

내연기관 구동 비상용 브러시리스형 동기발전기의 과도특성 개선

Improvement of Transient Characteristics of Brush-less Type Synchronous Generator for Emergency Driven by Internal-Combustion Engine

안 영 주[†]
(Young-Joo An)

Abstract - A brush-less type synchronous generator is driven by an internal-combustion engine that is used for emergency source. This kind of generator has to maintain output voltage in a range of some degree under the abrupt load irregular conditions such as a full load trip. This paper suggests a suppression method of increasing the output voltage over the rating. Automatic voltage regulator detects excessive rising of output voltage of the generator and supplies the signals to a switch installed in the rotating exciter through the photo-coupler. The current of main field rapidly decreases by additional resistor of the main field circuit. Therefore, the output voltage of the generator is maintained effectively. The experimental results verified that the excessive value of the output voltage is limited in the range of 7% of the rated voltage.

Key Words : Synchronous generator, AVR, Output voltage, Main field

1. 서 론

최근 10수 년 동안 산업의 발전 및 생활 수준의 향상과 더불어 꾸준히 전력 수요가 증가하고 있으며, 동·하계의 특정기간 동안은 전력 예비율이 급감하는 것이 현실이다. 일부 전력 수용가에서는 전력의 효율적인 사용을 위해 비상 발전기를 설치함은 물론이고, 여러 분야에서 안정한 전력 공급을 위해 비상 발전기의 수요가 증가하고 있다.

비상용 발전기 용도로는 대부분 엔진으로 구동되는 브러시리스형 동기발전기(이하 동기발전기로 나타낸다.)가 사용되고 있다. 동기발전기는 출력전압을 일정하게 유지하기 위하여 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator)를 사용한다.

자동전압조정기는 동기발전기 보조계자의 여자전류를 조정하여 주계자 권선에 가해지는 전압을 제어하고, 제어된 주계자 전압에 의한 주계자 전류의 크기에 따라 동기발전기의 발전전압을 일정하게 유지하는 역할을 한다. 기존의 아날로그 제어방식을 적용한 자동전압조정기는 위상제어 정류방식이며, 전력 스위칭 소자로 사이리스터를 사용하기 때문에 신뢰성이 높고 가격이 저렴하기 때문에 가장 많이 사용되고 있지만 빠른 제어응답을 기대하기 어려워 부하 급변 시 특히 큰 부하가 일시에 차단되는 경우 상당한 시간 동안 발전기 출력전압에 과도한 상승을 초래하고, 병렬운전과 같은 타시스템과의 연계가 곤란한 단점을 가지고 있다[1-5]. 이에

비해 디지털 제어방식의 자동전압조정기는 기본의 아날로그 방식에 비해 정밀한 출력전압 제어가 가능하고, 과도응답 특성이 우수하여 근래에 이르러 꾸준히 연구 개발하고 있는 실정이다[2-5].

그러나 이들 자동전압조정기는 전 부하 차단과 같은 급격한 부하 변동에 대해서 발전기의 출력전압이 과도하게 상승하는 특성을 갖고 있다. 일반적인 부하 인가에 대해서는 비교적 양호한 성능을 보이는 반면 전 부하 차단과 같은 큰 부하 변동에는 발전기를 구동하는 원동기의 속도 상승과 더불어 발전기의 주계자 권선에 축적된 자기에너지로 인하여 과도한 전압 상승을 초래한다. 특히 역률이 낮은 지상부하의 경우에는 발전기의 전기자 전류가 주계자 자속에 대해 감자 작용을 하므로 이를 보상한 계자전류를 필요로 하고, 또한 동기발전기의 주계자 회로는 인덕턴스가 매우 크기 때문에 계자회로에 저장된 자기에너지가 증가하고, 증가된 자기에너지는 발전기의 전 부하 차단과 같은 조건에서 출력전압 복귀를 매우 느리게 하고, 심지어 정격전압의 10[%] 이상 범위까지 과도한 전압을 발생시킨다.

