

# 빠른 응답성을 갖는 가변속 DFIM 분석

손금뢰<sup>1</sup>, 서정진<sup>1</sup>, 차한주<sup>†</sup>

## Analysis of Doubly Fed Variable-Speed Pumped Storage Hydropower Plant for Fast Response

Jinlei Sun<sup>1</sup>, Joungjin Seo<sup>1</sup>, and Hanju Cha<sup>†</sup>

### Abstract

A pumped storage power station is an important means to solve the problem of peak load regulation and ensures the safety of power grid operation. The doubly fed variable-speed pumped storage (DFVSPS) system adopts a doubly fed induction machine (DFIM) to replace the synchronous machine used in traditional pumped storage. The stator of DFIM is connected to the power grid, and the three-phase excitation windings are symmetrically distributed on the rotor. Excitation current is supplied by the converter. The active and reactive power of the unit can be quickly adjusted by adjusting the amplitude, frequency, and phase of the rotor-side voltage or current through the converter. Compared with a conventional pumped storage hydropower station (C-PSH), DFVSPS power stations have various operating modes and frequent start-up and shutdown. This study introduces the structure and principle of the DFVSPS unit. Mathematical models of the unit, including a model of DFIM, a model of the pump-turbine, and a model of the converter and its control, are established. Fast power control strategies are proposed for the unit model. A 300 MW model of the DFVSPS unit is established in MATLAB/Simulink, and the response characteristics in generating mode are examined.

**Key words:** DFVSPS(Doubly Fed Variable-Speed Pumped Storage), DFIM(Doubly Fed Induction Machine), Vector control, C-PSH(Conventional Pumped Storage Hydropower stations), Power model

### 1. 서 론

오늘날 전력계통에 대규모 신재생 에너지를 연결됨에 따라 양수저장장치의 피크 조절 및 주파수 조절 기능을 발휘하기 위해서는 빠른 전력 응답속도가 필요하다. 가변속 양수저장장치(Doubly Fed Variable-Speed Pumped Storage, DFVSPS)는 이중여자 유도발전기(Doubly Fed Induction Machine, DFIM)를 사용하여 기존의 고정속 양수저장장치가 속도를 조절할 수 없는 단점을 극복하

여 최근 적용이 증가하고 있다.

DFVSPS는 계통의 부하 주파수를 효과적으로 제어하고 신재생 에너지원으로 인한 주파수 변동의 균형을 유지하여 전력계통에 유연성자원으로 동작한다. 따라서 가역식 펌프-터빈의 부하 특성과 결합하여 DFVSPS에 대한 연구를 수행하여 양수발전소의 전력 응답률을 개선하고 주파수 조절 능력을 발휘하는 것은 의미가 있다. 현재 대부분의 국외 DFVSPS에 대한 연구는 시스템 모델링 및 운전 특성 분석에 중점을 두고 있다. Li와 Hedman<sup>[1]</sup>은 기존의 C-PSH와 DFVSPS를 연구했으며 DFVSPS가 전력 시스템의 재생 가능한 불확실성의 균형을 맞추는 데 기존의 양수식저장장치보다 더 효과적이라는 것을 보여주었다. Nasiretal<sup>[2]</sup>는 DFVSPS의 제어 모델을 확립하고 유효 및 무효전력 제어의 타당성을 입증했다. Bocquel과 Janning<sup>[3]</sup>은 300MW의 DFIM이 독일의 양수 저장 발전소에서 성공적으로 사용되었음을 보여 주었다. 국내 연구는 DFVSPS 장치의 전력변동 응답성, 제어 전략, 펌프-터빈 모델링 및 특성 연구는 이루어지지 않았다<sup>[4]</sup>.

