

신경회로망을 적용한 직류배전시스템의 AFE 정류기 제어에 관한 연구

김성완* · 전현민**† · 김종수**

* 한국해양수산연수원 교수, ** 한국해양대학교 교수

Active Front End Rectifier Control of DC Distribution System Using Neural Network

Seongwan Kim* · Hyeonmin Jeon**† · Jongsu Kim**

* Professor, Ocean Polytech Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

** Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 선박으로부터 발생하는 배출가스에 대한 규제가 강화되고 이를 해결하기 위한 대안으로 전기추진시스템의 적용이 대형상선에서부터 중·소형선박에 이르기까지 그 사용이 증가되고 있다. 전기추진시스템의 효율 향상을 위한 방법으로 발전원의 개선, 배터리·연료전지·태양광 등의 친환경 발전원의 시스템 연계 및 정류기, 전력변환장치, 추진전동기의 개발과 제어방식의 연구를 들 수 있다. 그 중 정류 방식에 있어 상천이변압기과 다이오드를 이용하는 방식이 널리 사용되었으나, 직류배전을 이용한 친환경발전원의 계통 연계, 가변속 발전원의 사용, 중·소형 전기추진시스템의 적용을 통해 전력용 반도체 소자를 이용한 AFE정류기에 대한 수요가 증대되고 있다. 이러한 AFE 정류기를 제어하는 방식에 있어 기존의 비례적분제어기가 아닌 신경회로망을 이용한 방식을 본 연구에서는 제안하였다. 기존의 제어기 데이터를 활용하여 Matlab/Simulink를 통해 학습한 신경회로망제어기를 설계하고 PSIM을 통해 설계된 정류시스템에 신경회로망 제어기를 적용하여 부하변동에 따른 직류출력단의 파형과 역률 개선의 유효성을 확인하였다. 이는 공간이 협소한 중소형 친환경 선박의 정류 시스템으로써 적용이 가능하다.

핵심용어 : 신경회로망, AFE 정류기, 전기추진시스템, 직류배전, 친환경선박

Abstract : As regulations of emissions from ships become more stringent, electric propulsion systems have been increasingly used to solve this problem in vessels ranging from large merchant ships to small and medium-sized ships. Methods for improving the efficiency of the electric propulsion system include the improvement of power sources; the use of a system linked to environmentally friendly power sources, such as batteries, fuel cells, and solar power; and the development of hardware and control methodology for rectifiers, power conversion devices, and propulsion motors. The method using a phase-shifting transformer with diodes has been widely used for rectification. Power semiconductor devices with grid connection to an environmentally friendly power source using DC distribution, a variable speed power source, and the application of small and medium-sized electric propulsion systems have been developed. Accordingly, the demand for active front-end (AFE) rectifiers is increasing. In this study, a method using a neural network rather than a conventional proportional - integral controller was proposed to control the AFE rectifier. Tested controller data were used to design a neural network controller trained through MATLAB/Simulink. The neural network controller was applied to a rectification system designed using PSIM software. The results indicated the effectiveness of improving the waveform and power factor DC output stage according to the load variation. The proposed system can be applied as a rectification system for small and medium-sized environmentally friendly ships.

Key Words : Neural network, AFE rectifier, Electric propulsion system, DC distribution system, Eco-friendly ship

* First Author : seongwan.kim@seaman.or.kr, 051-620-5789

† Corresponding Author : jhm861104@kmou.ac.kr, 051-410-4841

1. 서론

기존 선박에 적용된 전력배전시스템은 육상 송·배전시스템과 동일한 교류배전방식을 대부분 채택하였다. 하지만 최근 친환경 선박의 건조추세에 따라 전기추진시스템을 적용하는 선박의 건조 증가하고 있으며, 친환경연료를 사용하는 발전기, 배터리 및 연료전지 등 다양한 동력원의 선박 적용 시 교류배전방식에 비해 에너지효율이 우수한 직류배전방식을 적용하는 전기추진선박에 관한 연구가 증가하고 있다 (Hwang et al., 2019).