본 논문에서는 동기발전기 주여자와 주계자 사이에 반도체 스위치와 저항을 설치하고, 정상 시에는 주여자의 전원을 직접 계자 권선에 공급하지만, 발전기 출력전압이 과도하게 상승할 경우를 검출하여 반도체 스위치를 동작시켜 주계자 권선에 축적된 자기에너지를 빠르게 흡수하여, 결과적으로 주계자 자속을 빠르게 감소시켜 동기발전기의 과도한 전압 상승을 억제한다. 사용한 자동전압조정기는 지적-PID(Intelligent PID, i-PID) 방식을 채용한 디지털 방식으로 일반적인 과도특성을 유지함은 물론이고, 회전계자형 발전기의 회전자에 직접 추가 스위치와 방전저항을 설치하여 시험하고, 실험을 통하여 그 타당성을 검증한다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail : anyj@pknu.ac.kr

접수일자 : 2016년 10월 31일

최종완료 : 2016년 11월 18일

2. 제안한 동기발전기의 여자시스템

그림 1은 일반적으로 사용되고 있는 브러시리스형 동기발전기의 여자시스템을 나타내고 있다. 주발전기는 회전자형이며, 회전자는 내연기관에 의해 구동된다.

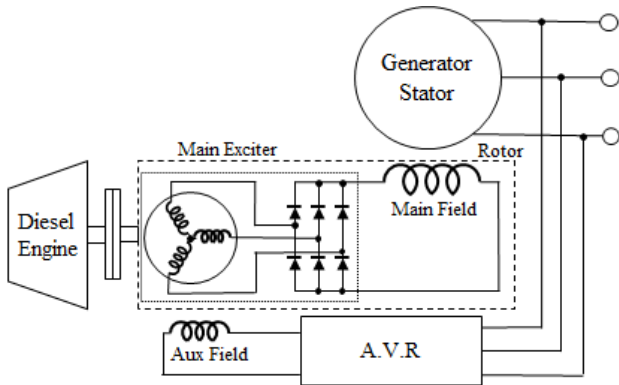


그림 1 브러시리스형 동기발전기의 여자시스템
Fig. 1 Exciter system for the brush-less type synchronous generator

동기발전기에서는 주발전기의 전압이 자동전압조정기(A.V.R)을 통해 보조계자 권선에 여자전류를 공급한다. 이 여자전류에 의해 회전자에 설치된 주계자 발전기에 전압이 유기되고, 브리지 정류기를 통해 직류로 변환되어 주계자에 인가된다. 동기발전기의 주계자 회로는 주여자 발전기-브리지 정류기-주계자 권선으로 구성되어 있다. 주계자 권선은 전력발생에 필요한 자속을 발생하기 위한 코일이며, 시험에 사용된 동기발전기는 주계자의 인덕턴스가 3[H]이며, 저항은 7[Ω]으로 상당히 큰 시정수를 갖고 있다.

동기발전기의 출력전압이 상승하면 외부에 설치된 자동전압조정기는 제어기에 의해 보조계자 권선에 인가하는 전압을 빠르게 감소시켜 보조계자 권선에 흐르는 전류를 줄이지만, 주계자의 큰 인덕턴스에 저장된 자기 에너지는 큰 시정수로 인하여 전류 감소가 매우 느리게 되고, 이 때문에 출력전압의 급상승을 초래한다.

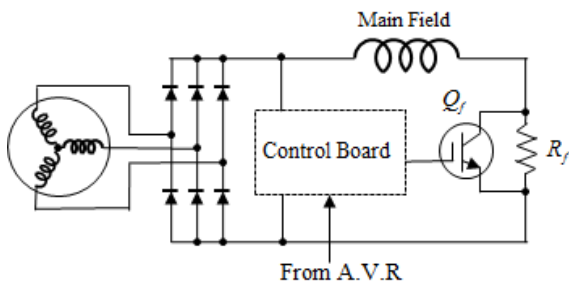


그림 2 수정된 주계자 회로
Fig. 2 Modified circuit for the main exciter

본 연구에서는 그림 2와 같이 주계자 회로에 추가로 저항(R_f) 및 스위치(Q_f)를 설치한 회로를 제시한다. 저항은 주계자 회로의 전기적 시정수를 감소시키고 동시에 자기에너

