	단위기준 당 토크

여기서 $X = \omega L$ 이고, $I_f = (\psi_f - L_{md} I_{sd}) / L_f$ 임을 이용하면 식 (19)를 유도할 수 있다.

$$V_{sq} = -R_a I_{sq} + \omega_s \left[L_d I_{sd} + \frac{L_{md}}{L_f} (\psi_f - L_{md} I_{sd}) \right] \quad (19)$$

$$V_{sd} = -R_a I_{sd} - \omega_s L_q I_{sq}$$

$$\dot{\psi}_f = \omega_b \frac{R_f}{L_f} (-\psi_f + L_{md} I_{sd}) + E_{fd}$$

$$T_s = T_b \left[\left(L_d I_{sd} + \frac{L_{md}}{L_f} (\psi_f - L_{md} I_{sd}) \right) I_{sq} - L_q I_{sq} I_{sd} \right]$$

동기발전기의 과도 d 축 인덕턴스와 과도 개방회로 시상수는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$\dot{L}_d = L_d - \frac{L_{md}^2}{L_f} \quad (20)$$

$$\tau'_{do} = \frac{L_f}{\omega_b R_f}$$

Fig. 5는 고정자 단자와 버스 사이의 라인 임피던스를 포함하여 표현하였다.

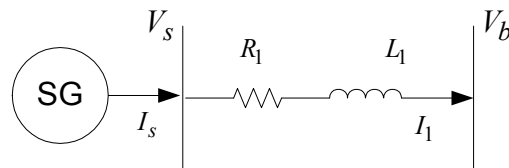


Fig. 5. Synchronous generator interface

버스에 연결된 동기발전기는 고정자 전압 및 전류 성분을 포함한 행렬로 표현된다. 버스 전압과 버스 주파수, 필드 쇄교 자속은 입력변수로 활용된다.

$$\dot{\psi}_f = \frac{1}{\tau_{do}}(-\psi_f + L_{md}I_{sd}) + E_{fd} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} R_a & -\omega_s \dot{L}_d & 1 & 0 \\ \omega_s L_q & R_a & 0 & 1 \\ R_1 & -\omega_s L_1 & -1 & 0 \\ \omega_s L_1 & R_1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sq} \\ I_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bq} \\ V_{bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_s \frac{L_{md}}{L_f} \psi_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.4 배터리 모델링

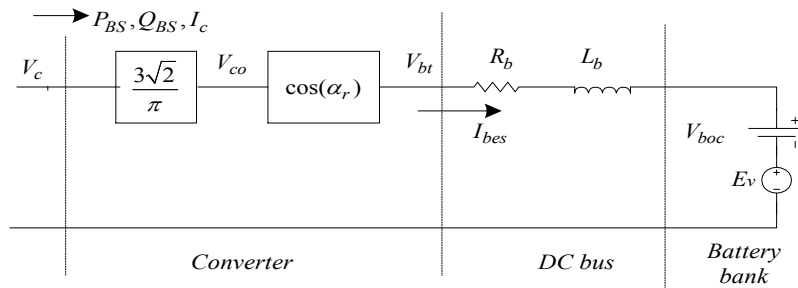


Fig. 6. Equivalent circuit of battery storage system in the rectifier operation

Fig. 6에서는 배터리 저장 시스템 모델은 전압과 전류 그리고 정류 운영에서 전반적인 전기 시스템의 연결 사이에서 입출력 관계를 보여준다. 3상 사이리스터 전류형 컨버터의 DC측은 배터리 뱅크에 연결된다. 사이리스터는 AC와 DC 전류사이의 손실이 거의 발생하지 않은 이상적인 모델로서 손실률은 0.955를 갖도록 가정할 수 있다 [14]. 배터리의 충전 속도를 조절하기 위해, DC 버스에서 DC 전류(I_{bes})에 따라 결정되는 강제 전압(forcing voltage) ($E_v = K_{v,ref} I_{bes}$)을 추가한다. 여기서 $K_{v,ref}$ 는 강제이득이다. 만약에 I_{bes} 가 커지면, E_v 도 커지고 배터리 뱅크의 전압 V_{boc} 도 증가하게 된다 (즉, $V_{boc}^{new} = V_{boc} + E_v$). 따라서, 배터리 뱅크의 갑작스런 전류변화는 예방되고 충전속도도 조절된다.

6 펄스 컨버터의 이상적인 무부하 최대 DC 전압 V_{co} 와 배터리의 단자 전압 V_{bt} 은 다음과 같다.

$$V_{co} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_c \quad (22)$$

$$V_{bt} = V_{co} \cos(\alpha_r)$$

여기서,

V_c AC측 선간전압 ($V_c = \sqrt{V_{cd}^2 + V_{cq}^2}$)

V_{co} 컨버터 측 전압강하

α_r, I_{bes} 점호각(firing angle)과 배터리 내부 DC 전류 흐름

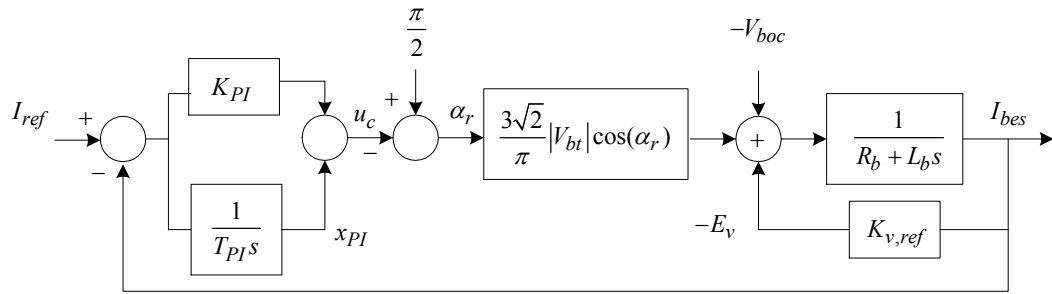


Fig. 7. The control scheme of battery storage system in the rectifier operation

Fig. 7은 배터리 시스템의 제어기법을 나타낸다. 제시된 모델은 인버터(inverter)와 정류기(rectifier) 동작에 모두 적용할 수 있으며, 인버터 동작에서는 V_{boc} 값이 양수로 바뀌고 E_v 는 제거된다.

점호각 α_r 은 내부 PI 컨버터 제어기에 의해 제어된다. u_c 는 PI 제어기의 출력이고, K_{PI} 는 비례이득 그리고 T_{PI} 는 적분이득이다. DC 전류는 식 (23)와 같다.

$$\dot{I}_{bes} = \frac{1}{L_b} [V_{bt} - R_b I_{bes} - V_{boc} - E_v] \quad (23)$$

$$\dot{x}_{PI} = \frac{1}{T_{PI}} (I_{ref} - I_{bes})$$

$$u_c = x_{PI} + K_{PI} (I_{ref} - I_{bes})$$

여기서,

$R_b, L_b,$	전체 저항(배터리 내부+DC 버스)과 DC 버스 인덕턴스
V_{boc}, α_r	개방 DC 전압과 점호각
E_v	강제 전압

배터리 저장 시스템을 AC 버스에 연결한 경우에, 충전과 방전 전력 P_{BS} , Q_{BS} 는 식 (24)와 같이 표현된다.

$$P_{BS} = V_{cd}I_{cd} + V_{cq}I_{cq} \quad (24)$$

$$Q_{BS} = V_{cd}I_{cq} - V_{cq}I_{cd}$$

식 (24)에 AC측 선간전압 V_c 값을 대입하면 식 (25)을 얻을 수 있다.

$$I_{cq} = \frac{V_{cq}P_{BS} + V_{cd}Q_{BS}}{V_c^2} \quad (25)$$

$$I_{cd} = \frac{V_{cd}P_{BS} - V_{cq}Q_{BS}}{V_c^2}$$

컨버터의 인터페이스 모델은 Fig. 8과 같다.

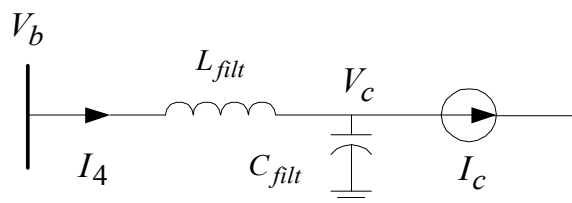


Fig. 8. Converter interface

전류 I_4 는 V_b 와 I_c 값들을 활용하면 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{4q} = \frac{-\omega_s C_{filt}}{1 - \omega_s^2 C_{filt} L_{filt}} V_{bd} + \frac{1}{1 - \omega_s^2 C_{filt} L_{filt}} I_{cq} \quad (26)$$

$$I_{4d} = \frac{\omega_s C_{filt}}{1 - \omega_s^2 C_{filt} L_{filt}} V_{bd} + \frac{1}{1 - \omega_s^2 C_{filt} L_{filt}} I_{cd}$$

2.5 덤프로드 모델링

Fig. 9는 3상 덤프로드의 구조를 보여준다. 덤프로드의 각각의 상은 7개의 트랜지스터로 제어되는 저항 बैं크로 구성된다. Fig. 10은 필요한 전력을 제공하기 위해 트랜지스터가 전환되는 방법을 보여준다. 예를 들어, AC 라인 전압이 230 V 이고 각 상의 저항이 120 Ω , 덤프로드 제어기로부터 요구되는 덤프로드 전력이 880 W라면, 스위치 S_2 만 켜지도록 한다 [15].

