

대공무기체계 적용을 위한 타코제너레이터 개발

변기식^{1*}, 박준영², 조성용¹

¹국방기술품질원 전투물자센터, ²태창엔이티(주)

Development of Tacho Generator for Application of Anti-aircraft Weapon System

Kisik Byun^{1*}, Jun Young Park², Sung-Yong Cho¹

¹Combat Materiel Center, Defense Agency for Technology and Quality (DTaQ)

²Taechang N.ET. Co., Ltd.

요약 본 논문에서는 대공무기체계의 DC 전동기에 적용 가능한 타코 제너레이터의 개발 내용을 담고 있다. 일반적으로 DC 전동기의 제어를 위한 피드백 장치로 타코 제너레이터, 리졸버, 아날로그 홀 이펙트 센서 등의 장치가 사용되는데, 이 중 대공무기체계 운용 특성에 맞추어, 충격 부하와 진동에 견고한 특성을 지닐 뿐만 아니라, 운용 온도 범위가 넓은 타코 제너레이터를 개발하였다. 개발 목표 성능은 현재 운용 중인 타코 제너레이터의 제원 및 요구성능을 토대로 설정하였으며, 이를 바탕으로 타코 제너레이터의 구성품인 모터의 축에 결합되는 회전자와 모터의 하우징에 결합된 고정자를 설계 및 제작하였다. 개발 제품의 시험결과, 일반적인 전기적 특성인 인덕턴스는 31.0 mH, 단자저항은 147.7 Ω로 기준을 충족하였으며, 회전 속도 인자는 9.500 ± 0.475 V/krpm의 기준에 대하여 일반 운용 및 최고속도 이후 운용 조건 하에서 모두 충족하였다. 아울러 적용 장비에 대한 환경적 적합성은 단위 온도 변화율을 통해서 확인하였는데, 모두 0.03 %/°C 이내로 온도 특성이 우수함을 알 수 있었다.

Abstract This paper presents the development of a tacho generator that is applicable to a DC motor for anti-aircraft weapon systems. In general, devices such as tacho generators and resolvers are used as feedback devices for controlling DC motors. A tacho generator with a wide operating temperature range was developed, which has robust characteristics against shock loads and vibrations according to the operational characteristics of anti-aircraft weapon systems. The target specifications were set based on the requirements of the tacho generator currently in operation. A rotor coupled to the shaft of the motor and a stator coupled to the housing of the motor were then designed and manufactured. The inductance was 31.0 mH, the terminal resistance was 147.7 ohms, and the rotational measurement factor was satisfactory under both normal operation and operating conditions after the maximum speed for the standard of 9.500 ± 0.475 V/krpm. In addition, the environmental suitability of the applied equipment was confirmed through the rate of change in unit temperature, and it was found that the temperature characteristics were all within 0.03 %/°C.

Keywords : Anti-aircraft Weapon System, Brush Type, DC motor, Military, Tacho-Generator

*Corresponding Author : Kisik Byun(Defense Agency for Technology and Quality, DTaQ)

email: bks@dtaq.re.kr

Received September 8, 2020

Accepted October 5, 2020

Revised September 25, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

기계적 장치에서 회전계의 제어를 위해서는 전동기의 위치와 속도의 검출이 필수적이다. 이때 아날로그 신호 검출을 위한 피드백 장치로서 타코제너레이터, 리졸버, 아날로그 홀 이펙트 센서 등의 장치가 사용되어진다.

리졸버는 회전자와 고정자 사이에 전기적, 기계적 접촉점이 없기 때문에 가혹한 환경의 조건에서도 이상적이고 안정적인 장치로 사용될 수 있지만, 별도의 신호처리용 RDC(Resolver to Digital Converter)가 필요하다는 단점을 가지고 있다[1]. 아날로그 홀 이펙트 센서는 홀 효과(hall effect)를 이용하여 위치 피드백 신호를 제공하는 방식으로, 정밀한 위치 피드백을 요하는 장비에는 적절하지 않은 것으로 알려져 있다[2]. 반면에 타코제너레이터는 충격부하와 진동에 견고한 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 운용온도 범위가 넓으며, 구조가 간단한 특성을 가지고 있으므로 민수분야 및 무기체계에서 널리 적용되는 방식이다[3].