Paper number: TKPE-2022-27-5-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea  
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

Manuscript received Jan. 14, 2022; revised Feb. 22, 2022; accepted May. 23, 2022

- 본 논문은 2021년 추계학술대회 우수논문상 수상논문임

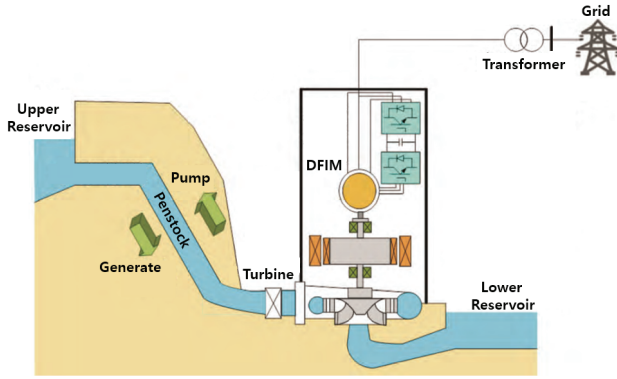


Fig. 1. Structure of a pumped storage power plant.

본 논문에서는 터빈, 조속기 및 펜스톡 시스템 모델, DFIM 및 여자 제어 시스템 모델을 포함하여 가변속 양수저장 장치의 각 부분에 대한 수학적 모델을 먼저 도출한 다음 MATLAB/Simulink로 모델링 및 시뮬레이션하고 시뮬레이션 결과를 일본 오카와치(Ohkawachi) 300MW DFVSPS의 동적 응답과 비교하여 DFVSPS 모델의 정확성을 확인한다.

## 2. DFVSPS의 구조 및 수학적 모델

그림 1과 같이 DFVSPS는 가역식 펌프-터빈, DFIM, 전력변환기 및 제어 부분으로 구성된다. 펌프-터빈은 동력을 원동기 또는 부하로 제공하거나 소비한다. DFIM의 고정자는 기존의 돌극형 동기기의 고정자와 동일하나 회전자는 대칭적인 3상 권선 구조이며, 이는 전력변환기를 통해 계통에 연결되어 계통과 전력을 교환한다. 회전자에 출력되는 전압 또는 전류의 진폭, 주파수 및 위상은 전력변환기인 AC 여자에 의해 제어된다.

DFVSPS의 구조는 그림 2와 같다. GSC(Grid Side Converter)는 계통측 전력변환기, MSC(Machine Side Converter)는 발전기측 전력변환기,  $U_{dc}$ 는 컨버터의 직류 버스 전압이다. 펌프-터빈과 DFIM는 회전축을 통해 수직으로 연결되어 기계적 동력을 전달한다.

DFIM 고정자는 계통에 직접 연결되고 회전자는 전압원 변환기를 통해 계통에 연결된다. 회전자 측의 여자 전류를 조정함으로써 장치의 가변속도 및 일정한 주파수 작동을 실현할 수 있다.

DFIM의 회전자 권선에 3상 교류 전류가 흐르면 회전자 주위에 회전자계가 발생하며 회전자에 대한 회전자계의 회전속도를  $\omega_2$ 라 하면 DFIM의 회전자 샤프트의 속도는  $\omega_r$ 이고 고정자 자계의 회전 속도가  $\omega_1$ 이면 세 가지 양은 식 (1)에 표시된 관계를 충족한다.

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_r \tag{1}$$

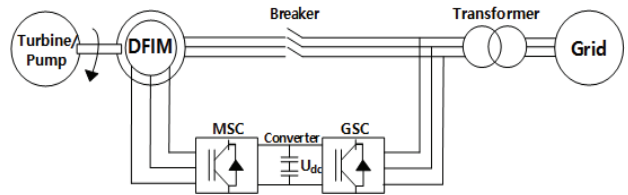


Fig. 2. Structure diagram of the DFVSPS.

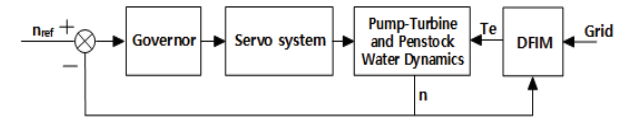


Fig. 3. Schematic diagram of pump-turbine regulating system.

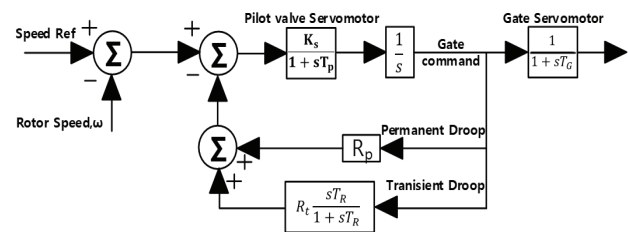


Fig. 4. Hydraulic speed governor dynamic model.