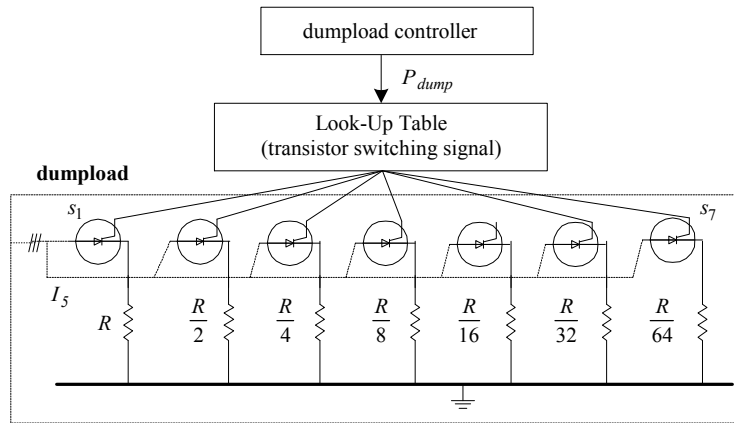


Fig. 9. The structure of the dumpload with binary resistor sizing

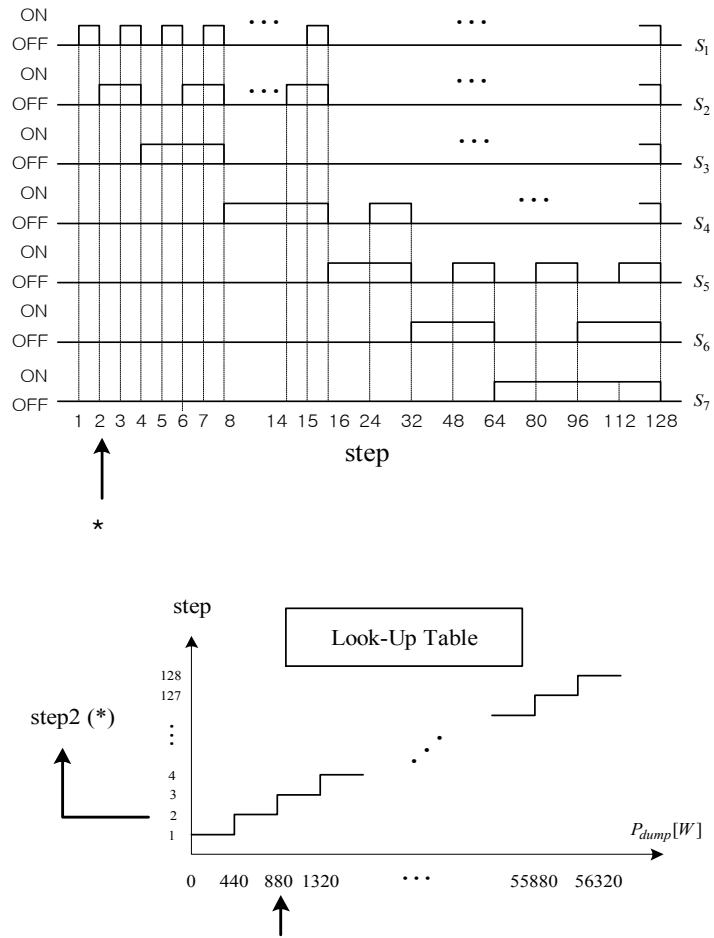


Fig. 10. Dumpload transistor switching signal

덤프로드를 AC 버스에 연결한 경우에 전류 I_5 는 다음과 같이 버스 전압에 의해 나타낼 수 있다.

$$I_5 = \frac{V_b}{r_{dump}} \quad (27)$$

여기서 V_b 는 버스 전압이고 r_{dump} 는 덤프로드 저항을 나타낸다.

$d-q$ 축에서의 전류 I_5 은 다음과 같다.

$$I_{5q} = \frac{V_{bq}}{r_{dump}} \quad (28)$$

$$I_{5d} = \frac{V_{bd}}{r_{dump}}$$

2.6 부하 모델링

부하는 다음과 같이 평형 삼상 가변 임피던스로 모델링된다.

$$z_L = R_L + jX_L \quad (29)$$

$$X_L = \omega_s L_L$$

전송선로를 Fig. 11과 같이 π -등가변환으로 변환하면, 전체 등가 부하는 다음과 같이 모델링할 수 있다 [16],[17].

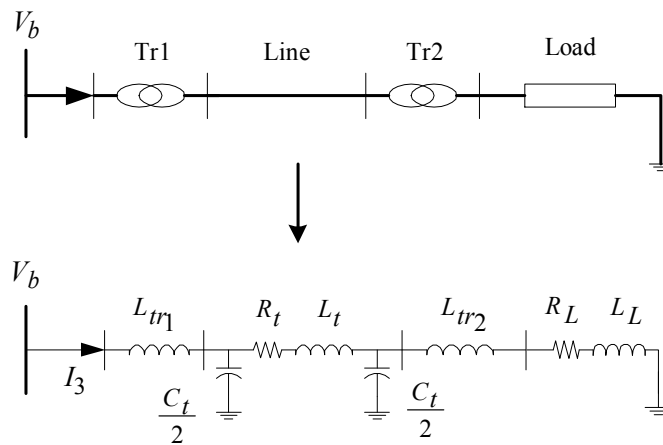


Fig. 11. Equivalent load model

전송선로를 포함한 전체 부하 임피던스 z_3 는 식 (30)과 같이 나타낼 수 있고,

$$z_3 = \frac{V_b}{I_3} = R_3 + jX_3 \quad (30)$$

$$= j\omega_s L_{tr1} + \left\{ \frac{2}{j\omega_s C_t} // \left[R_t + j\omega_s L_t + \frac{2}{j\omega_s C_t} // (R_L + j\omega_s (L_{tr2} + L_L)) \right] \right\}$$

$d-q$ 축에서의 전류 I_3 은 다음과 같이 버스 전압에 의해 나타낼 수 있다.

$$I_{3q} = \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2} V_{bq} + \frac{X_3}{R_3^2 + X_3^2} V_{bd} \quad (31)$$

$$I_{3d} = \frac{X_3}{R_3^2 + X_3^2} V_{bq} + \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2} V_{bd}$$

2.7 풍력 복합발전 시스템 모델링

Fig. 12는 앞에서 살펴본 풍력 복합발전 시스템의 각 성분별 모델링을 바탕으로, 전체 시스템의 전기적인 등가모델을 나타낸다.

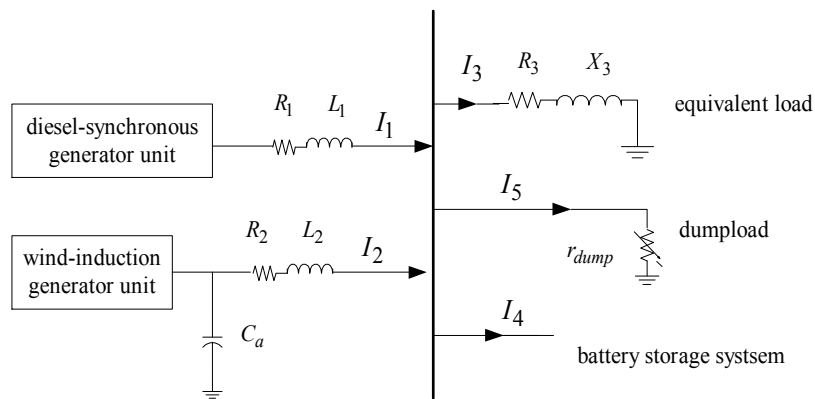


Fig. 12. Electrical system topology model

$d-q$ 변환된 유도발전기 및 동기발전기 전류요소에서 부하와 덤프로드의 전류 요소와의 차를 통해 전체 독립된 계통에서 안정적인 전류 균형을 이룰 수 있도록 한다.

Fig. 12에서 나타낸 전류값을 사용하여 표현하면 식 (32)와 같다 [18].

$$I_{1q} + I_{2q} - I_{3q} - I_{4q} - I_{5q} = 0, \quad (32)$$

$$I_{1d} + I_{2d} - I_{3d} - I_{4d} - I_{5d} = 0$$

풍력 복합발전 시스템 유도발전기의 전류 요소는 식 (33)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{2q} = I_{aq} + \omega_s C_a V_{ad} \quad (33)$$

$$I_{2d} = I_{ad} - \omega_s C_a V_{aq}$$

각각 장치들을 모델링한 전류식을 재배열하면 식 (34)와 같이 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2} + \frac{1}{r_{dump}} & \frac{X_3}{R_3^2 + X_3^2} + \frac{\omega_s C_{filt}}{\omega_s^2 C_{filt} L_{filt} - 1} \\ -X_3 & \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2} + \frac{1}{r_{dump}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bq} \\ V_{bd} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$+ \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sq} \\ I_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -\omega_s C_a \\ 0 & -1 & \omega_s C_a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aq} \\ I_{ad} \\ V_{aq} \\ V_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{cq}}{\omega_s^2 C_{filt} L_{filt} - 1} \\ I_{cd} \\ \frac{I_{cd}}{\omega_s^2 C_{filt} L_{filt} - 1} \end{bmatrix}$$

Ⅲ. 멀티에이전트 제어

3.1 멀티에이전트 시스템

Fig. 13에서 풍력 복합발전 시스템을 관리하는 방법으로 중앙관리시스템 (CEMS)과 분산관리시스템(DEMS)을 고려할 수 있다. 중앙관리시스템은 고도의 IT, 통신기술을 기반으로 한 SCADA를 이용하여 많은 데이터를 중앙에서 통합적으로 판단할 수 있다는 장점이 있으나, 중앙관리시스템 자체에 문제가 생겼을 때는 백업시스템이 있다고 하더라도 전체 시스템이 크게 영향을 받을 수 있다 [6].

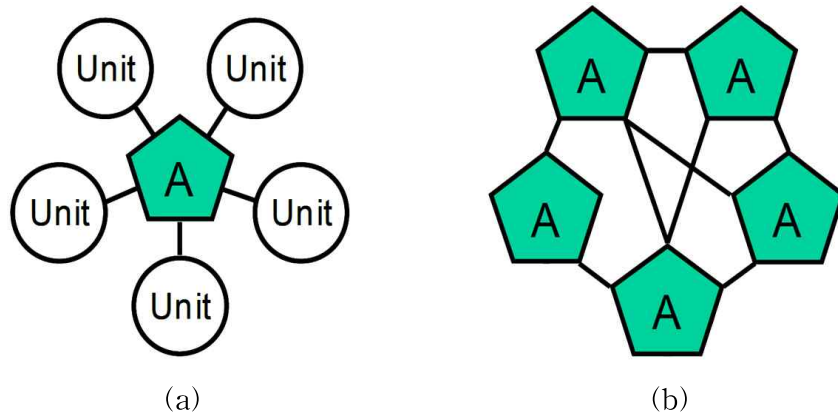


Fig. 13. Energy management systems
(a) CEMS, (b) DEMS

본 논문에서는 풍력 복합발전 시스템을 관리하는 방법으로 분산관리시스템으로 멀티에이전트(MAS)라는 개념을 사용한다. 시스템에 고르게 분산된 각 에이전트들은 주변의 정보를 모아 시스템의 상태를 진단하고 판단하여 다른 에이전트들과의 협동을 통해 원하는 목표를 이루도록 한다 [7]. 멀티에이전트 시스템의 에이전트들은 공통적으로 환경의 변화에 대한 반응성(reactivity), 목표를 지향하여 행동하는 목표지향성(pro-activity) 그리고 다른 에이전트와 상호 작용하는 사회성(sociability)의 특징을 갖는다 [19],[20]. 그리고 지능형 에이전트는 풍력 복합

발전 시스템의 신재생에너지원의 불안정한 출력과 부하의 불확실성에 대해 효과적으로 대처할 수 있고 분산전원 운영상의 제약조건 및 경제성 등 다양한 사항을 고려할 수 있다. 멀티에이전트 시스템의 장점은 아래와 같다.

- 독립적인 응용프로그램의 집합으로는 해결할 수 없는 보다 복잡한 서비스를 다른 에이전트와의 협력을 통해 제공한다.
- 서브시스템의 상황을 관리에이전트나 에이전트간의 상호협조를 통하여 수시로 파악할 수 있기 때문에 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다.
- 매우 복잡한 제어 시스템에서 고도의 확장성과 유연한 솔루션을 제공한다.
- 리스크의 분산과 에이전트간의 긴밀한 협조로 높은 내고장성을 유지할 수 있다.

