

Psim시뮬레이션과 전동기-발전기(MG) 세트의 출력특성분석

임형택*, 조다솜, 손효수, 문상수, 이석현**, 김근수, 조철희

The Comparison Analysis between Psim Simulation and Motor-Generator (MG) Set Output Characteristics

Hyung-Tack Lim*, Da-Som Jo, Hyo-Soo Son, Sang-Soo Moon, Seok-Hyun Lee**, Kun-Su Kim, Chul-Hee Jo

Abstract

The importance of energy is growing according to the energy shortage and environmental concerns. Accordingly, in order to solve the problems about the use of fossil fuel, a renewable energy sources are needed. Global renewable energy power industry's position in the renewable energy market becomes important and new technology development is also essential. MG set composed by the induction motor and permanent magnet synchronous generator for simulating a renewable energy source is based on a suitable experiment equipment. The torque generated by applying a voltage to the induction motor in MG set is used as an input of the permanent magnet synchronous generator. In Psim simulation, the characteristics of the induction motor model was formulated and the output torque characteristics of the motor was controlled using the induction motor side inverter. In this paper, the comparison analysis between Psim simulation and the output characteristics of the MG set is performed in order to identify a renewable energy power system more accurately.

Key words

Renewable energy(신재생 에너지), Motor-Generator Set(전동기-발전기 세트), inverter(인버터), PMSG(영구자석 동기발전기), Psim

(접수일 2014. 6. 20, 수정일 2014. 9. 15, 게재확정일 2014. 9. 15)

* 인하대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Inha University)

■ E-mail : limht1039@naver.com ■ Tel : (032)860-7407

** 인하대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Inha University)

■ E-mail : plasma@inha.ac.kr ■ Tel : (032)860-7392

Nomenclature

T_e : torque of induction motor, Nm

L_d : induntance of d-axis

L_q : induntance of q-axis

subscrip

PMSG : permanent magnet synchronous generator

M-G Set : motor-generator set

1. 서론

화석에너지의 고갈과 환경오염에 대한 관심이 커지면서 인류의 생활과 기술의 발전에 큰 영향을 미친 화석에너지는 우리의 일상생활에 위협한 요소로써 부각되고 있다. 게다가 세계적으로 인구의 증가는 더욱 많은 전기에너지를 사용하게 될 것이다. 그리고 화석에너지의 더 많은 이용으로 인하여 매장량이 감소되는 것은 미래의 발전에 영향을 미치게 될 것이다. 이에 따라 앞으로 에너지 문제를 극복하기 위해서 화석에너지를 보다 효율적으로 이용하고 동시에 안전한 원자력 에너지의 이용을 포함하여 신재생에너지원의 이용률을 향상시키는 기술 개발이 필요하다. 아울러 전력산업의 구조개편이 세계적인 추세가 되면서 신재생에너지의 입지변화는 긍정적인 방향으로 자리 잡을 것이라 여겨진다.

또한 미국 및 EU에 가입한 유럽의 여러 기술 선진국들은 기후변화 협약 과 교토의정서와 관련하여 이산화탄소 배출권 거래제를 2005년부터 이미 시행 하고 있고, 우리나라도 2016 년도부터는 이산화탄소 배출권거래제의 영향권에 포함될 것 이라 예상된다.⁽⁴⁾

이에 따라 정부에서는 2015년까지 신재생 에너지원의 이 용률을 5%대의 수준으로 끌어올릴 것을 목표로 하고 있으 로 상대적으로 저렴한 가격의 신재생 에너지원 개발에 투자 가 필요한 상황이다.