$\omega_1$ 이 동기 속도이고 일정하게 유지되므로  $\omega_r$ 의 제어를 실현하기 위해  $\omega_2$ 을 조정하면 속도를 변경하는 목적을 달성할 수 있다.

### 2.1 가역 펌프-터빈 모델

펌프-터빈 조절 시스템은 주로 조속기, 서보 시스템, DFIM, 펌프-터빈 및 펜스톡 시스템으로 구성되며 각 부분의 연결은 그림 3과 같다.  $n$ 은 DFVSPS의 단위 속도,  $n_{ref}$ 는 DFVSPS 단위 속도 지령치.  $T_e$ 는 전자기 토크이다.

### 2.2 조속기 모델

수력 발전소에 채용된 조속기는 속도 감지, 영구적인 드롭(Permanent droop), 피드백 및 컴퓨팅 기능의 구성요소를 통해 달성되며, 더 높은 출력은 유압 구성요소를 통해 달성된다<sup>[5]</sup>.

과도 드롭(Transient droop)에서  $R_T$ 은 레버 비율(Lever ratio)에 의해 결정되고 리셋 또는 위시아웃 시간(Reset time)  $T_R$ 는 니들 밸브 설정에 의해 결정된다. 유압 게이트 서보 시스템이 있는 조속기의 동적 모델은 그림 4에 나타난다. 게이트 위치의 변화는 초기 터빈 동력 변화가 추구하는 것과 반대로 동작하는 우반면 영점(Right half plane zero) 특성을 갖는다. 안정적인 제어 성능을 얻기 위해서는 긴 리셋 시간과 함께 큰 과도 드롭이 필요하며, 이는 속도 피드백 또는 과도 이득 감소 보상을 통해 달성된다.

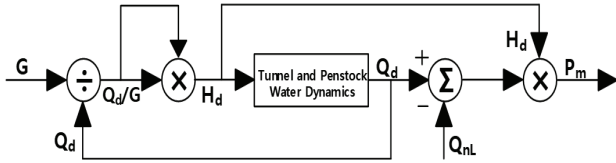


Fig. 5. Simplified nonlinear turbine model.

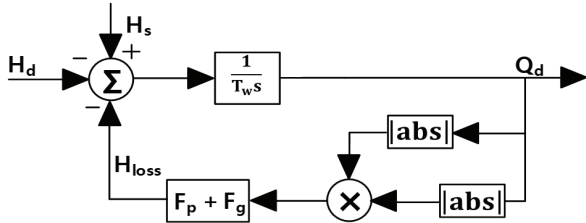


Fig. 6. Rigid water dynamics for a separate tunnel-penstock.

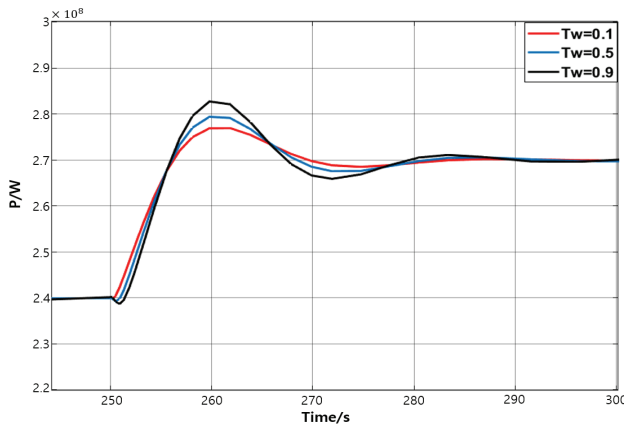


Fig. 7. Influence of parameter  $T_w$  on the output power of the unit to the power grid.