Fig. 14에서는 에이전트의 동작을 크게 세 가지 단계로 보여준다. 첫째, 에이전트는 시스템의 상태를 센서를 통해 관찰하고 있다가 환경이 변화하면 이를 먼저 인식(perception)한다. 둘째, 에이전트가 풍력 복합발전 시스템에서의 전력 품질을 관리하는 역할을 하고 있다고 가정하면, 측정하고 있는 풍력 복합발전 시스템의 계통의 전압과 주파수가 변하는 상태에 따라 풍력 또는 부하가 변한 정도를 인식할 수 있다. 이렇게 인식한 정보를 통해 풍력 복합발전 시스템에 속한 발전기의 출력 증가나 배터리의 방전을 통해 어느 정도로 추가적인 전력을 공급받을지를 판단하는 과정(processing)을 거친다. 마지막으로, 이렇게 판단한 결과를 바탕으로 에이전트는 최종적인 결정을 내리고 변화한 환경에 대응할 수 있는 행동(action)을 취한다 [21],[22].

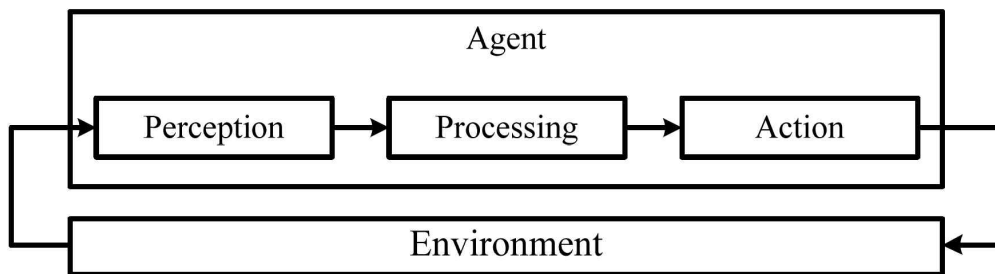


Fig. 14. The operation of agent

멀티에이전트 시스템의 구조는 Fig. 15와 Fig. 16과 같이 single-layer와 multi-layer로 나눌 수 있다.

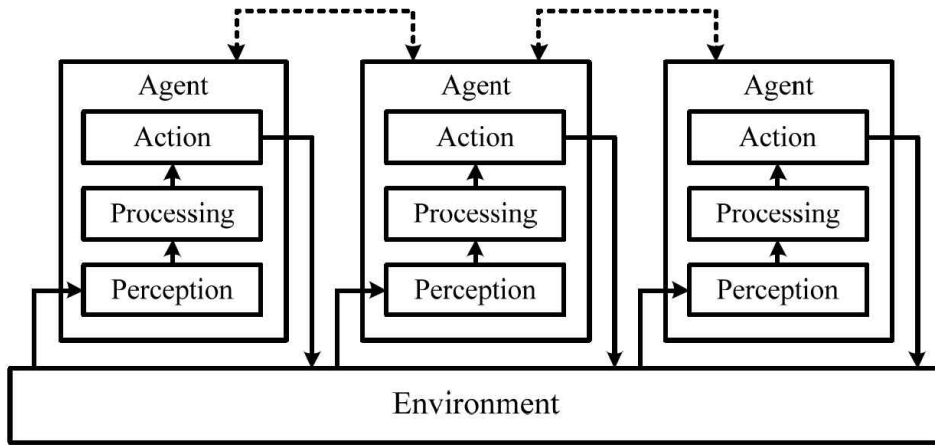


Fig. 15. The single-layer structure of the multi-agent systems

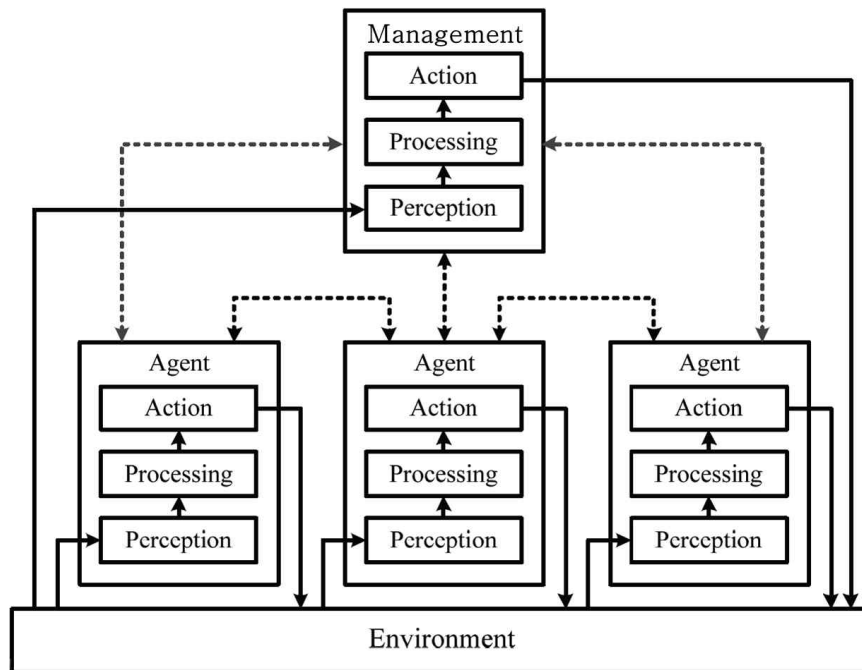


Fig. 16. The multi-layer structure of the multi-agent systems

Fig. 15는 single-layer 구조로 이루어진 멀티 에이전트 시스템을 보여준다. 다수의 에이전트는 센서를 통해 현재 상태를 측정하고 있으며, 측정된 정보를 상

호 간의 통신을 통해 주고 받는다. 모든 에이전트들은 동일한 권한을 가지며 환경의 변화에 대해 설계된 방법과 목적에 따라 제어를 수행할 수 있다.

Fig. 16에서 보여주는 multi-layer 구조는 single-layer 구조와 달리 상위층에 관리(management) 에이전트를 갖는다. 관리 에이전트는 다른 에이전트들과 마찬가지로 환경의 변화를 인식하고 행동을 취할 수 있음과 동시에 에이전트들이 서로의 정보를 공유하고 상호 작용하는 과정의 중간에서 에이전트들이 의견을 조정하고 중재하는 역할을 담당한다. 관리 에이전트는 다른 에이전트들보다 우선적이고 높은 권한을 가지며, 각각의 에이전트들은 관리 에이전트를 통해서 서로 정보를 공유하고 행동을 결정한다.

3.2 멀티에이전트 기반 풍력 복합발전 시스템 제어

풍력 복합발전 시스템을 대상으로 멀티에이전트 제어기를 설계하기 위해서는 풍력복합발전을 구성하는 요소에 대한 상태, 제어, 관리에 대한 각각에 대한 에이전트 설계가 필요하다. 본 논문에서는 Fig. 17과 같이 풍력발전기, 디젤발전기, 배터리, 덤프로드 그리고 부하 요소에 대한 각각의 에이전트를 설계하였다. 부하 에이전트를 통해 부하에서 요구되는 사용량을 확인한 경우에, 멀티에이전트 시스템은 풍력발전기의 출력을 확인하고 배터리 에이전트를 통해 안정적으로 전압과 주파수를 제어할 수 있도록 동작시킨다 [7].

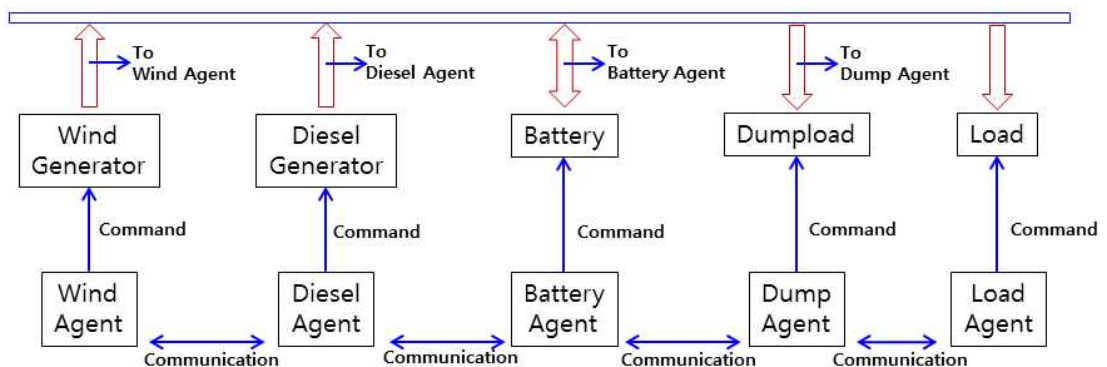


Fig. 17. Multi-agent configuration in wind hybrid power systems

제안된 시스템은 부하에서 요구전력을 추종하기 위하여 풍력발전기와 디젤 발전기, 배터리와 덤프로드의 에이전트간의 다양하고 복잡한 데이터 교환을 하게 된다. 이런 각각의 에이전트들의 동작들은 급변하는 상황이나 고장 상황에 빠르게 대처할 수 있기 때문에 민감한 부하를 갖는 시스템에서 효과적일 것이라 예상된다.

3.2.1 풍력 에이전트

풍력발전기는 풍속에 따라 동작을 하기 때문에 풍력 에이전트가 특별히 풍력 발전기의 동작 유무를 결정한다거나 동작 특성을 결정하지는 않는다. 하지만 풍력 발전기의 발전량은 풍력 복합발전 시스템의 전력품질을 유지하고 요구하는 전력량을 공급하는 데 있어서 아주 중요한 요소이다.

풍력 에이전트는 멀티에이전트 시스템을 구성하고 있는 다른 에이전트들의 출력값 모니터링을 통해 현재 부하의 요구전력량, 배터리 에이전트로부터 배터리의 상태 등 데이터를 제공 받는다. 풍력발전기의 출력 전력량이 부하 에이전트의 전력 요구량보다 부족할 경우 풍력 에이전트는 디젤 에이전트에 전력 생산이 가능한지 확인 후 디젤발전기의 발전을 요구하거나 배터리 에이전트의 상태를 체크하여 배터리가 방전이 가능한 상태임을 확인하면 배터리 에이전트에 방전을 요청한다.

반대로 풍력발전기의 발전량이 부하 요구전력량보다 높을 경우에는 풍력 에이전트는 배터리 에이전트 혹은 덤프로드 에이전트와의 상호 통신을 통해, 배터리 에이전트가 충전이 가능한 상태임이 확인되면 배터리 에이전트에 충전을 요청할 수 있고, 배터리의 상태가 충전가능한 상황이 아닐 경우(완충상태) 덤프로드 에이전트에 작동을 요청할 수 있다. 그리고 상황에 따라서 배터리의 충전과 덤프로드의 동작을 함께 요청하는 경우가 발생할 수도 있다.