지를 흡수하여 주계자 전류의 빠른 감쇄를 유도한다. 스위치, Q_f 는 자동전압조정기의 신호에 의해 차단되며, 결과적으로 주계자 회로의 시정수를 줄여서 전류 감소를 빠르게 하고, 급격한 동기발전기의 출력전압 상승을 억제한다.

추가로 설치할 계자저항은 저항 값이 클수록 시정수가 크게 감소하여 더 빠른 전류감쇄가 이루어지므로 과도전압 상승을 더욱 더 억제할 수 있으나, 급격한 전류감소는 설치된 스위치의 전압스트레스를 증가시키기 때문에 적절한 값으로 선정되어야 한다.

주계자 회로의 시정수는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{3}{7} = 0.429 [s] \quad (1)$$

추가할 계자회로의 저항은 기존 회로의 과도 응답으로부터 대략적으로 정할 수 있다.

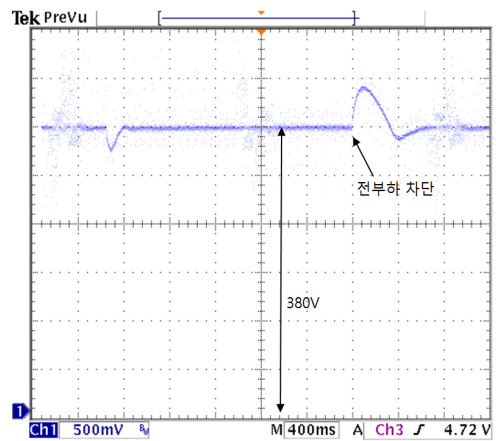


그림 3 전 부하 차단 시 출력전압의 실효치 파형
Fig. 3 RMS waveform of output voltage when the full load is broken

그림 3은 기존의 회로를 적용할 경우의 발전기 출력전압에 대한 실효치 파형이다. 그림으로부터 전 부하 차단 시에 출력전압의 과도기간은 약 560[ms] 범위에 있음을 알 수 있고, 계자저항을 추가할 경우에 원하는 과도기간은 100[ms] 정도로 설정한다. 이 값은 몇 번의 반복적인 실험을 통하여 정하였다. 그러므로 추가할 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R_f = \frac{3}{0.1} - 7 = 23 [\Omega] \quad (2)$$

저항의 정격은 주계자 회로의 인덕터에 저장된 자기에너지로부터 설정이 가능하다. 자기에너지는 인덕턴스와 인덕터에 흐르는 전류로부터 계산되며, 시험용 발전기의 정격 부하 시 주계자 전압과 전류는 각각 22[V]와 3.14[A]이다.

이로부터 저장되는 자기에너지는

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} * 3 * 3.14^2 = 14.8 [J] \quad (3)$$

또한 저장된 에너지는 시정수 범위에서 소모되는 것이 효과적이므로, 필요한 저항의 정격은 근사적으로

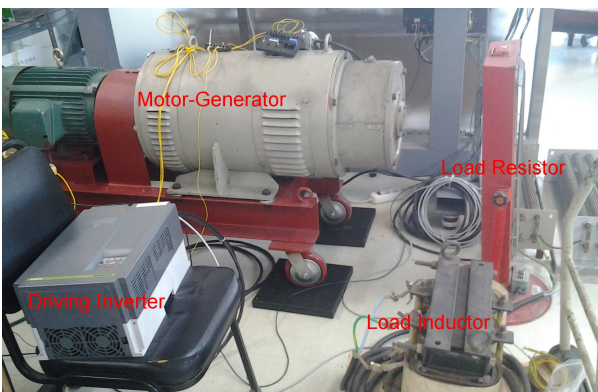
$$14.8/0.1 = 148 [W] \quad (4)$$

이상이면 가능하다.