### 2.3 터빈 모델

가역 펌프-터빈 장치가 터빈 모드에서 작동할 때 일반 수력터빈과 동일하다. 터빈 입구 양정( $H_d$ ), 터빈 유량( $Q_d$ ) 및 게이트 개방( $G$ )의 관계는 식(2)과 같다.

$$H_d = \left(\frac{Q_d}{G}\right)^2 \quad (2)$$

여기서  $H_d$ 는 펌프 터빈의 입력이고  $Q_d$ 는 터빈의 출력이다. 단위 출력전력은

$$P_m = H_d(Q_d - Q_{nl}) \quad (3)$$

여기서  $Q_{nl}$ 는 무부하 유량이다. 터빈 모드의 가역식 펌프-터빈 장치의 블록도는 그림 5에 나타나며,  $G$ 는 속도 조속기 출력에서 나온다.

펜스톡 시스템에는 두 가지 유형의 손실이 있으며, 마찰 양정 손실( $H_{loss}$ )과 무부하 유량 손실( $Q_{nl}$ )이다. 펜스톡의 스톨링 효과의 영향으로 인해 터빈의 마찰 계수

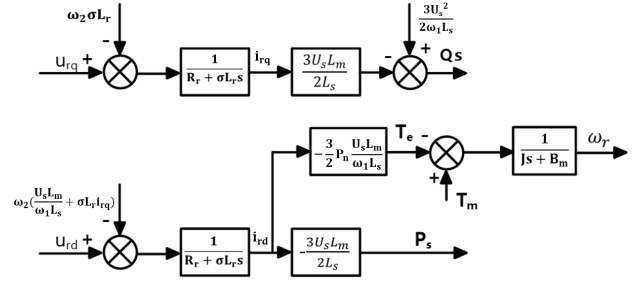


Fig. 8. DFIM block diagram based on stator voltage orientation.

는 파이프라인 마찰 계수  $F_p$ 와 추가 마찰 계수  $F_g$ 의 합과 동일하며,  $H_{loss}$ 는 식 (4)로 표현된다.

$$H_{loss} = (F_p + F_g) \cdot Q_d^2 \quad (4)$$

추가 마찰 손실이 있는 펜스톡의 블록도는 그림 6에 나타난다. 물의 흐름관성 시정수  $T_w$ 는 펜스톡의 물 흐름이 정격 양정의 작용에 따라 0에서 정격 흐름  $Q_d$ 로 증가하는 데 필요한 시간을 나타내며 펜스톡의 물 흐름관성의 크기를 나타낸다.

그림 7은 물의 흐름관성 시정수  $T_w$ 을 변경하고 계통 출력전력 지령을 240MW에서 270MW로 증가시켰을 때 터빈의 계통출력전력 파형이다. 물 흐름관성 시정수  $T_w$ 가 클수록 출력전력의 오버슈트와 진동성향이 증가함을 보여준다.

### 2.4 DFIM 모델

DFIM 모델은 3상의 정지 좌표계에서 회전 좌표계 모델로 변환하며, 고정자 자속기준 벡터제어를 사용하면 고정자의 유효전력과 무효전력은 식 (5)을 도출한다<sup>[6]</sup>.

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_{sq} + u_{sd}i_{sd}) = -\frac{3}{2}\frac{L_m U_s}{L_s}i_{rd} \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) = \frac{3}{2}U_s\left(\frac{U_s}{L_s\omega_1} - \frac{L_m}{L_s}i_{rq}\right)$$

식 (5)을 보면 고정자 축의 유효전력은 회전자 축 전류 d축 성분의 영향을 받는 반면, 고정자 축의 무효전력은 회전자 q축 성분의 영향을 받으며, 전자기 토크는 식 (6)과 같다.

$$T_e = -\frac{3}{2}p_n \frac{U_s L_m}{\omega_1 L_s} i_{rd} \quad (6)$$

DFIM의 전자기 토크는 회전자 축 전류의 d축 성분과 관련이 있으며, 회전자 축 전류를 제어하면 전자기 토크를 제어할 수 있다. dq 회전 좌표계 기반 하의 DFIM 모델은 그림 8에 나타난다.

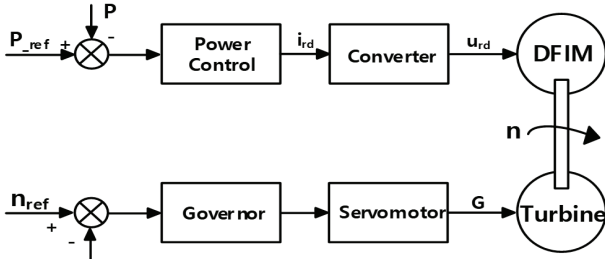


Fig. 9. Fast power control strategy.