3.2.2 디젤 에이전트

디젤 에이전트는 시스템의 상태를 각각의 에이전트 들이 보내주는 정보를 토대

로 모니터링 하여 디젤 발전기의 동작 유무 및 출력값을 결정해주는 역할을 수행한다. 풍력 에이전트와 부하 에이전트의 상태를 비교하고 이를 통하여 풍력발전량이 부하가 요구하는 전력량보다 많을 경우엔 디젤 에이전트는 디젤발전기의 미운전을 명령할 수 있다. 미운전 상태에도 시스템에 포함되어 있는 다른 에이전트들의 출력 상태를 모니터링 한다. 다른 에이전트들의 출력 상태를 모니터링하며 대기하고 있다가 풍력발전량이 부하가 요구하는 전력량보다 부족한 경우가 발생하게 되면 디젤 에이전트는 풍력 에이전트의 출력과 부하 에이전트의 요구 전력량의 차이를 계산하여 차이만큼 디젤발전기의 동작을 명령하여 시스템에 부족한 전력을 보충하여준다.

부족한 전력을 보충해주는 방법으로는 풍력 복합발전 시스템의 부족 전력을 정확하게 계산하여 계산된 전력량만큼 정확하게 공급해주는 방법도 있지만, 본 논문에서는 디젤발전기의 출력을 몇 개의 레벨로 맞추어 발전하도록 한다. 이는 실제 전력계통에서 원자력 발전소가 담당하고 있는 기저부하의 역할을 디젤 발전이 풍력 복합발전 시스템 내에서 담당하도록 한다.

예를 들어 30 kW 용량의 디젤발전기를 미운전, 10 kW, 20 kW 그리고 30 kW의 4단계로 나누어 운전하도록 하는 것이다. 이를 다른 방법으로 해석하면, 30 kW 용량의 디젤 발전은 10 kW 용량의 디젤발전기와 20 kW 용량의 디젤발전기 2기를 운영하여 시스템에서 요구되는 전력에 맞춰 디젤 에이전트가 적당한 디젤발전기 운전을 결정하여 동작하도록 하였다. 이 경우 시스템에서는 10 kW 용량의 디젤발전기만 운전하는 경우, 20 kW 용량의 디젤발전기만 운전하는 경우, 10 kW 용량의 디젤발전기와 20 kW 용량의 디젤발전기가 함께 동작하여 디젤발전기의 전체 출력이 30 kW가 되는 경우가 있다.

뿐만 아니라 디젤 에이전트는 시간에 따른 풍력발전기의 전력량의 예측 데이터와 부하 사용량 통계를 통하여 얻어진 부하 사용 예측 데이터를 토대로 풍력발전기의 발전량이 부하의 요구 전력량보다 부족할 경우를 대비하여 디젤발전기를 일정 출력만큼 발전을 진행할 수 있다.

3.2.3 배터리 에이전트

배터리의 충/방전 횟수 및 SOC는 배터리의 수명에 큰 영향을 주기 때문에 배터리의 오랜 사용을 위해서는 배터리 에이전트 내부에 배터리 운전전략을 안정적으로 수립하여야 한다. 배터리가 풍력 복합발전 시스템에서 동작할 때, 배터리 에이전트는 풍력 에이전트와 디젤 에이전트, 부하 에이전트의 상태를 모니터링하고 내부 매커니즘에 의해 배터리의 SOC를 판단하여 배터리의 동작 여부를 결정하게 된다. 만약 배터리의 SOC가 방전을 할 수 없는 상태라면 배터리 에이전트는 동작을 거부하게 된다. 만약 배터리의 SOC가 방전을 할 수 있는 상태라면 배터리 에이전트는 방전을 시작하여 전력망에 부족한 전력을 공급해준다.

Fig. 18은 배터리 에이전트를 Matlab/Simulink에서 제공하는 Stateflow 차트를 활용하여 구현한 모델을 보여준다. 배터리 에이전트는 풍력 에이전트의 출력 P_{ind} 값과 디젤 에이전트의 출력 P_s 값, 그리고 부하 에이전트의 값 P_{load} 의 출력값을 비교하는 간단한 구조로 구성하였고, 배터리의 SOC에 따라 배터리에 ON/OFF 명령 또는 충/방전 출력값을 결정하는 기능을 수행한다.

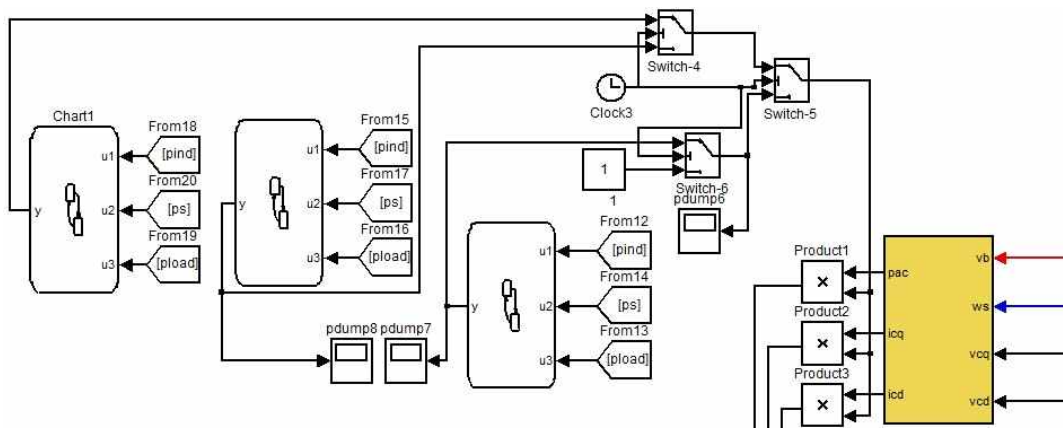


Fig. 18. Battery agent

배터리 에이전트는 풍력 에이전트, 디젤 에이전트와 부하 에이전트의 출력값을 비교하여, 풍력 복합발전 시스템의 전력 발전량이 부하량보다 너무 많으면 SOC를 확인하고 충전을 진행한다. 배터리의 SOC가 80%를 기준으로 충전속도

가 많이 늦어지므로, 본 논문에서는 SOC가 80%에 도달하면 배터리의 충전 성능을 고려하여 배터리 에이전트는 덤프로드 에이전트를 호출하고 충전해야 할 양의 일부를 덤프로드를 통해 소모하도록 한다.

배터리의 SOC가 충분하다면 방전을 진행하는데 아무런 문제가 없다. SOC가 0%가 될 때까지 일정한 출력으로 방전을 진행할 수 있지만, 일반적으로 배터리의 수명을 고려하여 SOC가 20%에 도달할 때까지 방전을 진행하도록 한다.

3.2.4 덤프로드 에이전트

덤프로드 에이전트는 풍력 에이전트와 디젤 에이전트, 부하 에이전트의 전력량 비교를 통하여 동작한다. Fig. 19는 덤프로드 에이전트 모델을 보여준다. 풍력 에이전트의 출력 P_{ind} 값과 디젤 에이전트의 출력 값 P_s 그리고 부하 에이전트의 P_{load} 값을 수신하여 Stateflow 차트로 구성된 덤프로드 에이전트에서 비교를 진행하였고, 비교된 값에 따라서 덤프로드의 동작을 결정한다.

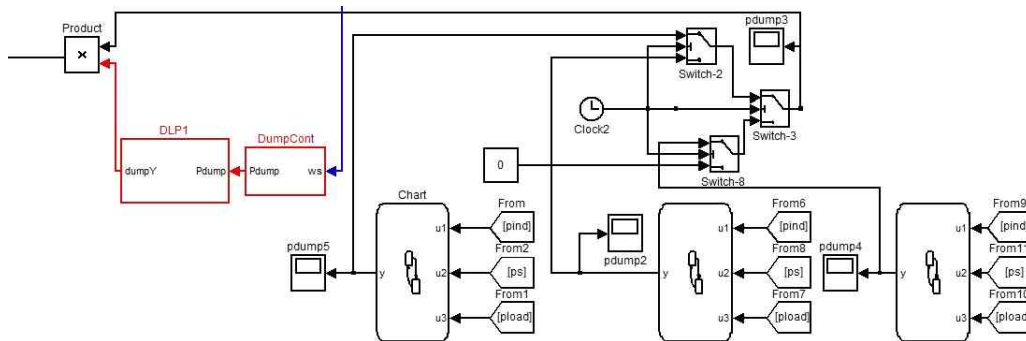


Fig. 19. Dumpload agent

덤프로드 에이전트는 비교된 값을 통하여 시스템에 남는 전력이 있다면 이를 저장장치를 통하여 열로 소비시키고 전력품질을 유지시키는 역할을 수행한다.

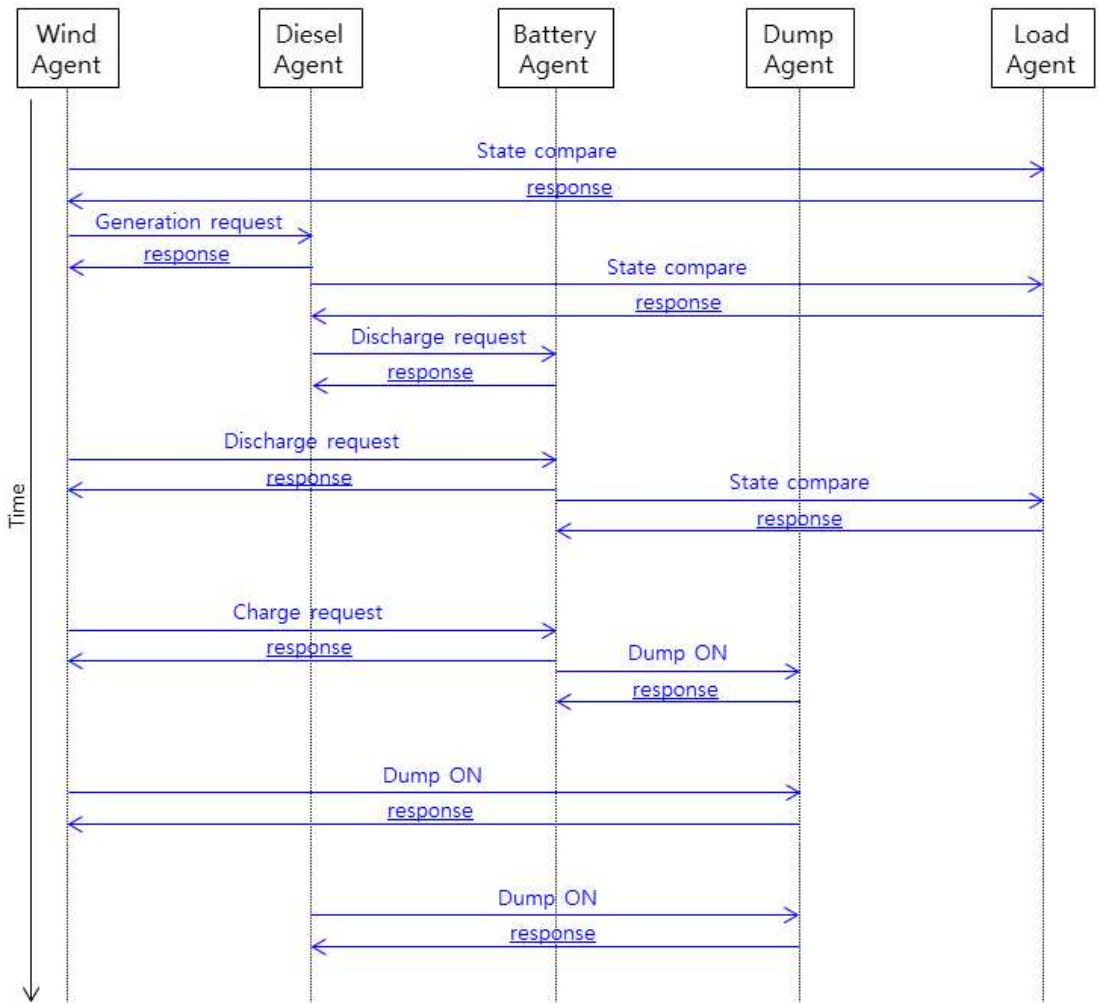
풍력 복합발전 시스템에 전력이 남는 경우 배터리와 덤프로드의 동작을 확인해보면 남는 전력은 우선적으로 배터리가 충전을 진행하여야 하지만, 배터리의 SOC가 100%일 경우 배터리가 더 이상 충전을 진행할 수 없기 때문에 덤프로드