2. 본론

2.1 Motor-Generator Set

블레이드를 사용하여 기계적 에너지를 얻는 풍력 및 조류

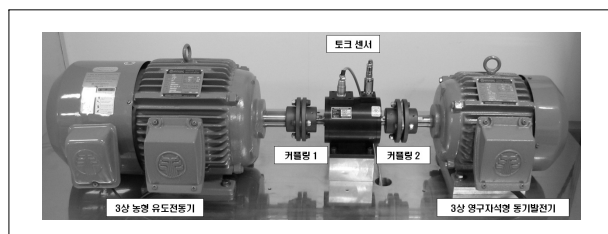


Fig. 1 M-G Set System Configuration

발전과 같이 터빈을 통해 얻은 에너지를 전기적인 에너지로 변환하는 시스템을 구성하기 위해서 신재생에너지 시스템의 터빈을 전동기로 대체하여 구성하게 된다. 이는 전동기의 회전 속도를 가변 시키며 제어할 수 있을 뿐만 아니라 공간적인 이점을 가지고 있어 전동기를 채택하며 일반적으로 유도 전동기를 사용한다. 여기서 발전기는 전동기와는 다른 회전기로 구현할 수 있으며, 일반적인 형태인 전동기와 발전기가 결합되어 있는 시스템을 M-G세트 시스템이라고 한다. Fig. 1 은 농형 유도전동기와 영구자석 동기발전기로 구성되어 있는 시스템을 나타낸 그림으로 랩실과 같은 규모가 작은 곳에서 적은 비용으로 실험하기 위해 적합한 시스템이다.⁽⁶⁾

2.2 유도전동기 모델링

M-G Set System은 전동기를 유도기를 사용하기 때문에 유도전동기를 수학적으로 모델링 하였다.

고정자 권선(Stator winding)은 유효 턴수(Turns) N_s 와 저항 R_s 를 가지며, 회전자 권선(Rotor winding)은 권선형 또는 농형으로 유효 턴수 N_r 과 저항 R_r 을 가진다고 가정한다. 공극자속을 정현적으로 분포 시키기 위해 고정자 및 회전자의 각 상 권선들을 서로 120° (전기각) 간격으로 정현적으로 분포되도록 배치한다. 그러나 해석을 단순화하기 위해 각 상의 권선을 각 상의 한 슬롯에 집중되는 집중권으로 가정한다. 또한 철심의 투자율은 무한대로 포화현상은 나타나지 않

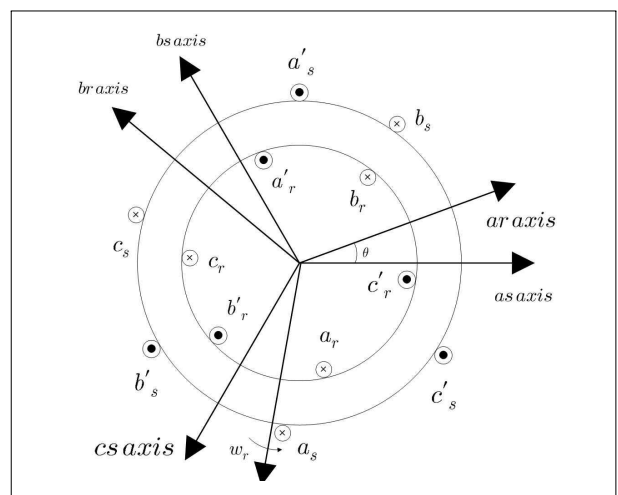


Fig. 2 Stator and Rotor Winding of Three Phase Induction Motor

는다고 하며, 코깅 토크와 슬롯 효과 등의 현상은 없다고 가정한다.⁽²⁾

2.2.1 고정자 전압방정식

권선의 전압은 저항부의 전압 강하와 쇄교 자속의 변동으로 인한 전압의 합으로 표현 가능하다.⁽²⁾

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (1)$$

2.2.2 회전자 전압방정식

회전자의 전압방정식은 회전자 저항의 전압 강하와 회전자 권선의 쇄교 자속으로 인하여 변동되는 합과 같다.⁽²⁾

$$V_{abc} = R_r i_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (2)$$

2.2.3 토크 방정식

유도기의 기계적 토크를 나타낸 식이다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

2.3 영구자석 동기발전기 모델링

M-G Set System에서 사용하는 발전기는 영구자석 동기발전기로서, 동기에서 나타난 고정자 회로는 유도기와 동일하다고 볼 수 있으며, 3상 교류 전원에 의하여 회전자계를 생성하여 동작하는 회전기이다.⁽⁵⁾