전기추진선박은 기존의 메인엔진을 축에 직결하여 프로펠러를 구동하는 기계식 추진방식과는 달리 추진전동기의 동력을 이용해서 선박을 추진하는 방식을 말한다. 선박의 동력원으로 사용하는 배터리와 연료전지는 출력이 직류형태로 발생되지만 가장 많이 적용하고 있는 발전기는 교류형태로 출력한다. 직류배전방식을 적용하기 위해서는 발전기 출력에서 발생하는 교류를 직류로 변환하는 전력변환장치가 필요하며, 상천이변압기가 포함된 DFE(Diode Front End) 정류기나 AFE(Active Front End) 정류기를 적용하고 있다. 하지만 DFE 정류기는 선박의 비선형 부하에 따른 전력계통의 높은 고조파율, 역률 저하 등의 문제가 발생하며 이를 보완하기 위해 상천이변압기와 수동필터 등을 함께 적용하여야 한다(Kim et al., 2013). 또한 부피와 무게가 큰 상천이변압기를 설치하기 위해서는 더 많은 공간과 비용이 발생하는 단점이 있다. 반면 AFE 정류기는 양방향으로 사용이 가능하고, 반도체 소자의 제어를 통해 직류파형의 출력 제어가 용이하며, 입력되는 전압과 전류의 역률제어가 가능한 장점뿐만 아니라 시스템 전체 부피의 감소로 인해 중소형 선박에서 적용되는 사례가 증가하고 있다(Jeon and Kim, 2018). 따라서 AFE 정류기의 제어 향상을 위한 위상검출기법, 퍼지제어기 등 다양한 연구가 진행되었다(Zhang, 2021)

본 논문에서는 직류배전방식 전기추진시스템에 적용되는 AFE 정류기의 제어를 기존에 가장 많이 사용하고 있는 비례적분제어기(PI Controller)가 아닌 신경회로망 제어를 적용한 제어기를 제안하고 모델링하였으며, 이를 통해 부하변동에 따른 직류출력단의 파형과 역률 개선에 대해서 확인하였다. 또한, 제안하는 제어기를 적용한 전체 전기추진시스템을 모델링 하였으며 시뮬레이션 결과 분석을 통해 제안된 제어시스템에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 선박 직류배전시스템

직류배전시스템은 최근 대용량 및 스위칭속도가 향상된 전력용 반도체소자의 보급이 활발해 짐에 따라 전력변환장

치의 원활한 전력제어 및 전력변환 효율이 증대되었으며, 직류 회로차단기의 용량 증가와 안전성이 확보됨에 따라 직류 배전시스템의 선박 적용이 한층 용이해졌다(Chai et al., 2018).

전기추진선박의 직류배전시스템은 교류발전기의 출력을 발전기 후단에 설치된 정류기를 이용하여 직류로 변환한 후 배전하는 것을 말하며 이 때 주로 AFE 정류기를 적용한다. 발전기 간의 계통연계가 복잡한 교류배전시스템과 달리 버스단의 직류전압만을 동일하게 유지하면 계통 간 병렬운전이 손쉽게 가능하다. 또한, 발전기 출력단에 설치된 전력변환장치로 인해 선박의 부하에 따라서 발전기 엔진의 속도를 가변할 수 있는 가변속시스템을 적용할 수 있으며, Fig. 1에 보는 바와 같이 연료전지나 배터리저장장치 등과 같은 친환경에너지원과의 연계가 용이하여 선박에서 적용이 점차 증가하는 추세이다.