에이전트가 이를 확인하고 덤프로드의 동작을 명령할 수 있고, 배터리의 SOC가 100%가 아니더라도 순간적으로 풍력 복합발전 시스템에 전력이 너무 많이 남는 경우 배터리의 충전만으로 이를 전부 충당할 수 없기 때문에 덤프로드 에이전트는 덤프로드의 동작을 통해 배터리가 충전을 진행하고 남는 전력을 소비시킨다.

3.2.5 풍력 복합발전 시스템의 동작특성

Fig. 20은 풍력 복합발전 시스템에서 각각의 에이전트들이 상태에 따른 동작을 나타낸다. 각 에이전트별로 상태를 비교하여 장치들의 동작을 스스로 결정한다.

풍력 에이전트는 부하 에이전트와의 전력량을 비교하여 전력의 생산량이 부족한 경우 디젤 에이전트에 전력 추가 생산을 요청하거나, 배터리 에이전트에 방전을 요청할 수 있다. 반대로 풍력 발전량이 충분할 경우 배터리 에이전트에 충전을 요청할 수도 있고, 덤프로드 에이전트에 남는 전력 소비를 요청한다. 디젤 에이전트의 경우 전력 생산량이 부족한 경우 다른 에이전트들의 요청에 의해서 단계적으로 전력을 생산한다. 배터리 에이전트의 경우 전력량이 부족하다는 요청이 들어오면 배터리의 상태를 확인한 후 가능할 경우 방전, 전력량이 남는다는 요청이 왔을 경우 충전을 진행한다. 덤프로드 에이전트는 풍력 복합발전 시스템의 전력량이 남는 경우 요청에 의해서 전력을 소비하는 역할을 담당한다. 부하 에이전트는 부하에서 필요한 전력량을 확인하여 다른 에이전트들과의 상태 비교를 한다.



Fjg. 20. The operating characteristics of multi-agent systems

Fig. 21은 멀티에이전트 시스템의 흐름도를 보여준다. Table 1은 Fig. 21의 흐름도를 바탕으로 풍력 복합발전 시스템의 다양한 상황에서 배터리의 작동상태에 따른 각각 에이전트들의 동작 상태(mode)들을 상세하게 구분하여 나타내었다.

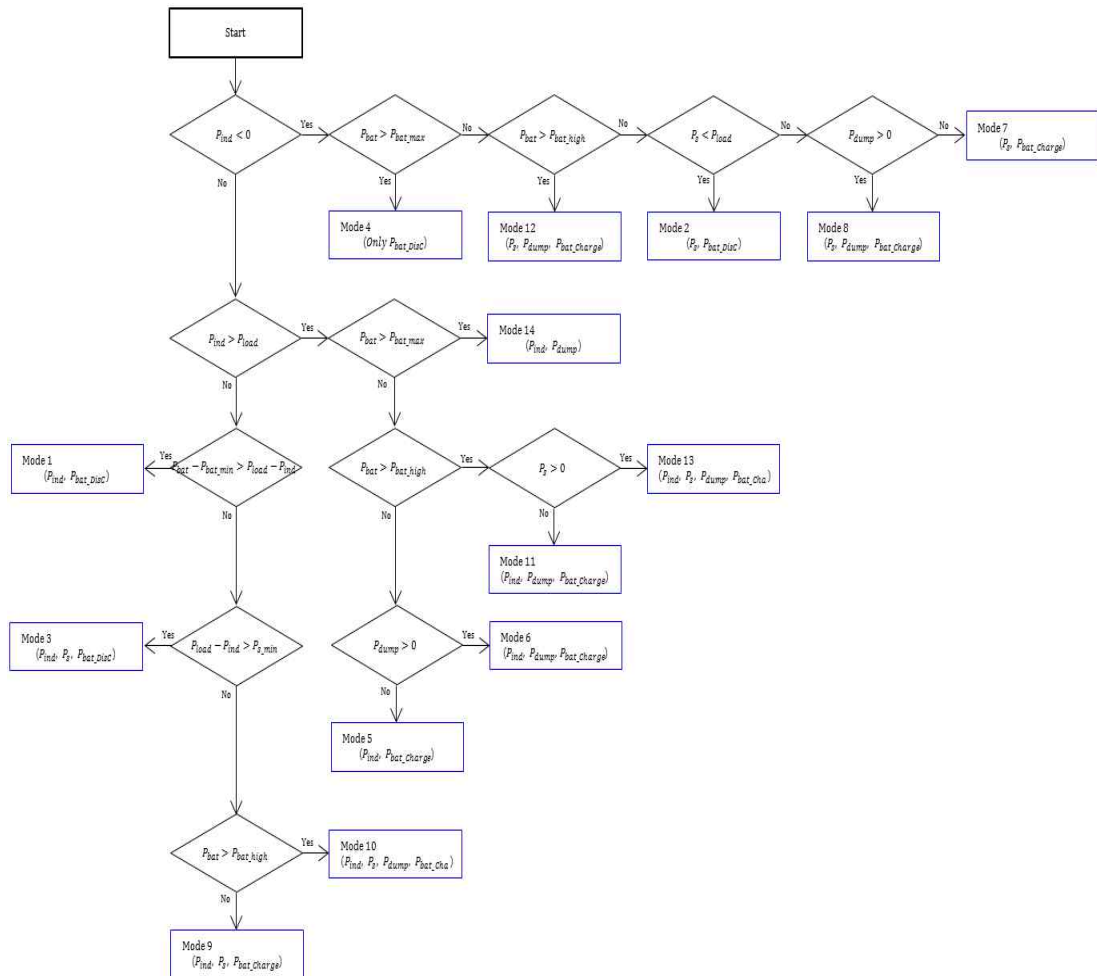


Fig. 21. The flowchart of multi-agent systems

Table 1. Operation modes in multi-agent systems

	Agent operation state		
Mode 1	Battery (Discharge)	Wind Generator	
Mode 2		Diesel Generator	
Mode 3		Wind Generator + Diesel Generator	
Mode 4		Only Battery	
Mode 5	Battery (Charge)	SOC less than 80%	Wind Generator
Mode 6			Wind Generator + Dumpload
Mode 7			Diesel Generator
Mode 8			Diesel Generator + Dumpload
Mode 9		Wind Generator + Diesel Generator	
Mode 10		Wind Generator + Diesel Generator + Dumpload	
Mode 11		SOC more than 80%	Wind Generator + Dumpload
Mode 12			Diesel Generator + Dumpload
Mode 13			Wind Generator + Diesel Generator + Dumpload
Mode 14		Battery SOC 100%	Wind Generator + Dumpload

가장 먼저 멀티에이전트 제어 시스템은 부하 에이전트를 통해 부하에서 필요한 전력량과 풍력 에이전트를 통해 풍력발전량을 확인한다. 풍력발전기가 작동하고 있지 않다면, 제어기는 다음으로 배터리의 상태를 확인하고 만약 배터리가 부하의 요구량을 처리할 수 있으면 Mode 4가 결정되고 배터리의 방전을 진행시킨다. 배터리가 부하의 요구량을 만족시키지 못할 경우에는 제어기는 디젤 에이전트, 덤프로드 에이전트 등과의 협력을 통해 Mode 2, 7, 8 또는 12 중에서 하나를 선택하고 운전시킨다. 만약 배터리의 SOC가 80% 이하에서 Mode 7의 방식으로 운전하면 배터리는 충전모드로 동작하고 있을 때, 제어기는 배터리 에이전트를 통해 SOC를 확인하고 80% 이상이 되면 Mode 12의 방식으로 운전 형태를 바꾸어

덤프로드를 동작시켜 배터리의 충전속도를 조절시킨다.

풍력 에이전트가 풍력발전을 하고 있다는 정보를 알려주면, 제어기는 풍력발전량과 시스템의 요구 부하량을 비교하여 필요한 전력량을 디젤발전, 배터리와 덤프로드를 통해 공급하게 한다.

풍력발전량이 부하 요구량 보다 더 많은 경우에, 제어기는 배터리의 SOC 상태를 확인하고 배터리와 덤프로드의 동작 모드 Mode 5, 11 또는 14를 결정한다. 풍력발전량이 요구 부하량 보다 부족할 경우에, 제어기는 풍력 에이전트와 부하 에이전트의 상호작용에 의해 시스템에 필요한 전력량을 계산한 후 배터리의 SOC 상태를 확인하고 디젤, 배터리와 덤프로드의 동작 모드 Mode 1, 3, 6, 9, 10 또는 13을 결정한다. 풍력발전량이 요구 부하량 보다 부족하고 배터리 만으로 이를 처리하지 못하는 경우에, 제어기는 우선 디젤발전기를 낮은 레벨로 동작시키고 배터리와 디젤발전기의 전력 생산량과 시스템에서 요구하는 전력량에 부하되게 생산되도록 처리한다. 이 때, 배터리의 SOC 상태에 따라 추가적으로 덤프로드를 동작시켜 빠른 시간내에 시스템을 안정적으로 운영하도록 한다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 구성

풍력 복합발전 시스템은 Matlab/Simulink 프로그램을 이용하여 모델링하였고, 전체 시스템의 구성도는 Fig. 22와 같다.