무기체계에서의 회전계는 대부분 포와 포탑부에 포함되며, 통상적으로 서보모터에 의해 제어된다. 이때, 회전계의 정확도를 보장하기 위해서는 모터의 회전속도 제어가 필수적인데, 모터의 회전속도를 전기적 신호로 변환하여 서보제어기(servo controller)로 피드백(feedback)시켜 정밀한 제어를 구현하는데 사용되는 구성품이 바로 타코제너레이터이다 (Fig. 1) [4].

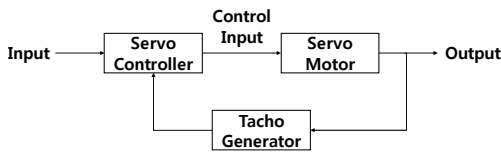


Fig. 1. Block diagram of feedback system

타코제너레이터는 크게 출력 전압의 종류에 따라 교류(AC)형과 직류(DC)형으로 구분되는데, 무기체계에서 가장 흔하게 사용되는 형태는 직류(DC)형이다. 직류형은 교류형에 비해 리플이 적으면서 회전방향을 판별 할 수 있다는 장점이 있으나, 상대적으로 고가일 뿐 아니라 '브러쉬(Brush)'의 마모에 따른 주기적 교환이 필요하다는 단점이 있다[5, 6]. 최근 기존 전기-기계식이 아닌 전자식 타코제너레이터 설계를 통해 브러쉬리스 직류모터(BLDC: Brushless Direct Current)에 적용 가능한 고정밀, 저비용의 타코제너레이터를 통해 성능 개선을 위한

다양한 연구가 진행되고 있다[7].

이에 본 논문에서는 대공무기체계의 회전발사대 제어를 위한 DC 전동기에 적용 가능한 타코제너레이터의 개발내용을 담고 있다.

시험평가 결과, 개발된 타코제너레이터는 현용 부품과 유사한 성능을 보여주고 있었으며, 이를 통해서 군 운용 환경 적용에 적합할 것으로 판단되었다.

2. 본론

2.1 개발방법

타코제너레이터의 개발절차는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 먼저 타코제너레이터의 목표성능을 설정하였다. 이후 타코제너레이터의 구성품인 회전자와 고정자가 목표성능을 만족하도록 설계 및 제작하였다. 최종적으로 제작된 타코제너레이터의 시험평가를 통해 목표성능 충족여부를 확인하였다.

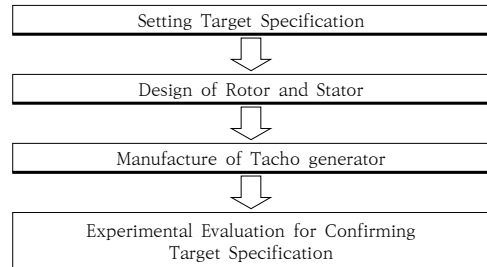


Fig. 2. The entire process for development of tacho generator.

2.2 목표성능 설정

제품개발을 위한 목표성능은 현재 대공무기체계에서 운용 중인 타코제너레이터의 제원 및 요구성능을 토대로 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Target specification

Requirement		Unit	Specification
Electrical Characteristics	Inductance	mH	32.0 ± 3.2
	Armature Resistance	Ω	135.0 ± 13.5
Scale Factor	General	V/krpm	9.500 ± 0.475
	After Maximum Speed (8,000 rpm)		
Temperature Drift @ -32 ~ 80℃		%/℃	≤ 0.03

2.3 설계 및 제작

일반적으로 타코제너레이터는 크게 두 부분으로 나뉘는데, 모터의 축에 결합되는 회전자와 모터의 하우징에 결합된 고정자로 각각 구성된다.