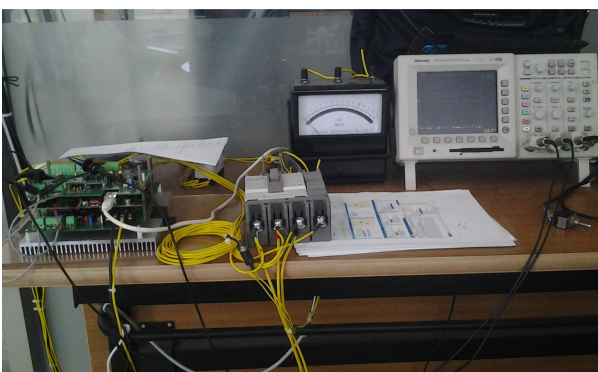
실험에 사용된 저항은 이러한 사항을 고려하여 20[Ω], 150[W] 급을 적용한다.

3. 실험 결과

그림 4는 실험 장치에 대한 사진이다. 실험 장치는 3상 유도전동기와 발전기를 결합하고, 발전기는 인버터를 이용하여 정격속도에서 운전된다. 동기발전기의 정격은 3상 380[V], 10[KW], 1800[rpm]이다. 부하저항은 핀타입 열선저항기를 사용하고, 뒤진 역률을 구성하기 위하여 저항과 직렬로 인덕터를 연결한다.



(a)



(b)

그림 4 실험 장치 (a) 전동-발전기, (b) 자동전압 조정기
Fig. 4 Experimental setup (a) motor-generator, (b) A.V.R.

핀타입 저항기는 상별로 6[Ω], 부하인덕터의 리액턴스는 9[Ω]이다. 저항과 리액턴스는 직렬로 연결되어 3상 Y-결선

부하를 구성한다. 이 경우 부하전류는 약 20.34[A], 역률은 0.55이다. 발전기의 정격전류는 19[A]이며, 역률이 정격 0.8 보다 낮으므로 충분히 계자전류의 영향을 고려할 수 있다. 자동전압조정기의 제어기는 Labview 프로그램을 이용하여 i-PID 제어기로 구성하였으며, National Instrument 사의 FPGA 보드인 sbRio 9636 보드를 통해 실현하였다.

그림 5는 i-PID 제어를 이용한 자동전압조정기를 사용하여 정격 부하전류를 적용한 경우, 전 부하 차단 시 동기발전기의 출력전압을 측정된 것이며, 위쪽은 실효치, 아래쪽은 순시치 파형을 나타내고 있다. 그림 5로부터 출력전압은 정격 출력전압에 대하여 약 14[%]까지 급상승하며, 과도시간은 약 560[ms] 정도 되는 것을 알 수 있다.