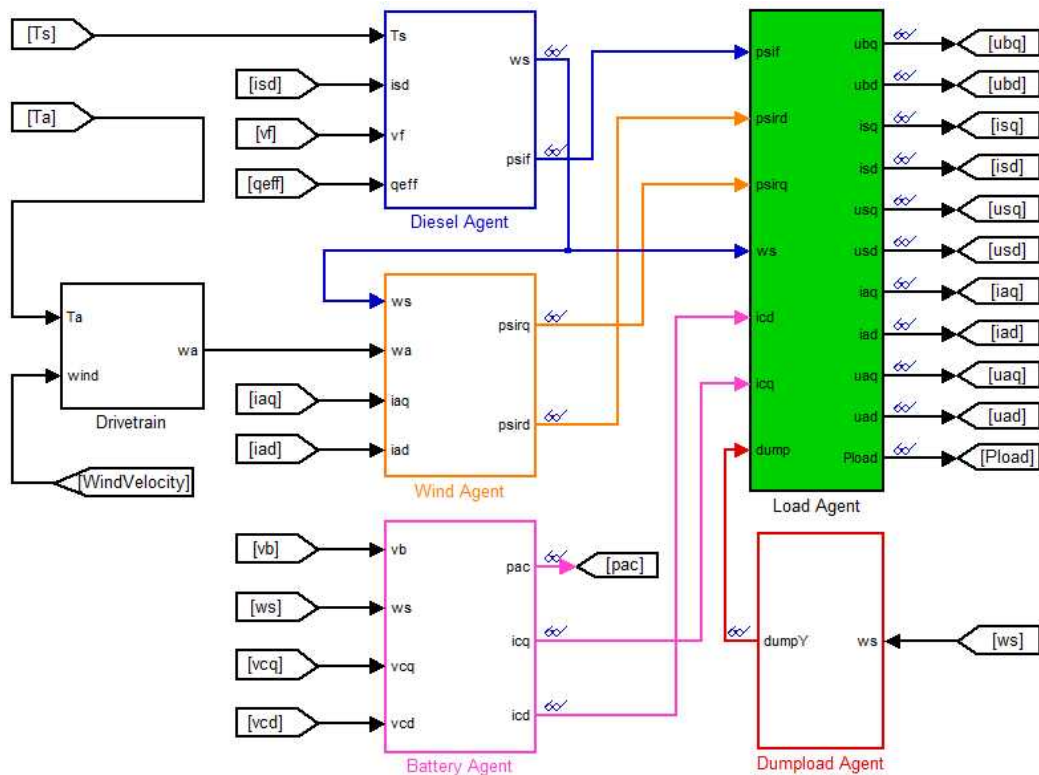


Fig. 22. Simulation configuration of wind hybrid power systems

본 시스템은 멀티에이전트 제어방법을 적용하여 풍력발전기, 디젤발전기, 배터리, 덤프로드는 AC버스에 연결되어 시스템의 동적특성을 분석하였다.

시뮬레이션에서 디젤발전기 출력을 P_s , 풍력발전기의 출력을 P_{ind} , 부하의 요구량을 P_{load} , 배터리의 출력을 P_{bat} , 덤프로드의 출력을 P_{dump} 라고 표현하였다.

시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터의 값들은 Table 2와 같다.

Table 2. System parameters

Kind	Unit	Rating
Wind Generator(Induction Generator)	kW	55
Diesel Generator(Synchronous Generator)	kW	55
Dumpload	kW	55
Battery	kWh	50
Load	kW	40
Frequency	Hz	50
AC Voltage	V	230

4.2 Case Study

시뮬레이션은 상황에 따라 각 에이전트들이 설정되어 있는 동작 모드에 맞게 잘 동작하는지 확인하기 위해 풍속이 감소하는 시나리오와 풍속이 증가하는 시나리오, 그리고 풍속이 증가했다가 감소하는 3가지 시나리오로 수행하였다.

4.2.1 Case 1. Mode 5 + Mode 9 + Mode 13 + Mode 3

Case 1에서는 풍력발전기의 발전량 변화를 위하여 Fig. 23과 같은 풍속을 가정하였고, 부하는 39 kW로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

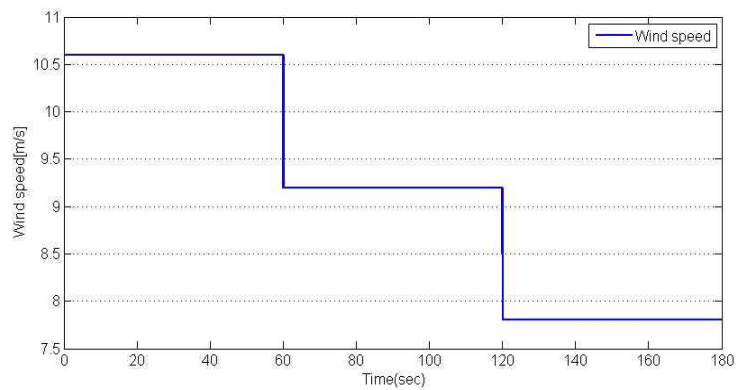


Fig. 23. Wind speed in Case 1

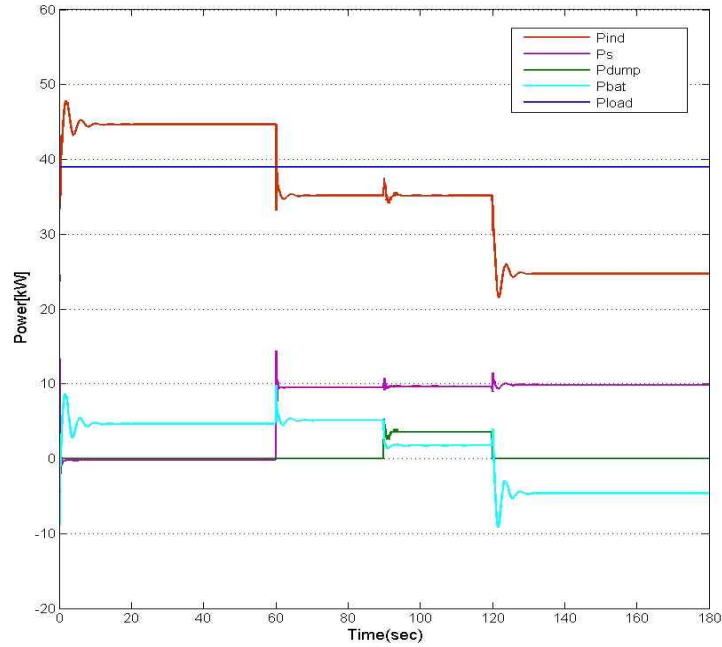


Fig. 24. Power outputs of multi-agent in Case 1

Fig. 24는 Case 1 에서 시스템이 동작할 때 에이전트별 출력과형을 나타낸다. 60초 까지는 풍력발전기의 발전량이 부하의 요구 전력량보다 많고, 배터리 에이전트를 통해 배터리의 SOC를 확인 후 배터리가 완충상태가 아니기 때문에 Mode 5 로 동작한다. 배터리가 충전모드로 동작을 하여 남은 전력 모두를 배터리의 충전하고 디젤발전기와 덤프로드는 동작하지 않음을 확인할 수 있다.

60초 부터 풍속이 감소하여 풍력발전기가 부하에 충분한 전력을 공급하지 못하기 때문에, 제어기는 낮은 레벨로 디젤발전기를 동작시켜 부족한 전력을 부하에 공급하였고, 남은 전력을 배터리를 통해 충전시키는 Mode 9로 시스템을 동작시켰다. 90초 정도에 배터리의 SOC가 80%에 도달함을 배터리 에이전트를 통해 확인한 후에, 제어기는 배터리의 충전량이 작아지는 것을 덤프로드를 동작시켜 남은 전력을 소비하는 Mode 13으로 시스템을 동작시키는 것을 확인할 수 있다.

120초에 풍속이 더 감소하여 풍력발전기의 출력량이 많이 감소하였음을 풍력 에이전트를 통해 확인한 후에, 제어기는 배터리 에이전트를 통해 배터리를 충전모드를 방전모드로 전환하여 Mode 3으로 시스템을 동작시키고 부족한 전력을 공급해

주었다.

Fig. 25는 Case 1에서 배터리 SOC를 보여준다. 90초에 배터리의 상태가 80%에 도달함에 따라 배터리의 충전량이 감소함을 확인할 수 있고, 120초에 배터리가 방전모드로 전환되어 배터리의 SOC가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

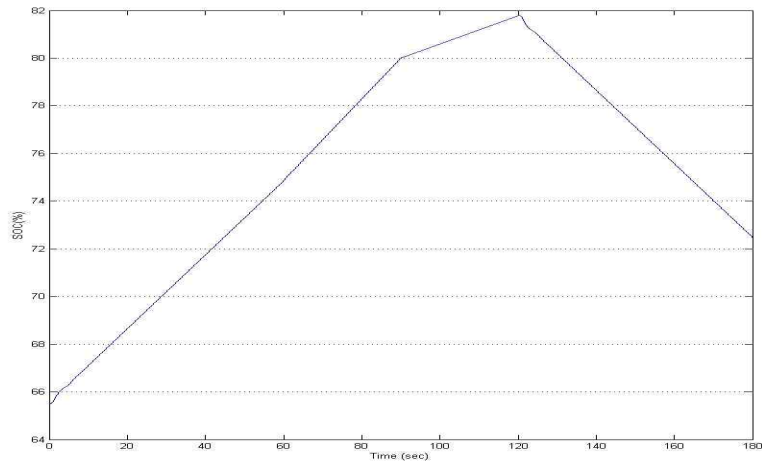


Fig. 25. SOC curve of battery in Case 1

Fig. 26에서는 Case 1에서 풍력 복합발전 시스템의 전압과 주파수 출력을 나타내었는데, 풍속이 변동되고 각 에이전트들이 동작하는 순간에는 순간적으로 전압과 주파수가 변동하였지만 전압의 안정 범위인 $230\text{ V} \pm 6\%$ 인 216.2 V에서 243.8 V 이내에서, $50\text{ Hz} \pm 1\%$ 인 49.5 Hz에서 50.5 Hz사이 안정된 주파수를 유지함을 확인할 수 있다. 그리고 빠른 시간 내에 전압과 공칭주파수가 230 V와 50 Hz로 회복됨을 알 수 있다.