유도기와 다른 점은 회전자가 직류 전원에 의해 여자 권선을 통해 자속을 발생하거나 또는 영구자석(Permanent Magnet)을 통해 자속을 발생시킨다는 점이다. 영구자석 동기발전기는 회전자의 자속 발생에 관여하는 여자 권선이 없기 때문에 이로 인한 손실이 없어 좋은 효율특성을 갖고, 고출력 밀도 덕분에 전동기 무계에 비해서 출력 토크의 비가 크고, 신속한 속응성을 장점으로 가지고 있다. 이러한 다양한 측면을 비교해 봤을 때 성능이 유도 발전기나 직류 발전기보다 우수하다고 평을 듣고 있다.⁽³⁾

2.3.1 고정자 전압방정식

영구자석 동기기의 d-q축 등가회로를 Fig. 3의 그림과 같이 나타내었다. 이 등가회로를 이용하여 영구자석 동기발전기의 고정자 전압방정식을 다음과 같이 나타내었다.⁽²⁾

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (4)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} - \omega \lambda_{ds} \quad (5)$$

$$V_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d}{dt} \lambda_{ns} \quad (6)$$

2.4 제어기

M-G Set System의 전동기는 벡터제어시에는 3상 전류를 직접적으로 제어하는 것보다 d-q축으로 변환된 2개의 전류를 제어하는 것이 보다 효율적이기 때문에 d-q축 전류를 제어한다.⁽⁶⁾

$$v_{ds} = R i_{ds} + L \frac{d}{dt} i_{ds} + e_{ds} \quad (7)$$

$$v_{qs} = R i_{qs} + L \frac{d}{dt} i_{qs} + e_{qs} \quad (8)$$

d-q축 좌표계에서 표현된 3상 부하는 abc 전압 방정식과 비슷하게 R-L회로와 역기전력을 갖는 2개의 독립된 전압 방정식으로 표현할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 d-q축 좌표계에서 전류 제어 시스템을 나타내었다.

전류 제어기는 비례 적분(PI) 제어기를 사용하였다. 이 전류 제어기에서 전류 지령값은 d-q축 전류 i_{ds}^* , i_{qs}^* 로 표현 가능하며, 실제로 3상 부하 전류 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 는 d-q축 좌표 변

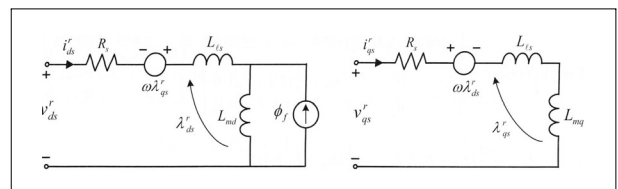


Fig. 3 d-q Equivalent Circuit of PMSM

환되어 피드백(Feedback)된다. PI 전류 제어기는 전류 오차를 감소시키기 위해서 필요한 d-q축 좌표계의 지령 전압인 v_{ds} , v_{qs} 을 만들어 내며, 이 지령 전압은 다시 좌표 역변환을 통해서 3상 지령 전압값으로 변환되는 것이다.

Fig. 5는 d-q축 정지 좌표계에서 PI전류 제어기의 특성을 확인하기 위해 한 축의 시스템에 대해서 나타낸 것이다.

이 시스템의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁾

$$I(s) = \frac{K_p s + K_i}{Ls^2 + (R + K_p)s + K_i} I^*(s) - \frac{s}{Ls^2 + (R + K_p)s + K_i} E(s) \quad (9)$$

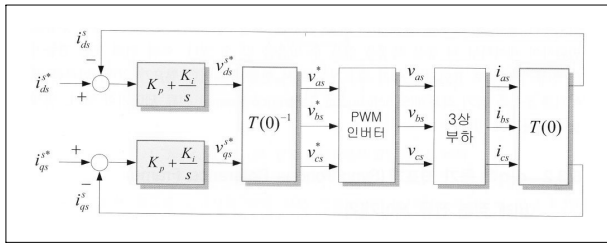


Fig. 4 PI Current Controller of d-q reference frame

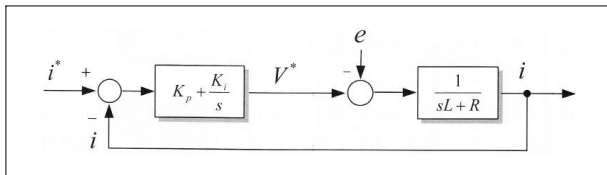


Fig. 5 Current Controller of d-q reference frame

이와 같이 교류전동기에서 교류전류를 직접적으로 제어하는 것보다 직류 전류로 변환하여 제어하면 더 좋은 특성을 얻을 수 있다.