회전자는 정류자, 코어, 코일 및 샤프트로 구성되어 있으며, 고정자는 자석, 자석마운트 및 스테이터 링, 브러쉬, 브러쉬 홀더, 스프링, 브러쉬홀더 마운트로 구성되며, 세부 구성은 Fig. 3과 같다.

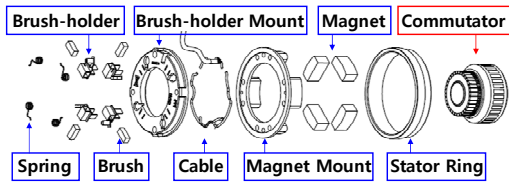


Fig. 3. Schematic diagram of tachogenerator. Red and blue indicate rotor and stator, respectively.

2.3.1 회전자

회전자는 크게 정류자(Fig. 4a)와 샤프트(Fig. 4b), 코일, 코어(Fig. 4d)로 이루어져 있다. 제작방식은 샤프트에 코어를 적층한 뒤, 미세두께의 코일을 일정하게 권선하여 (Fig. 4c) 정류자에 연결하게 된다. 이후 조립된 회전자의 내구성 및 내마모성 향상을 위한 마무리작업(몰딩)을 수행하였다.

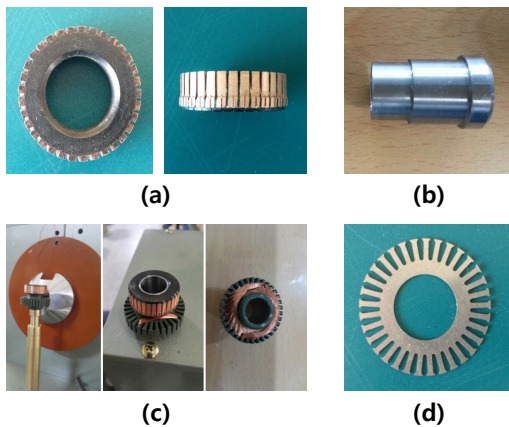


Fig. 4. Configuration of rotor part. (a) Commutator, (b) Shaft, (c) Coil winding and (d) Core

2.3.1.1 정류자

정류자(Fig. 4a)는 등등한 간격으로 배열되어 있는 시편으로 이루어져 있다. 정류자는 코일과 연결되어 코일에서 만들어진 신호를 브러쉬와 기계적 마찰로 전달하는 역할을 해야 하므로, 제작시에는 기계적 강도를 고려하여 설계해야 한다. 따라서 재질은 전기전도성이 우수하고, 마찰계수가 작으며, 내구성이 뛰어난 은(Ag)으로 선정하였다.

2.3.1.2 코어, 코일 및 샤프트

코어(Fig. 4d)는 코일에 권선될 때(Fig. 4c) 물리적 및 전기적 충격을 받기 때문에 코어 슬롯은 내부에 버(burr) 등이 없어야 할 뿐만 아니라, 적절한 자속밀도를 유지해야 하므로 재질, 형상 및 두께에 대한 고려가 필요하였다. 따라서 재질은 철손(core loss)을 줄이기 위하여 무방향성 규소강판으로 선정하였고, 형상은 여러 개의 슬롯을 적층 및 압입하여 제작하였다.

코일의 종류는 실증시험을 통해 조립체의 절연등급을 고려한 미세코일로 선정하였으며, 출력전압을 고려하여 권선횟수는 100턴 이상으로 설정하였다.

샤프트(Fig. 4b)는 DC 모터와의 연결성을 고려하여 내·외부는 연마작업을 통해서 중공축으로 제작하였으며, 그 형상은 코어와 압입하여 고정할 수 있도록 하였다.