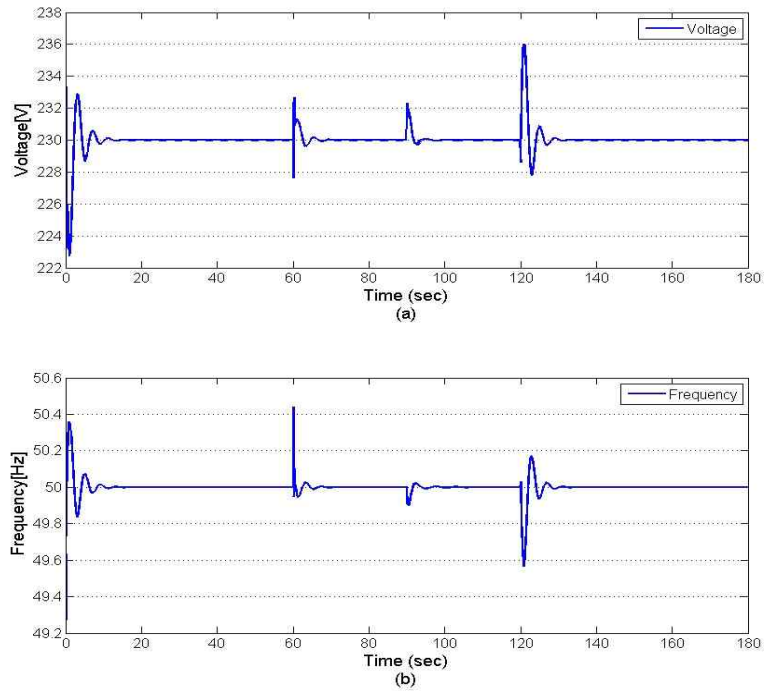


Fig. 26. Bus outputs in Case 1
(a) Voltage, (b) Frequency

4.2.2 Case 2. Mode 3 + Mode 1 + Mode 6

Case 2에서는 Fig. 27과 같이 풍속이 증가하는 상황을 가정하였고, 부하 요구 전력량은 35 kW로 일정하게 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

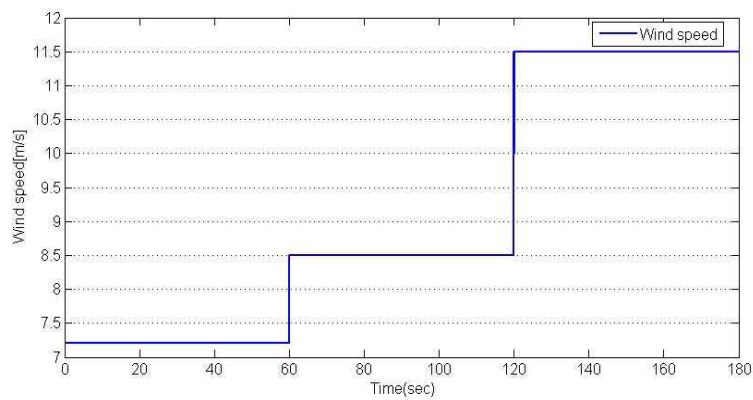


Fig. 27. Wind speed in Case 2

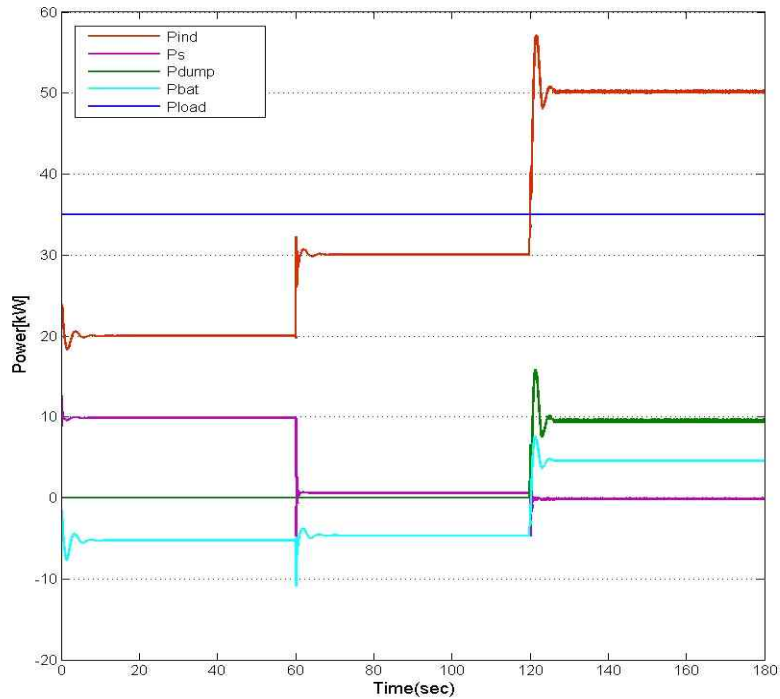


Fig. 28. Power outputs of multi-agent in Case 2

Fig. 28는 Case 2에서 에이전트별 출력 파형을 보여준다. 60초까지는 풍력발전기의 출력이 부하 요구량보다 부족하기 때문에, 제어기는 낮은 레벨로 디젤발전기를 동작시키고 배터리는 방전모드로 놓고 전력 부족분을 공급시키는 Mode 3로 시스템을 동작시켰다. 60초부터 풍속이 증가하여 풍력발전기의 출력이 커졌으므로, 제어기는 디젤발전기의 작동을 중지시키고 배터리의 방전만으로 시스템에 부족한 전력량을 전부 공급시키는 Mode 1로 시스템을 동작시킴을 확인할 수 있다. 120초 이후에 풍속의 급격한 증가에 따라 풍력발전량도 급격히 증가하였고 시스템에는 많은 전력이 남는다. 따라서 제어기는 배터리가 충전을 진행하였지만 배터리가 남는 전력을 전부 충전할 수 없기 때문에 Mode 6로 시스템을 동작시켜 배터리와 덤프로드를 통해 남는 잉여전력을 소비함을 확인할 수 있다.

Fig. 29는 Case 2에서 배터리의 SOC를 보여준다. Case 2에서 배터리는 방전모드로 동작을 하다가 120초에 풍속이 증가할 때 충전 모드로 전환되는 과정에서 다음과 같은 SOC의 변화를 확인할 수 있었다.

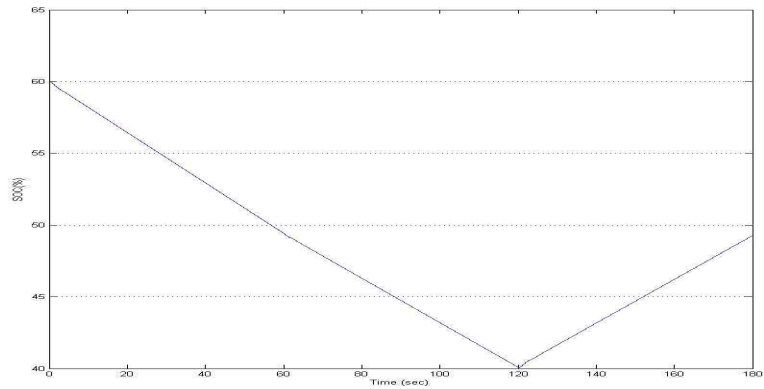


Fig. 29. SOC curve of battery in Case 2

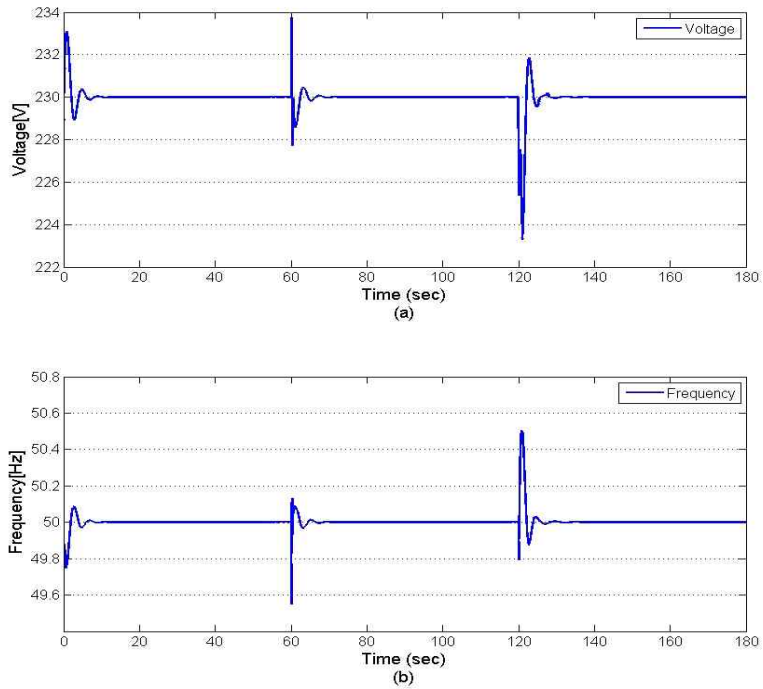


Fig. 30. Bus outputs in Case 2
(a) Voltage, (b) Frequency

Fig. 30에서 확인할 수 있듯이 Case 2에서도 Case 1과 마찬가지로 전압과 주파수가 상황이 변화할 때마다 과도현상을 거친 후 안정되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 에이전트들의 동작을 통하여 전력품질이 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

4.2.3 Case 3. Mode 3 + Mode 6 + Mode 1

Case 3에서는 Fig. 31과 같이 풍속의 변화를 증가하고 감소하고, 부하의 전력 요구량을 33 kW로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

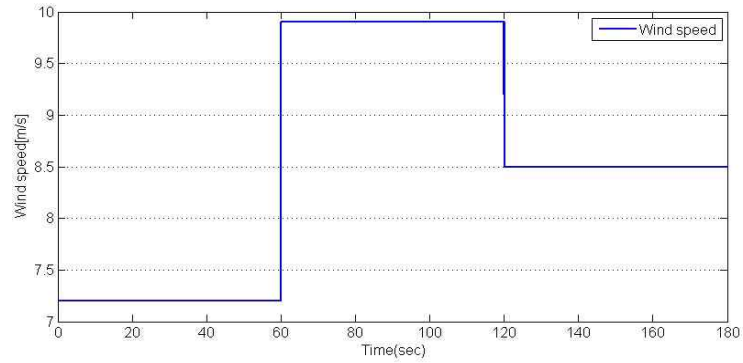


Fig. 31. Wind speed in Case 3

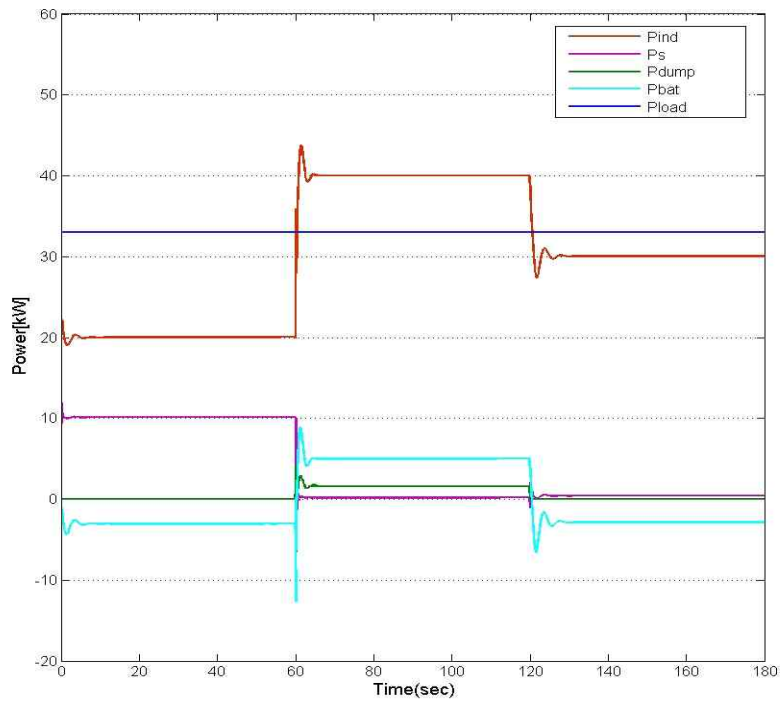


Fig. 32. Power outputs of multi-agent in Case 3

Fig. 32는 Case 3에서 각각 에이전트들의 동작 특성을 나타내었는데, 60초까지는 Case 2에서와 같이 풍력발전기의 출력이 부하 요구량보다 부족하기 때문에, 제어기는 낮은 레벨로 디젤발전기를 동작시키고 배터리는 방전모드로 놓고 전력 부족분을 공급시키는 Mode 3로 시스템을 운영됨을 확인할 수 있다.