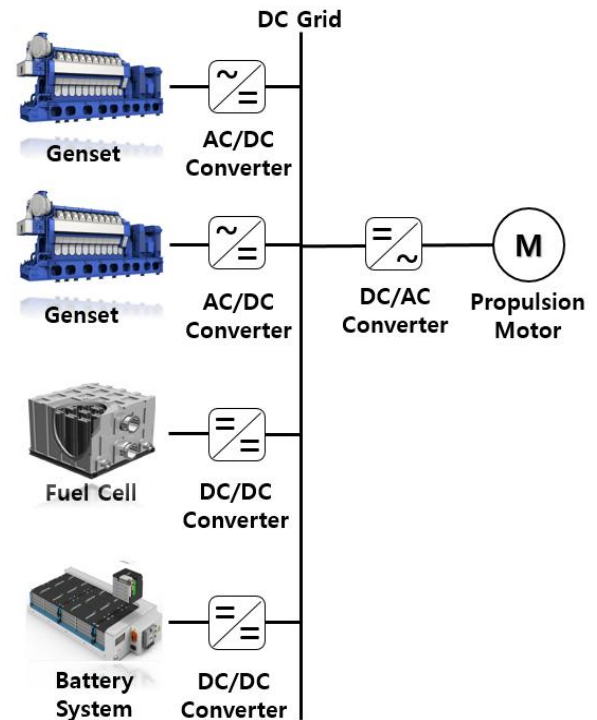


Fig. 1. DC grid system of Electric Propulsion System.

3. AFE 정류기 개요

3.1 AFE 정류기 구성

AFE 정류기는 기존 다이오드 정류기 대신 IGBT, IGCT 및 MOSFET 등 전력용 반도체소자를 사용한다. 이와 같이 On/Off 제어가 가능한 반도체소자를 제어기에 적용함으로써 정류기 출력전압 제어, 부하변동 시 출력전압 안정화, 입력

역률 제어 등의 장점을 가진다.

AFE 정류기의 기본 구조는 Fig. 2와 같으며, 총 3개의 단으로 이루어져 있다. 개별 단에 각 2개의 반도체소자가 직렬로 연결되어 있고, 각 단의 반도체소자는 상보적으로 On/Off 하는 스위칭 방식을 적용한다. 반도체소자의 정상 작동 신호를 발생하는 제어기를 설계하고, 제어기를 통해 출력되는 신호는 정현파 펄스폭변조방식(SPWM)이나 공간변조방식(SVPWM) 등의 변조 기법을 통해 최종적으로 AFE 정류기의 반도체 스위칭 소자를 작동하게 하는 On/Off 신호로 사용된다.

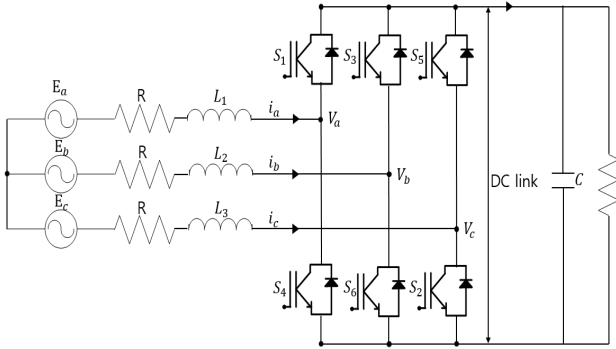


Fig. 2. Configuration of AFE rectifier.

3.2 AFE 정류기 모델링

E_a, E_b, E_c 는 3상 교류입력을 나타내며, ‘L’은 인덕터로써 전력변환 시 정류기 입력 측의 전류조정을 위해 적용되고, 정류기 출력 측에 설치된 ‘C’는 커패시터이며 급격한 전압변동에도 직류출력 전압을 유지하는 역할을 한다.

Fig. 2의 AFE 정류기를 전압방정식으로 나타내면 식(1) ~ (3)과 같다.

$$E_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_a \quad (1)$$

$$E_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_b \quad (2)$$

$$E_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_c \quad (3)$$

여기서, E_a, E_b, E_c 는 a, b, c상의 전원전압, i_a, i_b, i_c 는 각 상의 입력전류, V_a, V_b, V_c 는 정류기 입력전압을 나타낸다.

3상 전원전압은 위 식(1) ~ (3)와 같이 시간의 흐름에 따라 값이 지속적으로 변하는 미분방정식으로 표현되므로 그 해석에 상당한 어려움이 따른다. 따라서 좌표축변환기법을 적용하여 3상 abc축을 동기회전좌표계 d-q축으로 변환하면

시간의 변화에도 일정한 값을 출력하는 시불변 미분방정식으로 변환이 가능하고 이를 통해 AFE 정류기의 제어 및 해석이 단순명료 해진다.

abc좌표계의 3상 변수를 정지된 좌표계 $\alpha-\beta$ 축으로 변환하는 행렬식은 다음 식(4)와 같다[10](Krause et al., 2002).