2.5 시뮬레이션

M-G세트 시스템의 출력 특성을 보다 정확히 파악하고, 제어하기 위해 Psim Simulation의 Tool을 사용하여 유도전동기와 영구자석 동기발전기, 인버터를 모델링 하였다. 이 시뮬레이션은 유도전동기, 영구자석 동기발전기, 인버터 제어기로 구성된다. Fig. 6은 Psim을 사용하여 M-G세트 시스템을 구성한 것이다.

Fig. 7은 유도전동기의 각속도를 제어하기 위해 PI제어가 진행되도록 구성한 부분이다. 이 부분을 통해 원하는 지령치의 값으로 제어가 가능하도록 모델링 하였다. Fig. 4의 블록 다이어그램을 Psim을 이용하여 모델링 하였다. 이 부분을 통해 d-q축의 지령치를 비교하여 오차를 감소시키도록하여 유도 전동기의 토크 출력의 제어가 가능하다.

Fig. 8은 유도전동기에서 출력되는 토크를 나타내는 그림이다. 발전기와 연결된 유도전동기 축의 토크 값이 급격히 증가하다가 과도상태가 지나면 일정한 토크를 발생하는 것을 확인할 수 있다.

여기서 출력된 토크는 영구자석 동기발전기의 입력값이 된다.

Fig. 9는 발전기에서 출력되는 전력을 나타낸 그림이다.

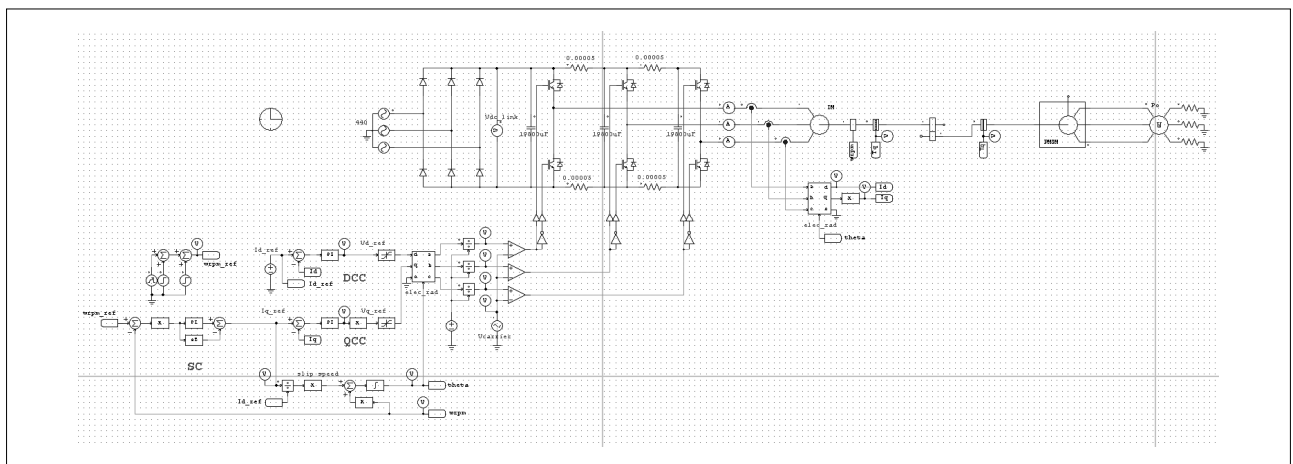


Fig. 6 M-G Set System Circuit using Psim Simulation

출력 전력은 급격하게 증가하는 과도상태를 거쳐 안정상태가 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 유도전동기를 통하여 입력되는 토크의 값이 일정하므로 그에 따라 발생하는 전력값도 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 유도전동기의 각속도를 나타낸 것이다. 유도 전