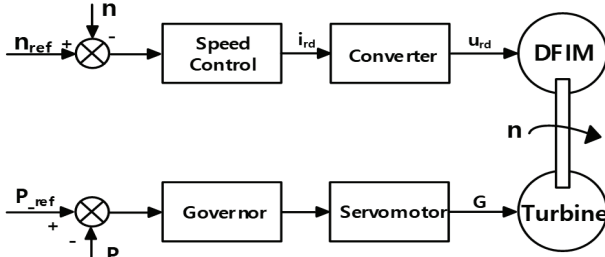


Fig. 10. Fast speed control strategy.

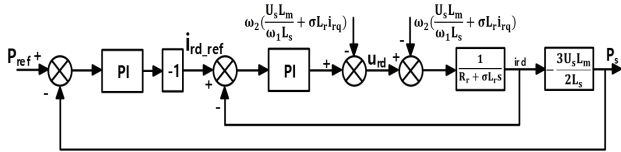


Fig. 11. Power control block diagram of fast power control strategy.

### 3. DFVSPS의 제어전략

DFVSPS 장치는 전력변환기를 통해 발전기 여자제어를 수행할 수 있으며 발전기는 비동기 속도로 실행할 수 있으므로 속도를 가변할 수 있다. DFVSPS에서 전력 및 속도 제어는 다음 두 가지 방법으로 달성된다. 첫 번째는 그림 9와 같이 빠른 전력제어 전략으로 전력은 컨버터에 의해 제어되고 속도는 조속기에 의해 제어된다. 두 번째는 그림 10과 같이 빠른 속도제어 전략으로 속도는 컨버터에 의해 제어되고 전력은 조속기에 의해 제어된다.

발전 모드에서 터빈의 전력은 게이트의 개방에 의한 기계적인 방법이나 컨버터를 통한 전기적인 방법으로 제어할 수 있으며 본 논문에서는 발전 모드에서 첫 번째의 빠른 전력제어 전략을 채택하여 계통 출력전력의 응답성을 빠르게 한다.

유효전력 제어 블록도는 그림 11에 나타나며, 300MW 이중여지유도전동기의 매개 변수는 표 I에 나타난다.

### 4. 시뮬레이션 분석

DFVSPS의 제어 방식과 각 부분의 수학적 모델에 따라 MATLAB/Simulink를 이용하여 발전모드의 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션 모델링은 그림 12에 나와

TABLE I  
PARAMETERS OF DFIM

Parameters	Value
rated power	300 MW
rated voltage	18 KV
frequency	50 Hz
stator resistance $R_s$	0.00103 $\Omega$
stator inductance $L_s$	0.000194 H
rotor resistance $R_r$	0.00065 $\Omega$
rotor inductance $L_r$	0.000267 H
mutual inductance $L_m$	0.00567 H
inertia $J$	4,000,000 $k_g m^2$
pole pairs $P_n$	12

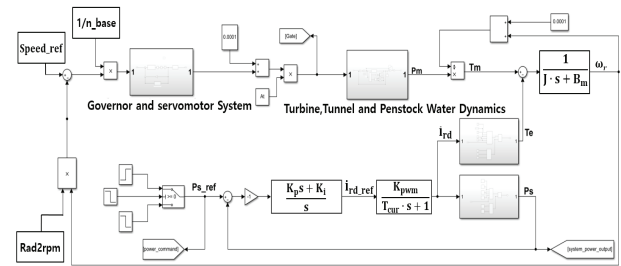


Fig. 12. Models of Turbine and DFIM Control Systems.

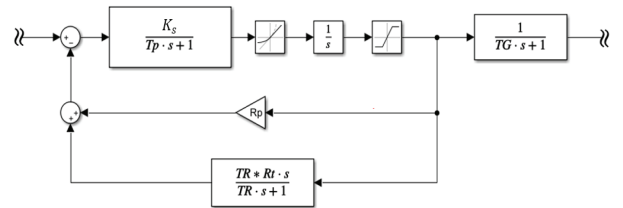


Fig. 13. Governor and servomotor system model.