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축을 동기회전좌표계 d-q축 성분으로 변환하는 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(6), (7)은 AFE 정류기의 3상 미분방정식을 동기회전좌표계 d-q축으로 변환한 전압방정식을 나타낸다.

$$E_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + V_d \quad (6)$$

$$E_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + V_q \quad (7)$$

직류버스단의 출력전압을 제어하기 위해 지령전압과 실전압을 비교기를 통해 비교한 후 전압제어기에서 d축 전류 지령값을 구한다. 또한, 정류기에서 출력되는 직류전압의 제어를 통한 직류버스단의 전압을 수학적으로 모델링하면 식(8)과 같다.

$$V_{dc} = \frac{2}{C} \int (\frac{3}{2} e_d i_d - \frac{V_{dc}}{R}) dt \quad (8)$$

4. 신경망 제어기를 적용한 AFE 정류기

본 논문은 AFE 정류기에서 출력되는 직류전압 제어를 위해 기존 비례적분 제어기를 대신하여 신경망 제어기를 적용하였다. 신경망 제어기의 학습을 위해 기존의 제어기를 통해 주어진 데이터를 이용하여 신경망을 학습하였으며, 이를 통해 주어진 데이터에서 Fig. 3과 같은 높은 자유도를 가져 유연한 구조의 인공신경망을 피팅하였다.

신경회로망을 적용한 직류배전시스템의 AFE 정류기 제어에

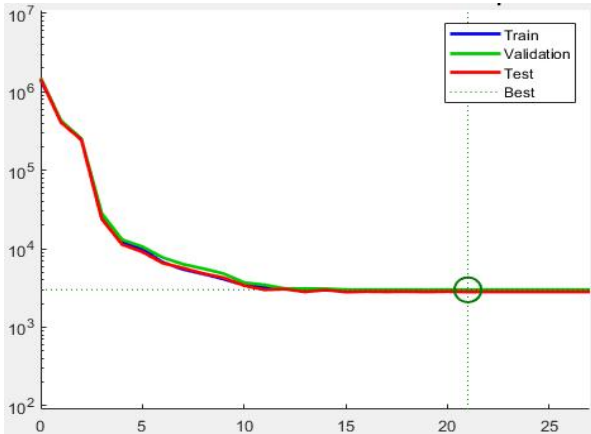


Fig. 3. Result of neural network controller.

신경망의 입력데이터는 동기회전좌표계를 통해 좌표축변환된 E_d, E_q 값이며, 출력데이터는 E_d^*, E_q^* 이고 Fig. 4는 신경망 제어기의 블록다이어그램 나타낸다. 신경망의 입력변수는 테이블을 구성하는 입력변수와 동일하게 설정되며 같은 데이터 입력이 들어왔을 때 출력을 비교하여 점차적으로 차이가 작아지도록 파라미터를 수정하는 학습방법을 적용하였다. 신경망은 5개의 노드를 갖는 1개의 은닉층으로 구성하였으며, 활성화함수는 Tansigmoid함수로 하였다.

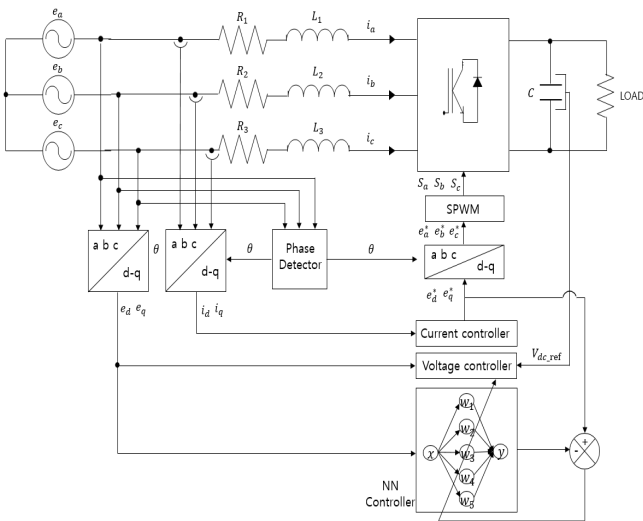


Fig. 4. Modeling of AFE rectifier using neural network controller.