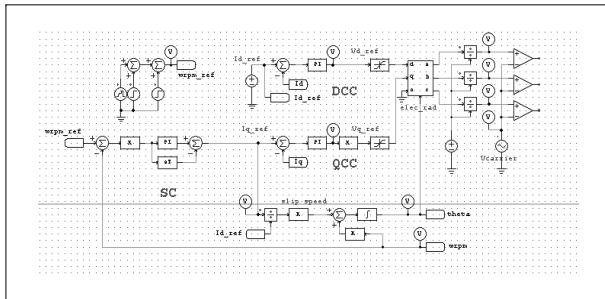


Fig. 7 PI Controller of Induction Machine

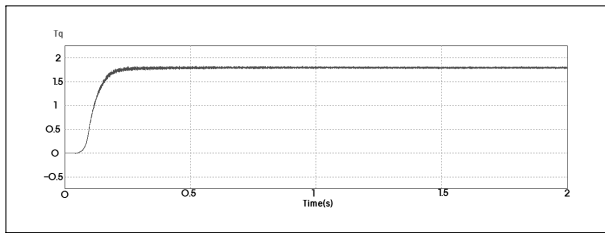


Fig. 8 Torque of Induction Motor

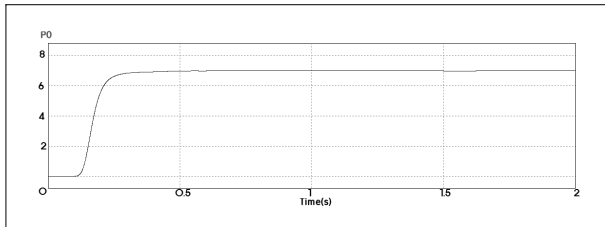


Fig. 9 Power of Permanent Generator

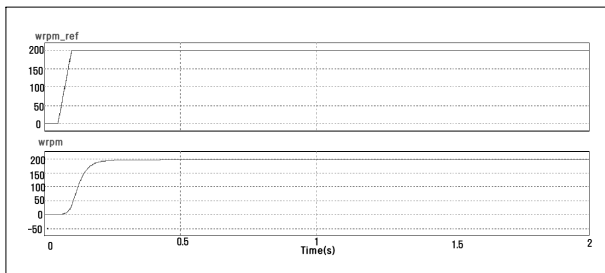


Fig. 10 RPM of Induction Machine

동기의 각속도의 지령치를 입력해주면 그 값에 따라 PI제어를 통해 실제 유도전동기의 각속도 또한 지령치에 근접한 값으로 증가하는 모습을 확인할 수 있다.

2.6 실험 결과

Fig. 11은 Psim 시뮬레이션을 수행했을 때 토크에 대한 출력 전력 특성을 나타낸 그림이다. 지령값을 서서히 증가시켜 주면서 그에 따른 출력토크와 전력의 값을 측정한 값을 나타낸 그래프이다. 이 그림을 통해 토크의 증가에 따라 출력 전력의 특성도 증가하는 성질을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 Labview를 이용해 M-G 세트 시스템을 구동시켰을 때 토크와 출력 전력 특성에 대한 관계를 나타낸 것이