2.3.2 고정자

고정자는 자석(Fig. 5a)과 스테이터링, 자석마운트(Fig. 5b), 브러쉬홀더 세트(Fig. 5f)로 구성되어 있으며, 상위조립체에 체결이 가능하도록 제작하였다. (Fig. 5)

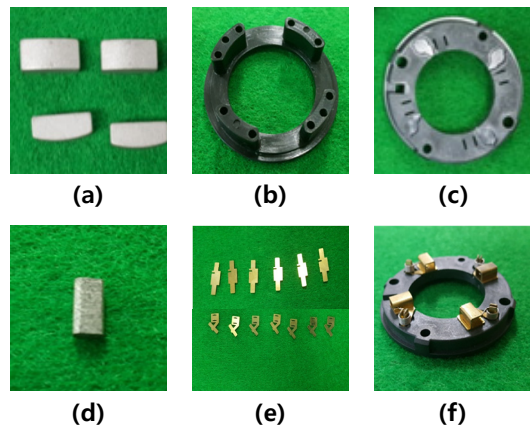


Fig. 5. Configuration of stator part. (a) Magnet, (b) Magnet mount, (c) Brush holder bracket, (d) Brush, (e) Brush holder and (f) Brush holder set

2.3.2.1 자석, 자석마운트 및 스테이터링

자석(Fig. 5a)은 반원의 형태로 스테이터링을 통해 4극 형상으로 구성되어 있으며, 자석마운트(Fig. 5b)와 45도 간격으로 일정하게 배치하였으며, 이에 따른 자속분포는 Fig. 6과 같았다.

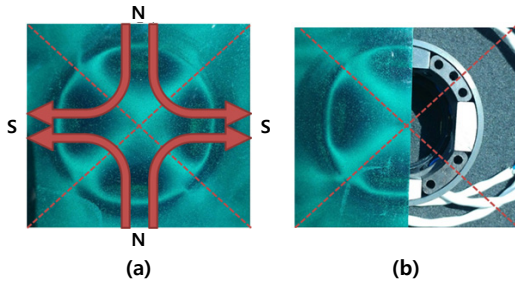


Fig. 6. Magnetic flux distribution. (a) Magnetic field and (b) Layout of magnet

자석마운트(Fig. 5b)는 자성에 영향을 받을 시 출력전압의 정밀도에 영향을 미치게 되므로 비자성의 특성을 가져야 한다. 따라서 자석마운트의 재질을 BMC(Bulk Molding Compound)로 선정하여 누설전류에 대비하였다.

스테이터링은 조립체의 자성을 증폭함과 동시에 얇은 두께로 기계적 강도를 유지해야 하므로 기계구조용 탄소강으로 선정하여 제작하였다.

2.3.2.2 브러쉬 홀더 브라켓

브러쉬 홀더 브라켓(Fig. 5c)은 자석 및 스테이터링이 조립된 자석홀더에 고정되며 브러쉬 홀더를 고정시키는 역할을 한다.

브러쉬 홀더 브라켓의 구조는 내부에 각 브러쉬 홀더를 연결하는 배선을 고정하기 위한 채널을 설계하였으며, 제조방식은 유리섬유가 함유된 산업용 플라스틱을 사출하여 제작하였다.

2.3.2.3 브러쉬, 브러쉬 홀더, 스프링

브러쉬(Fig. 5d)는 회전하는 정류자에서 생성된 전기신호를 도선으로 전달하는 역할을 해야하며, 고정자 및 회전자의 비동심도에 영향을 받지 않아야 하므로 스프링에 의한 일정한 예압을 이용해 접촉을 유지하도록 설계하였다.

개발 제품은 소형이면서도 전기신호 전달에 민감해야 하므로, 전기전도성이 우수한 은(Ag)과 탄소(C)를 혼합

하여 제작하였다. 이때 내구성 및 신호전달 감도를 고려하여 혼합비율을 설정하였다.