60초부터 풍속이 아주 급격히 증가하여 풍력발전기의 출력량도 급격하게 증가함에 따라 제어기는 디젤 에이전트를 통해 디젤발전기의 동작을 중지시키고 남은 전력은 배터리를 통해 충전시키는 Mode 6으로 동작시켰다. 120초부터 풍력이 다시 감소하였으나 배터리가 부족한 전력을 전부 공급할 수 있으므로, 시스템은 Mode 1로 동작함을 확인할 수 있다.

Fig. 33은 Case 3에서 배터리의 SOC를 보여준다. Mode 3에서 배터리는 방전모드로 동작함으로 배터리의 SOC가 감소하는 것을 볼 수 있고, 60초부터 Mode 6의 동작을 통해 배터리는 충전을 진행하였고, 120초 이후 배터리는 다시 방전을 하였기 때문에 SOC가 감소함을 확인할 수 있다.

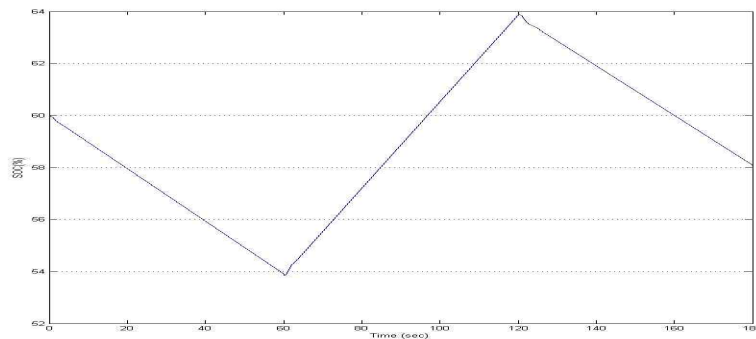


Fig. 33. SOC curve of battery in Case 3

Fig. 34는 Case 3에서 전압과 주파수를 나타내었는데, 전압은 216.2 V에서 243.8 V 사이에서, 주파수는 49.5 Hz에서 50.5 Hz 사이에 존재하여 시스템이 안정적으로 동작되는 것을 확인할 수 있다.

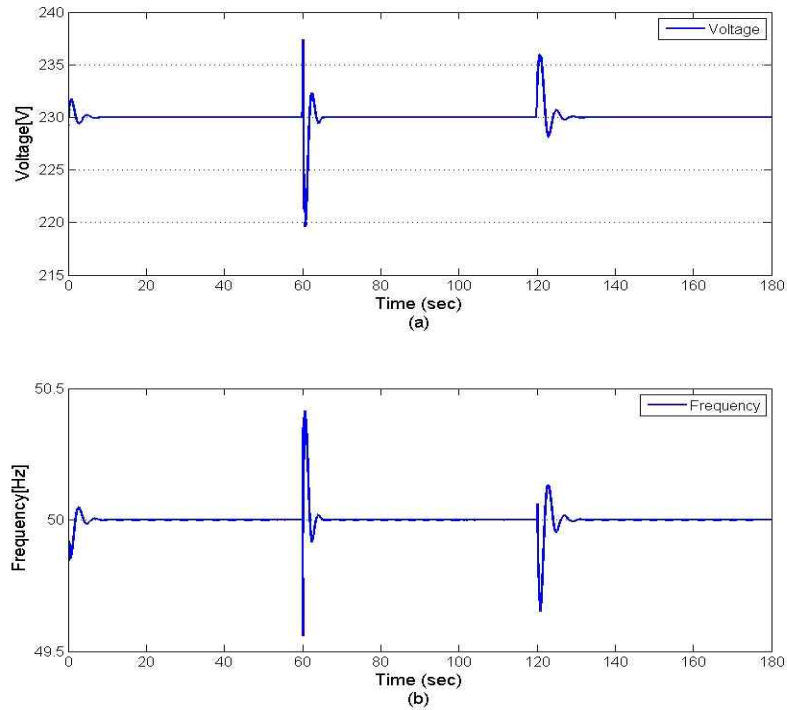


Fig. 34. Bus outputs in Case 3
(a) Voltage, (b) Frequency

4.3 시뮬레이션 분석 결과

풍력 복합발전 시스템을 대상으로 다양한 환경에서 시뮬레이션을 수행하였는데, 각각의 에이전트들이 정상적으로 동작하였고 이를 통해 멀티에이전트 제어기법이 효율적임을 확인할 수 있었다. 풍속이 감소하는 경우, 증가하는 경우, 그리고 증가하고 감소하는 경우에 시뮬레이션을 통한 전력 품질을 살펴보았는데, 전압은 안정 범위 $230\text{ V} \pm 6\%$ 인 216.2 V 에서 243.8 V 이내에서 유지됨을 확인하였고, 주파수 또한 안정하다고 할 수 있는 $50\text{ Hz} \pm 1\%$ 인 49.5 Hz 에서 50.5 Hz 사이를 항상 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

풍력 복합발전 시스템에서 핵심적인 역할을 하고 있는 배터리 에이전트는 충전과 방전을 통하여 시스템의 전력 품질을 안정적으로 유지하게 하였다. 배터리의 SOC가 80%에 도달할 경우에 느려지는 배터리의 충전 전력량은 덤프로드가

보상해 줌으로써, 시스템의 안정성 문제는 해결할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 디젤 에이전트는 디젤발전기가 몇 개의 레벨에 맞추어 전력을 공급하도록 하였으며 풍력 복합발전 시스템의 기저전력을 공급하는 역할을 충분히 수행함을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 시뮬레이션을 통한 멀티에이전트 제어 성능을 살펴보기 위해 풍속이 일정한 패턴으로 바뀌는 경우에 대하여 살펴보았다. 실제 현장에 적용하기 위해서는 아주 빠르게 변하는 실제 풍속에 적용할 수 있는 멀티에이전트 제어 방법이 필요하다. 제시한 방법에서 실제 풍속에서 동작 모드를 결정할 수 있는 운영기법이 보완되면 충분히 적용가능하리라 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 풍력 복합발전 시스템 설계를 위한 구성장치들의 모델링과 함께 다양한 상태변화에 따른 멀티에이전트 기반의 관리시스템의 통합운영기법을 제안하였다. 다양한 구성요소들의 동작 평가를 위하여 풍력발전기, 디젤발전기, 배터리, 덤프로드를 적용한 복합발전 시스템 구조로 모델링을 진행하였으며, 멀티에이전트 기반의 관리 시스템은 각각의 구성요소의 상태에 따라 시스템에서 전력의 균형을 유지시킬 수 있도록 설계하였다.

제안된 시스템의 시뮬레이션을 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 구성요소들을 모델링 하였으며 멀티에이전트 시스템은 Simulink에 포함된 Stateflow 차트를 이용하여 설계하였다. 풍력 복합발전 시스템에 대한 시뮬레이션에서 디젤 에이전트와 풍력 에이전트 출력과 부하의 요구량의 차이를 배터리 에이전트와 덤프로드 에이전트가 적절한 동작을 수행하여 전압과 주파수가 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

제안된 각각의 에이전트들의 동작들은 급변 상황이나 장치들의 고장 등에 빠르게 대처할 수 있기 때문에 민감한 부하를 갖는 시스템에서 효과적인 통합 운영기법을 설계할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 향후 풍속의 변화, 부하의 갑작스러운 변화 등의 환경조건을 좀 더 다양한 운전조건에 대한 시뮬레이션을 수행하게 되면, 부하 예측 시스템과 태양광 발전기 등의 신재생에너지와 연계된 다양한 에너지 저장시스템이 추가된 복잡한 시스템에서도 안정적인 시스템 운전이 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 안윤기, “남아공 더반 기후변화협약 당사국 총회 협상 결과 및 시사점”, 포스코경영연구소. Issue & Trend, 2012.
- [2] D. S. Lee, J. S. Park, H. Y. Shin, Y. J. Choi., H. J. Lee., and J. H. Choi, “Microgrid village design with renewable energy resources and its economic feasibility evaluation,” IEEE T&D Asia, 2009.
- [3] 국토환경정보센터 알림마당 (<http://www.neins.go.kr>)
- [4] 이보배, 전력수요 예측을 이용한 가파도 신재생에너지 발전설비 조성방안 연구, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 2012.
- [5] H. S. Ko and J. Juri, “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.
- [6] 정일엽, “마이크로그리드의 제어 및 에너지관리 기술동향”, 전기의 세계, 제 57권 제10호, pp. 35-42, 2008.
- [7] 조재훈, 신재생에너지를 포함하는 마이크로그리드시스템의 통합운영기법 연구, 충북대학교 대학원 박사학위논문, 2011.
- [8] 조영호, 풍력-디젤 복합발전 시스템의 모델링 및 특성해석, 충북대학교 대학원 석사학위논문, 2011.
- [9] L. L. Feris, Wind Energy Conversion System, Prentice Hall, UK, 1990.
- [10] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, Analysis of Electrical Machinery, New York: McGraw-Hill, 1986.
- [11] 한상석, 한석후, 이창구 “분산전원의 계통연계를 위한 디젤발전기의 부하 변동에 따른 제어기 개발연구”, 조명전기설비학회논문지, 제22권 제5호, pp. 53-57, 2008.
- [12] G. Elliot, R. Hunter, Wind-Diesel Systems, Cambridge University Press, 1993.
- [13] International Electrotechnical Commission, Publication 34-10, Rotating

- electrical machines, Part 10 : Conventions for description of synchronous machines, Geneve, 1975.
- [14] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, and G. C. Verghese, Principles of Power Electronics, New York: Addison-Wesley Publishing, 1992.
- [15] 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.
- [16] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [17] S. J. Chapman, Electric Machinery and Power System Fundamentals, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [18] H. S. Ko, K. Y. Lee, H. C. Kim, "Intelligent controller design for a remote wind-diesel power system : design and dynamic performance analysis," Wind Power Systems(eds), pp. 297-335, Springer, 2010.
- [19] 강현구, Multi-agent system을 이용한 배전계통의 전압 제어와 고조차 보상방법에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 2013.
- [20] S. D. J. McArthur, E. M. Davidson, V. M. Catterson, A. L. Dimeas, N. D. Hatziargyriou, F. Ponci, and T. Funabashi, "Multi-agent systems for power engineering applications; 142 Part I: concepts, approaches, and technical challenges," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1743 - 1752, 2007.
- [21] S. Russel and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [22] M. Wooldridge, An Introduction to Multi Agent Systems, John Wiley and Sons, 2009.