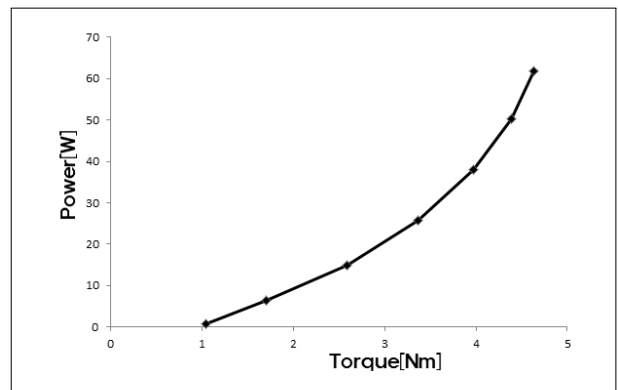


Fig. 11 The torque of the output power characteristics of Psim Simulation

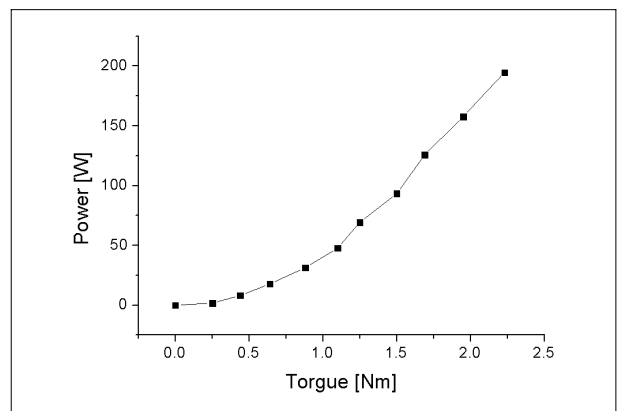


Fig. 12 The torque of the output power characteristics of M-G Set system

다. 실제 M-G세트 시스템에서도 지령치의 증가에 따라 토크가 증가할수록 출력 전력이 증가하는 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

따라서 M-G Set를 이용하여 풍력이나 조류와 같은 블레이드를 이용한 발전방식에 대한 모의 실험을 하여 데이터를 얻을 때는 이러한 M-G Set System을 이용하여 실험하여도 그 특성을 파악하는데 어려움이 없다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 13은 기존의 M-G Set에 부착되어 있는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)로 구동되는 시스템을 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(SPMSM)의 형태로 바꾸었을 때의 토크출력과 전력출력의 특성을 나타낸 그래프이다. 기존의 매입형을 사용하였을 때보다 증가폭의 더 가파른 것을 확인할

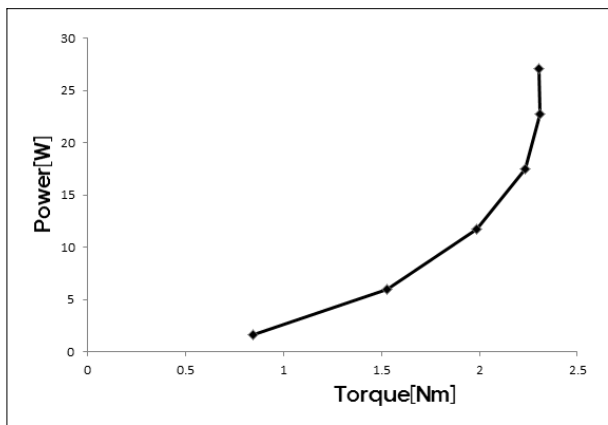


Fig. 13 The torque of the output power characteristics of Psim Simulation (SPMSM)

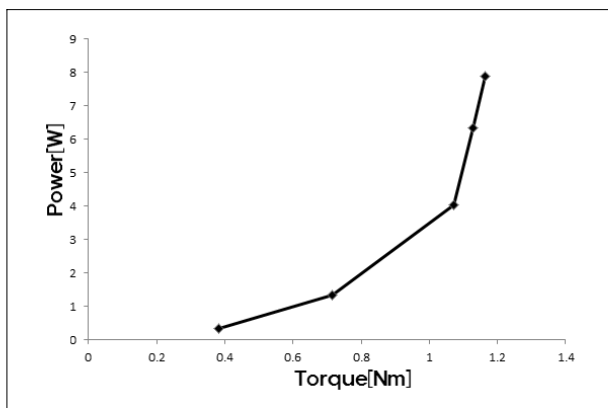


Fig. 14 The torque of the output power characteristics of Psim Simulation (SPMSM)

수 있다. 이것은 릴럭턴스 토크의 영향으로 보다 큰 토크값을 발생하기 때문이라고 볼 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 13에서 사용한 Ld, Lq값 보다 2배 큰 Ld, Lq값을 사용하여 측정한 토크출력과 전력출력의 특성을 나타낸 그래프이다. 기존의 표면부착형의 인덕턴스의 값을 사용하였을 때보다 증가폭은 크지만 출력되는 전력의 값은 더 작게 측정되는 것을 확인할 수 있다.