브러쉬 홀더(Fig. 5e)는 브러쉬에 대한 상하 고정성이 우수해야 하며 유격 발생 시에는 진동 또는 편마모의 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 설계 및 제작 시 공차관리가 중요하기 때문에, 가공성 및 전기전도성이 우수한 황동재질로 선정하여 제작하였다.

2.3.3 최종완성품

최종적으로 회전자와 고정자가 조립된 타코제너레이터의 형상은 Fig. 7과 같았다.



Fig. 7. Configuration of tachogenerator.

2.4 목표성능 평가

개발제품에 대한 목표성능(Table 1) 충족여부를 확인하기 위하여 Table 2의 시험장비를 활용하여, Fig. 8의 절차로 시험평가를 실시하였다. 시험은 상온(20 ± 5 °C), 상습(50 ± 30 %) 상태에서 실시하였으며, 온도 변동이 필요한 단위온도 변화율은 항온항습챔버 내에서 실시하였다.

Table 2. The list of test instruments

Instrument	Model	Remark
LCR meter	KOKUYO KC-535B	Inductance and Resistance
RPM meter	TONGBAO DT6236B	Rotation Speed
Multi meter	HEWLETT PACKARD HP-34401A	Voltage
Oscilloscope	EZ DIGITAL DS-200	Ripple Voltage
Temperature and Humidity Chamber	NEURONFIT MRU-225-ME	Temperature Drift

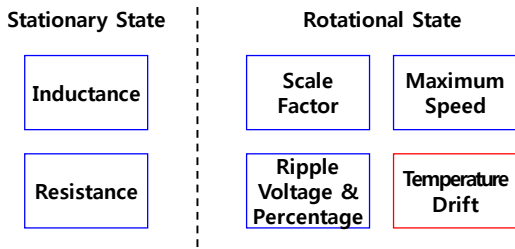


Fig. 8. Schematic diagram of test concept. Red rectangle indicates test in temperature and humidity chamber, and blue rectangles indicate test in room temperature and humidity.

시험은 정지상태 시험과 회전상태 시험으로 나누어 진행하였다. 먼저 타코제너레이터 정지상태에서 인덕턴스와 단자저항을 LCR미터로 측정하였으며, 이후 타코제너레이터 회전상태에서는 회전속도 인자, 리플전압, 리플백분율, 최고속도 후 회전속도 인자, 단위온도 변화율을 측정하였다.

2.4.1 인덕턴스, 단자저항

개발제품의 일반적인 전기적 특성에 대한 평가 항목인 단자 간 인덕턴스는 1,000 Hz에서 32.0 ± 3.2 mH로, 저항은 $135.0 \pm 13.5 \Omega$ 로 각각 목표성능을 설정하였는데, 평가결과 Table 3과 같이 모두 목표성능을 충족하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. General performance of tacho generator

Requirement	Unit	Specification	Result
Inductance	mH	32.0 ± 3.2	31.0
Armature Resistance	Ω	135.0 ± 13.5	147.7

2.4.2 회전속도 인자, 리플전압, 리플백분율

회전속도 인자는 타코제너레이터의 정밀도를 평가하는 지표중 하나로서, 기준 rpm조건 하에서 특정 출력전압의 정확도를 평가하는 지표이며, 리플전압과 리플백분율은 출력전압의 품질을 평가하는 지표이다. 리플전압은 전압이 일정하지 않게 위아래로 변동하는 폭을 의미하며, 최대전압과 최소전압의 차이(Peak to Peak)로 측정한다.

평가방법은 타코제너레이터를 700, 1,000, 2,000 그리고 3,000 rpm으로 회전시켜, 출력전압과 리플전압을

측정하였고, 측정값을 통해 회전속도 인자와 리플백분율을 확인하였다. 회전속도 인자는 rpm 대비 출력전압으로 정의하며, 1,000 rpm 당 9.500 ± 0.475 Vdc 범위 이내여야 한다. 리플 백분율은 각 rpm에서 리플전압 대비 출력전압으로 정의하며, 2 % 이내여야 한다.