또한, 신경망의 학습 알고리즘은 오류역전파 알고리즘을 적용하였으며(Robert, 1992) 입출력 성분을 샘플링하여 학습 시킴으로써 최적의 연결가중치를 구하고 이를 통해 추정 출력신호가 출력신호에 다다를 때까지 학습이 진행되도록 설계하였다.

신경망의 오류역전파 알고리즘을 이용하여 식(9)와 같이 최적의 연결가중치를 도출하고 이를 통해 Fig. 4와 같이 E_d^*, E_q^* 목표값을 추정할 수 있다

$$\hat{C}_o(k) = [F_h(X_i W_{ih} + B_h)] W_{hk} + B_k \quad (9)$$

여기서, $\hat{C}_o(k)$ 는 출력데이터

i 는 입력층의 노드수

h 는 은닉층의 노드수

k 는 출력층의 노드수

F_h 는 활성화함수

X_i 는 입력데이터 행렬

W_{ih} 는 입력층과 은닉층 사이의 연결가중치 행렬

W_{hk} 는 은닉층과 출력층 사이의 연결가중치 행렬

B_h 는 은닉층 바이어스 행렬

B_k 는 출력층 바이어스 행렬

5. 시뮬레이션

Fig. 5와 같이 신경회로망 제어기를 적용한 AFE 정류기를 전력분석프로그램 PSIM을 이용하여 모델링하였으며, 시뮬레이션 결과분석을 실시하였다.

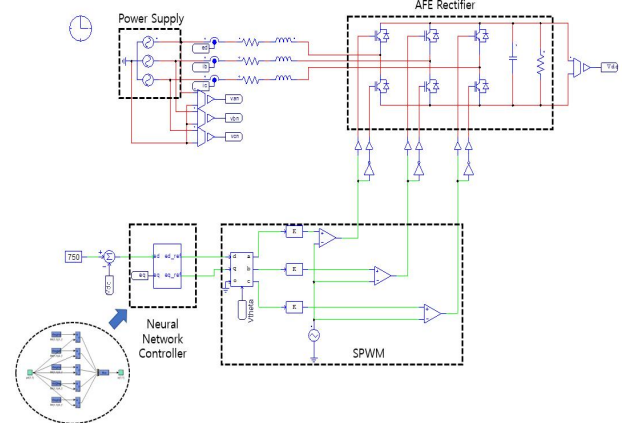


Fig. 5. Simulation model of AFE rectifier using neural network controller.

먼저 기존의 PI 제어기에서 도출된 값을 부가하며 신경회로망 제어기를 훈련하고 훈련된 신경회로망 제어기를 AFE 정류기에 적용한 시뮬레이션 결과 Fig. 6과 같이 목표로 한 직류출력전압 750[V]가 균일하게 출력됨을 확인할 수 있었다.

6. 결론 및 고찰

DFE정류기와 달리 반도체 스위치 소자를 이용하여 능동 제어가 가능한 AFE정류기를 본 연구에서 적용을 하고 기존의 PI 제어기법방식이 아닌 신경회로망을 이용한 제어를 설계하였다. 오차를 최소화하며 데이터를 학습시킨 결과 구해진 가중치의 정확성에 의해 E_d, E_q 입력값에 따른 지령값 E_d^*, E_q^* 를 신경회로망 제어기를 통해 얻을 수가 있었으며 학습 영역이외에서도 제어기의 우수한 안정성과 동특성을 직류전압값과 전동기의 속도곡선을 통해 확인할 수 있었다. 이를 통해 설치공간이 좁은 중소형 선박이나 LC 필터의 설치가 어려운 시스템에서의 적용이 가능함을 입증하였으며 친환경 추진시스템으로써의 기술 발전에 기여할 수 있다.