결국, Fig. 11~Fig. 14에서 토크의 값이 증가할수록 Power를 발생할 수 있는 동력이 증가하는 것이기 때문에 자연스럽게 토크의 증가에 따라 Power의 값도 증가하는 것을 알 수 있다. Reference 4의 Fig. 5와 비교해 보아도 토크의 증가에 따라 Power의 값이 증가하고 비슷한 값이 출력되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 M-G세트 시스템을 모델링하여 토크와 출력 전력의 특성을 시뮬레이션하여 구현하였다. 유도전동기와 영구자석 동기발전기를 커플링하여 연결하는 것은 실제 신재생에너지 시스템의 크기에 비해 간소화하여 실험을 가능하게 해주는 것이기 때문에 매우 활용도가 다양한 장비라 할 수 있다. 풍력이나 조류와 같은 블레이드를 이용한 발전에 대하여 실험을 수행할 때는 이러한 M-G Set System을 이용하여 그 특성을 파악하는데 보다 수월하다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 유도전동기와 영구자석 동기발전기의 특성에 대해 구체적이며 정확하게 파악하는 것은 실질적인 신재생 에너지 발전의 기술개발에도 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학과 인하대학교의 지원을 받아 수행 되었습니다.

References

- [1] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., 2006, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Application", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, pp. 486-494.
- [2] Gupta, J., Kumar, A., 2012, "Fixed Pitch Wind Turbine-Based Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Wind Energy Conversion System", Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, pp. 52-62.
- [3] Kumar, A., Sandhu, K. S., Jain, S. P., Kumar, P. S., 2009, "Modeling and Control of Micro-Turbine Based Distributed Generation System", International Journal of Circuit, Systems and Signal Processing, Vol. 3, pp. 65-72.
- [4] Won-Young, A., Hyung-Tack, L., Seok-Hyun, L., Gun-Su, K., Chul-Hee, J., 2013, "Analysis of the Characteristics of the Tidal current Power Generation System Using Motor-Generator Set", New & Renewable Energy, Vol. 9, No. 4, pp. 19-24.
- [5] Won-Young, A., Seok-Hyun, L., Gun-Su, K., Kang-Hee, L., Chul-Hee, J., 2013, "Analysis of the Characteristics of the Tidal Current Power Generation System Using PMSG and Water Tunnel", New & Renewable Energy, Vol. 9, pp. 44-49.
- [6] Joo-II, H., Seok-Hyun, L., Won-Young, A., Chul-Hee, J., 2010, "Development of a Tidal Current Power Simulator based on LabVIEW", KIEE Summer Conference, pp. 1219-1220.

임 형 택



2012년 인하대학교 전기공학과 공학사
2014년 인하대학교 전기공학과 공학석사

현재 인하대학교 전기공학과 그린에너지연구소
(E-mail : limht1039@naver.com)

조 다 슝



2013년 배제대학교 전산전자 물리학과 학사

현재 인하대학교 전기공학과 공학석사과정
(E-mail : jdsom15@gmail.com)

손 호 수



2014년 남서울대학교 전자공학과학사

현재 인하대학교 전기공학과 공학석사과정
(E-mail : handhs2606@gmail.com)

문 상 수



2014년 남서울대학교 전자공학과 학사

현재 인하대학교 전기공학과 공학석사과정
(E-mail : mss4119@naver.com)

이 석 현



1985년 서울대학교 전기공학과 공학사
1987년 서울대학교 전기공학과 공학석사
1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학박사

현재 인하대학교 전기공학부 교수
(E-mail : plasma@inha.ac.kr)

김 근 수



2000년 인하대학교 전기공학과 공학사
2002년 인하대학교 전기공학과 공학석사
2009년 인하대학교 전기공학과 공학박사

현재 영진전문대학 전자정보통신계열 교수
(E-mail : kgs13152@hotmail.com)

조 철 희



1984년 인하대학교 조선공학과 공학사
1985년 미국 Steven Institute of Technology
해양공학과 공학석사
1991년 미국 Texas A&M University 해양공학과
공학박사

현재 인하대학교 조선해양공학과 교수
(E-mail : chjo@inha.ac.kr)