측정결과는 출력전압과 리플전압은 Fig. 9와 같았으며, 이를 통해 확인한 회전속도 인자와 리플백분율은 Table 4와 같다.

평가결과, 회전속도 인자는 9.500 ± 0.475 V/krpm 기준에 충족하였으며, 리플백분율은 2 % 이내로 기준에 충족함을 확인하였다.

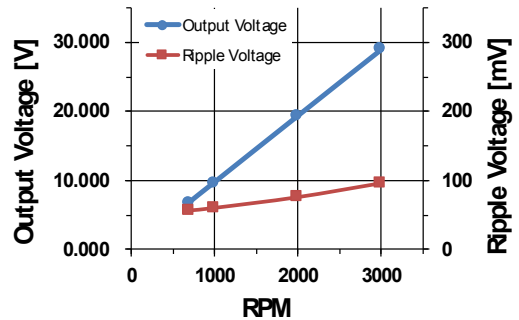


Fig. 9. Output voltage and ripple voltage of tacho generator

Table 4. Scale factor and ripple percentage of tacho generator

rpm	700	1,000	2,000	3,000
Scale Factor (V/krpm)	9.691	9.690	9.686	9.671
Ripple Percentage (%)	0.83	0.62	0.39	0.33

2.4.3 최고속도 후 회전속도 인자

개발제품에 대한 목표성능에서 요구되는 최고속도는 8,000 rpm으로서, 최고속도 이후 기계적 결함이 없이 성능을 발휘하여야 한다.

평가방법은 타코제너레이터를 8,000 rpm으로 1분간 회전 후, 회전속도 인자를 충족하는지 여부를 판단하였다.

측정결과는 Fig. 10과 같았으며, 이를 통해 확인한 회전속도인자는 Table 5와 같다.

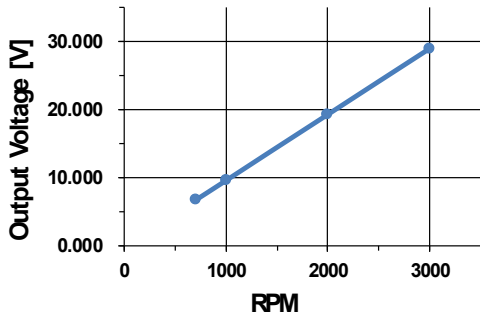


Fig. 10. Output voltage after maximum speed test

Table 5. Scale factor after maximum speed test

rpm	700	1,000	2,000	3,000
Scale Factor (V/krpm)	9.689	9.668	9.684	9.678

평가결과, 회전속도 인자는 모두 9.500 ± 0.475 V/krpm 의 기준에 충족함을 알 수 있었다.

2.4.4 운용온도 및 단위온도 변화율

개발제품은 적용 대상장비의 운용에 적합하여야 하므로, 일반적인 무기체계 운용 온도조건인 $-32 \sim 80$ °C에서 성능이 발휘되어야 한다.

따라서 운용온도 및 그에 따른 단위온도 변화율을 통해 환경적 적합성 평가를 수행하게 되는데, 개발제품을 -32 °C에서부터 80 °C까지 각각의 지정된 온도에서 30분간 저장 후 회전속도 인자를 측정 및 비교하여 온도변동수준을 평가하였다.