TABLE II  
PARAMETERS OF TURBINE, GOVERNOR AND PENSTOCK SYSTEM

parameters	Value
servo gain	$K_s=5$
pilot value and servomotor time constant	$T_p=0.05$
permanent droop	$R_p=0.05$
temporary droop	$R_t=0.593$
reset time	$T_R=2.625$
main servo time constant	$T_G=0.07$
turbine gain	$A_t=1.136$
initial steady-state value of H	$H_s=1$
penstock frictional coefficient	$F_p=0.01$
tunnel respectively	$F_g=0.01$
water starting time	$T_w=0.5$
Power Control PI gains	$K_p=0.00005$
Power Control PI gains	$K_i=0.0005$

있으며, 터빈, 조속기 및 수로 터널-펜스톡의 매개 변수

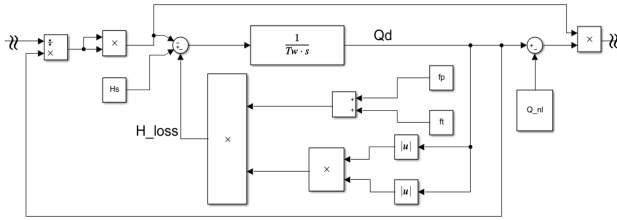


Fig. 14. Turbine, tunnel and penstock water dynamics model.

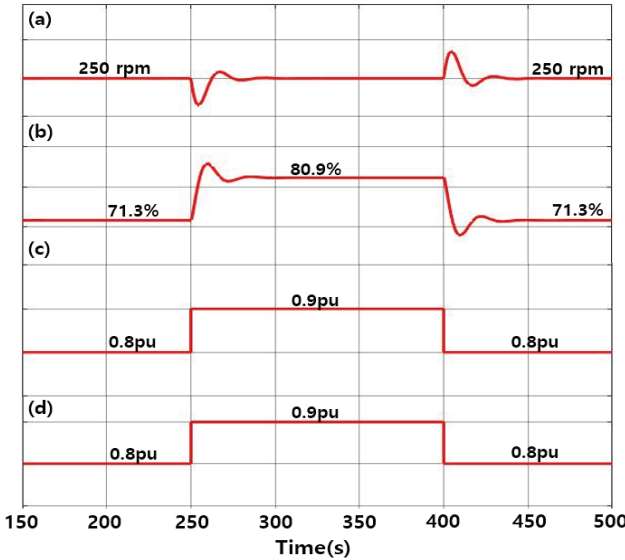


Fig. 15. Simulation waveforms in the generating mode. (a) Speed response (b) Guide vane opening response (c) Power command (d) Power response.

는 표 II에 나타난다. 시뮬레이션 모델의 조속기 모델은 그림 13에, 터빈, 터널 및 펜스톡 모델은 그림 14에 나타난다.

그림 15는 발전모드에서의 시뮬레이션 결과를 보여준다. DFVSPS의 속도 응답은 그림 15 (a)에서 보듯이 속도는 250 rpm에서 안정적으로 유지되며, 250초와 400초에 전력 변동에 의한 속도 변동이 발생하지만 조속기에 의해 복구된다. 게이트 개방 응답은 그림 15 (b)에 나타나며 게이트 개방은 발전기 명령의 증감에 따라 개방이 증감한다. 그림 15(c)는 전력 지령치이며, 0.8 pu 발전 중에 250 초에 0.1 pu 상승 명령, 400초에 0.1 pu 하강 명령으로 구성된다. DFVSPS의 전력 응답은 그림 15(d)에서 전력 명령치를 잘 추종함을 보여준다.

그림 16의 확대 파형은 전력의 스텝 명령에 대해 계통전력이 0.2초 이내로 빠르게 응답함을 보여주며, 계통 전력 하강의 응답성도 동일하다.

그림 17은 오카와치 가변속 양수발전소의 실제 운전 중 전력 시스템의 동적 응답이다. 시스템 전력 출력이 발전모드에서 0.1 pu를 증감함에 따라 계통전력의 응답성은 0.2초 이내에 증감함을 보여준다<sup>[7]</sup>.