References

- [1] Chai, M., D. R. Bonthapalle, L. Sobrayen, S. K. Panda, D. Wu, and X. Chen(2018), Alternating current and direct current-based electrical systems for marine vessels with electric propulsion drives, *Applied Energy*, Vol. 231, pp. 747-756.
- [2] Hwang, J. Y., C. H. Jeon, H. M. Jeon, and J. S. Kim(2019), A Study on the Application of Domestic ferry to a Battery Propulsion Ship, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 25, No. 7, pp. 945-952.
- [3] Jeon, H. M. and J. S. Kim(2018), A Study on Application of Electric Propulsion System using AFE Rectifier for Small Coastal Vessels, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 24, No. 3, pp. 373-380.
- [4] Kim, J. S., D. H. Seo, and J. H. Choi(2013), CHarmonic and Torque Ripple Reduction of Electric Propulsion System using 12-Pulse Diode Rectifier by Auxiliary Supply, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 19, No. 1, pp. 66-70.
- [5] Robert, H. N.(1992), III.3-Theory of the Backpropagation Neural Network, Academic press, pp. 65-93.
- [6] Zhang, S.(2021), Comparison of Diode Rectifier and Active-Front-End for Synchronous Generators Suppling DC Loads for Maritime Applications, 2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp. 259-264.

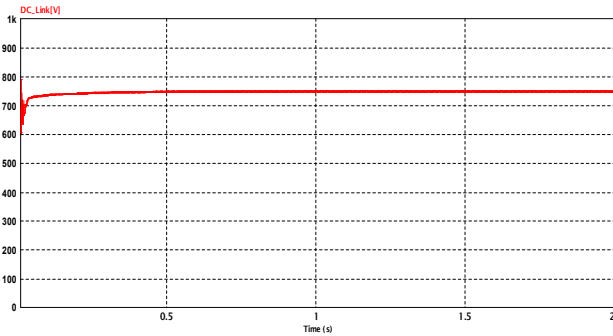


Fig. 6. DC voltage of DC link with training data.

또한, 신경망 제어기의 제어 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 도중 직류출력전압의 지령값을 750[V]에서 700[V]로 변경하는 경우와 700[V]에서 800[V]로 변경한 경우를 적용하였다. 이 시뮬레이션 결과 Fig. 7과 같이 지령전압의 값이 갑작스럽게 변화하여도 0.01[sec]이내 안정을 되찾는 모습을 확인할 수가 있었고 이 때 Fig. 8에 보는 바와 같이 추진 전동기의 속도는 변동 없이 일정한 운전을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이를 통해 신경회로망 제어기를 이용한 AFE 정류기의 제어 안정성을 검증하였다.

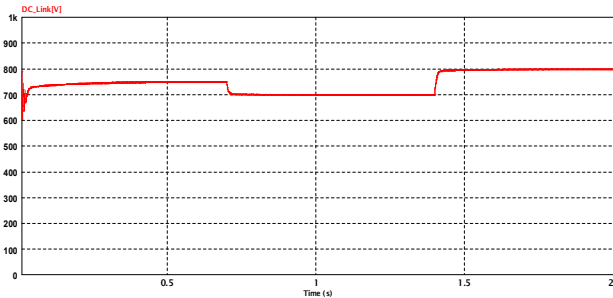


Fig. 7. DC voltage of DC link with unspcificness data.

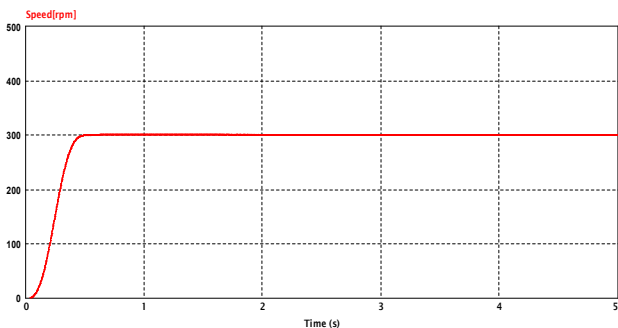


Fig. 8. RPM of propulsor motor.

Received : 2021. 12. 02.

Revised : 2021. 12. 20.

Accepted : 2021. 12. 28.