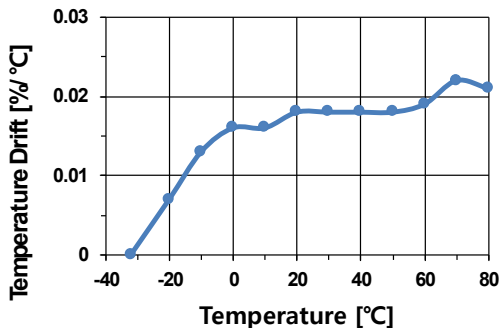


Fig. 11. Temperature drift of tacho generator

개발제품에 대한 온도변동성 평가결과는 Fig. 11과 같았으며, 측정결과 운용온도 구간에서 모두 0.03 %/°C 이내로 목표성능을 충족함을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 대공무기체계의 회전발사대에 적용되는 서보모터 제어를 위한 타코제너레이터의 개발내용을 담고 있다.

개발목표성능은 현재 운용 중인 타코제너레이터의 제원 및 요구성능을 토대로 회전속도 인자와 기타 환경요소 등으로 도출하였으며, 일반적인 전기적 특성, 최고속도 후 회전속도 인자, 운용온도 및 단위온도 변화율 등에 대하여 평가를 진행하였다.

평가결과, 일반적인 전기적 특성인 인덕턴스는 32.0 ± 3.2 mH의 기준을 충족하는 31.0 mH, 단자저항은 135.0 ± 13.5 Ω의 기준을 충족하는 147.7 Ω을 나타내었다. 또한 회전속도 인자는 9.500 ± 0.475 V/krpm의 기준에 대하여 일반운용 및 최고속도 이후 운용 조건 하에서 모두 충족하고 있었다.

아울러 적용 장비에 대한 환경적 적합성은 단위온도 변화율을 통해서 확인하였는데, 모두 0.03 %/°C 이내로 온도특성이 우수함을 알 수 있었다.

따라서 개발제품은 현재 운용 중인 대공무기체계의 회전발사대 구성품으로 적용이 가능함을 확인 할 수 있었으며, 개발과정 동안 확보한 설계기술, 제작방법, 시험평가 절차 등을 토대로 군사용 또는 민수용으로 다양하게 적용 할 수 있는 기반기술을 확보하였다. 아울러 이러한 기술력을 바탕으로 향후 유사 제품의 설계 및 제작에 도움이 될 것으로 기대한다.

References

- [1] K.H. Kim, "Encoder and Resolver", The Korean Institute of Power Electronics, Vol.8, Iss.3, pp. 50-53, 2003.
- [2] J.-W. Hwang, S.-P. Mun, Y.-M. Kim, "The Method on High-Resolution Position Estimation of PMSM Using Hall-Effect Position Sensors", The Korean Institute of Electrical Engineers, Iss.10, pp. 47-50, 2012.
- [3] EMERSON, An Engineering Guide to Position and Speed Feedback Devices for Variable Speed Drives and Servos, p. 12-20, Control Techniques, 2011.

- [4] Norman S. Nise, "Control systems engineering", 6th edition, Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [5] J.-S. Choi, W.-S. You, K.-M. Cho, "Motor Speed and Revolution Angle Detection Using A Sinusoidal AC Tacho - Generator", The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol.34, Iss.6, pp. 656-666, 1997.
- [6] J.-S. Choi, K.-M. Cho, "Motor Speed Detection Algorithm Using Three Phase Taco-Generator", The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol.32, Iss.7, pp. 278-281, 1995.
- [7] M. C. Ozgenel, G. Bal, D. Uygun, "Design and application of a novel high precision and low cost electronic tachogenerator for sensor-based brushless direct current motor drivers", Review of Scientific Instruments, Vol.88, Iss.3, 035005, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4978798>

조 성 용(Sung-Yong Cho)

[정회원]



- 2011년 2월 : 인하대학교 식품영양학과 (이학사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 식품공학, 식품영양

변 기 식(Kisik Byun)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한양대학교 전자통신 컴퓨터공학부 (공학사)
- 2015년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

마이크로파 회로, 국방품질경영(전자/통신 분야)

박 준 영(Jun Young Park)

[정회원]



- 2004년 2월 : 수원대학교 기계공학과 (공학사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : 태창엔지니어링 차장

<관심분야>

품질경영, 일반기계