그림 15와 그림 17을 비교하면 발전모드의 시뮬레이

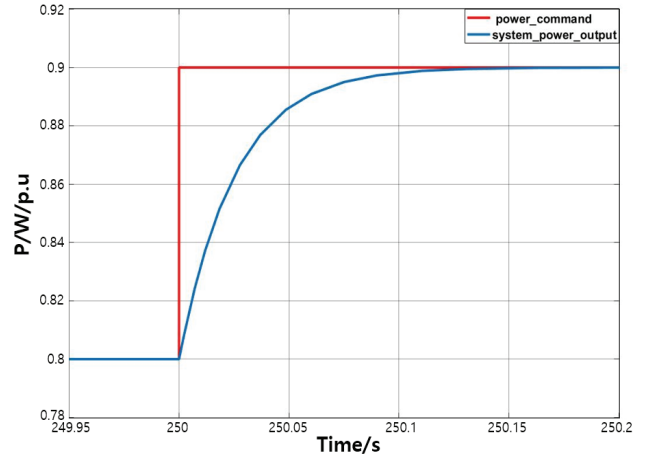


Fig. 16. Expanded power response.

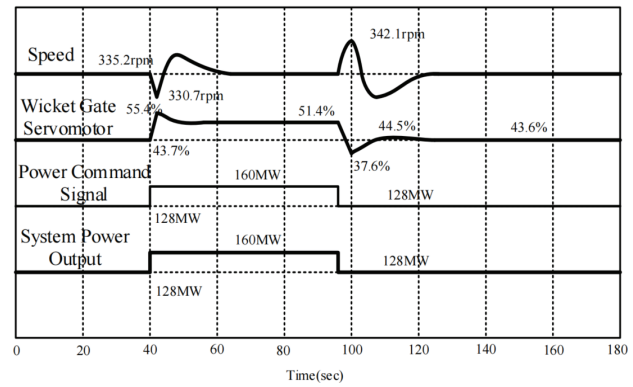


Fig. 17. Actual dynamic responses for Ohkawachi hydro stoarge plant in generating mode.

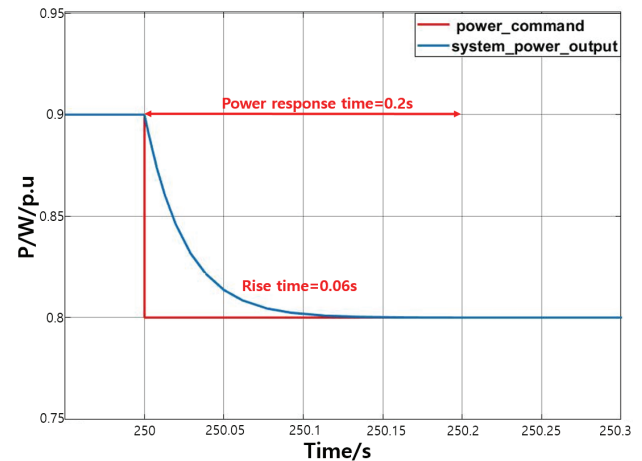


Fig. 18. Response waveform of the fast power control to the step signal.

션 파형이 실제 파형과 유사함을 알 수 있어 본 논문에서 DFIM기반 가변속 양수발전 모델링의 정확성을 보여준다.

다음은 가변속 양수발전에서 사용되는 빠른 전력제어와 빠른 속도 제어를 비교한다. 빠른 전력제어에서 계통 출력전력은 전력 지령의 변화를 빠르게 추종할 수 있으



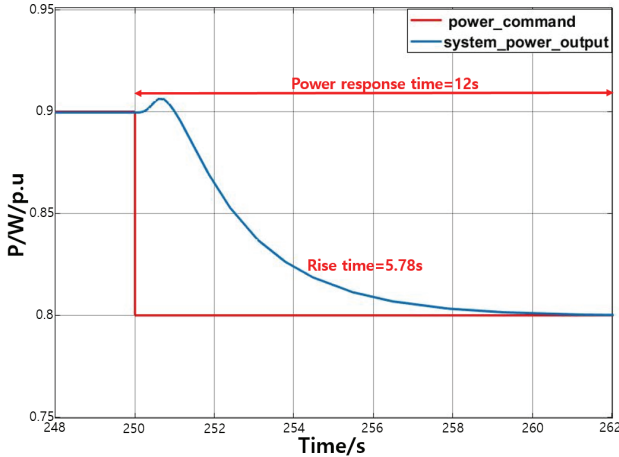


Fig. 19. Response waveform of the fast speed control to the step signal.

므로 그림 18과 같이 약 0.2초의 응답성을 보여준다.

반면에 빠른 속도제어 전략에서는 그림 19와 같이 전력리듬값의 변경으로 인해 터빈의 게이트 배인을 조정하므로 약 12초의 응답성을 보여준다.

따라서 빠른 속도 제어 전략은 조속기와 게이트, 펜스톡의 동작 속도가 상대적으로 느리기 때문에 유량 조정과 전력 조정에 대한 응답시간이 길어지고 전력의 조정시간에 수십 초가 걸리게 된다. 그러나 터빈의 출력전력이 변경됨에 따라 불균형 토크 및 샤프트 조건에서 회전 속도가 변경되거나 DFIM의 컨버터 조정을 통해 속도를 빠르게 조정할 수 있다.

### 5. 결 론

본문에서는 DFVSPS의 모델과 제어 전략을 연구했다. 먼저, 양수발전소의 주요 구성요소의 특성에 따라 조속기 모델, 서보 시스템 모델, 펜스톡 모델 및 펌프-터빈 모델을 포함하는 펌프-터빈 시스템의 수학적 모델을 설정했다. 고정자 자속 회전자표계에서 DFIM의 수학적 모델을 적용하여 DFIM의 전력 흐름을 분석하고 전력 디커플링 벡터 제어 방법을 설정했다. 둘째, 빠른 전력 제어 전략을 채용하고 빠른 속도제어 전략과 잔력 응답성을 비교 분석하였다. 마지막으로, 구축된 모델에 따라 MATLAB/Simulink에서 300MW 가변속 양수발전소의 시뮬레이션 모델을 구축하고, 제안된 제어 전략을 기반으로 발전소를 시뮬레이션하여 제어 전략의 타당성을 검증하고 연구하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20209810300140)

### References

- [1] Li N, Hedman K.W., "Evaluation of the adjustable-speed pumped hydro storage in systems with renewable resources," 2016 IEEE/ PES Transmission and Distribution Conf. Exposition, Dallas, TX, pp. 1 - 5, 2016.
- [2] Nasir U, Iqbal Z, Rasheed M.T, ET AL., "Active and reactive power control of a variable speed pumped storage system." 2015 IEEE 15<sup>th</sup> Int. Conf. Environment and Electrical Engineering, Rome, pp. 6 - 11, 2015.
- [3] Bocquel A., Janning J., "Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications," 2005 European Conf. Power Electronics and Applications, Dresden, pp. 10, 2005.
- [4] M. S. Park, Y. H. Chun, "Effect of adjustable speed pumped storage power generator on the frequency control against the intermittence of wind turbine output," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 3, pp. 338-342. 2014.
- [5] Prabha. Kundur, "Power system stability and control," McGraw- Hill, Inc, 1994.
- [6] Z. Guopeng, Z. Qiang, R. Jiyun, S. Xiaofang, and H. Minxiao, "Modelling and control of doubly fed variable-speed pumped storage units for grid power regulation," *J. Engineering*, Vol. 13, pp. 745-750, 2017.
- [7] T. Kuwababara, A. Shibuya, H. Furuta, E. Kita, and K. Mitsuhashi, "Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for ohkawachi power system," *IEEE Trans. Energy Conver*, Vol. 11, No. 2, pp. 376 - 384, Jun. 1996.

#### 손금뢰(孫金磊)



1996년 8월 7일생. 2021년도 충남대 전기공학과 졸업. 2021년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

#### 서정진(徐正晉)



1992년 1월 24일생. 2019년 대전대 IT 전자정보통신공학과 졸업. 2019년~현재 충남대 전기공학과 박사과정.

#### 차한주(車翰周)



1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station (공박). 1990~2001년 LG산전연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology Reseach Center 방문교수. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수. 당 학회 감사.