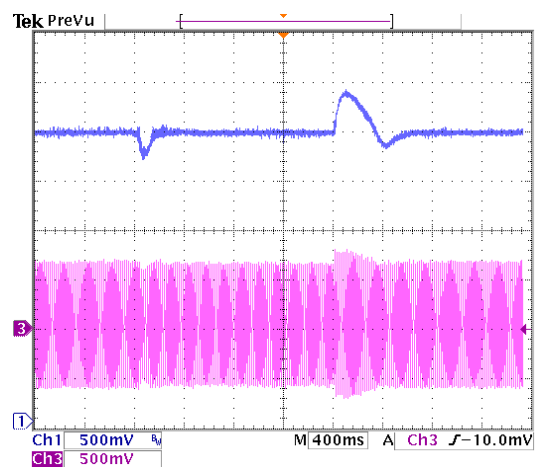


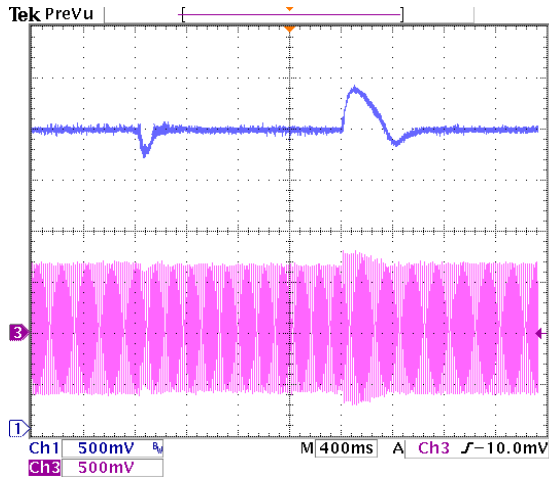
그림 5 i-PID 제어를 사용한 AVR의 과도 전압 특성
Fig. 5 Transient characteristic of the generator using i-PID controller in AVR

그림 6은 동기발전기의 주계자 회로에 기존의 방법을 적용한 경우와 본 논문에서 제안한 방법을 적용한 경우의 출력전압을 측정된 것이다.

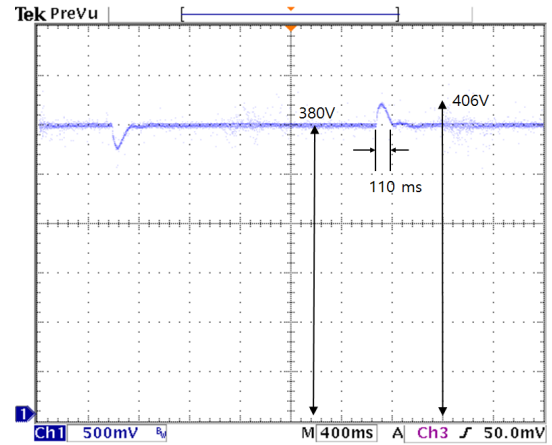
기존의 방식으로 한 경우, 출력전압은 약 14[%]까지 상승하고, 과도기간 약 560[ms]를 보이고 있는 반면, 제안한 방법은 출력전압이 약 7[%], 과도기간은 약 110[ms]이다. 제안한 방법이 기존의 방식에 비하여 출력전압은 50[%], 과도기간은 80[%] 정도로 개선되는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 제안한 방식에서 계자저항이 각각 20[Ω], 10[Ω] 및 5[Ω]일 때의 출력전압의 실효치 변화를 측정된 것이다.

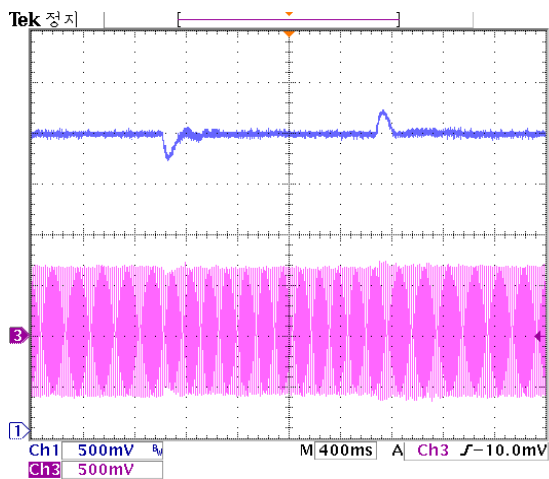
그림 7로부터 알 수 있듯이 계자회로에 추가된 저항이 20[Ω]인 경우 출력전압 상승은 7[%], 10[Ω]인 경우는 10[%], 5[Ω]인 경우는 11[%]로 나타나고, 과도기간은 각각 110[ms], 220[ms] 및 520[ms] 정도이다. 저항이 증가할수록 출력전압의 상승이 억제되고, 과도기간도 짧게 되는 것이 확인된다. 이러한 결과로부터 저항을 증가시키면 보다 나은 효과가 기대되지만, 주계자 회로에서 급격한 계자전류의 감소 변화로 저항에는 순간적으로 높은 전압이 발생하고, 이 전압은 스위치의 스트레스를 증가시키므로 적절한 타협이 요구된다.



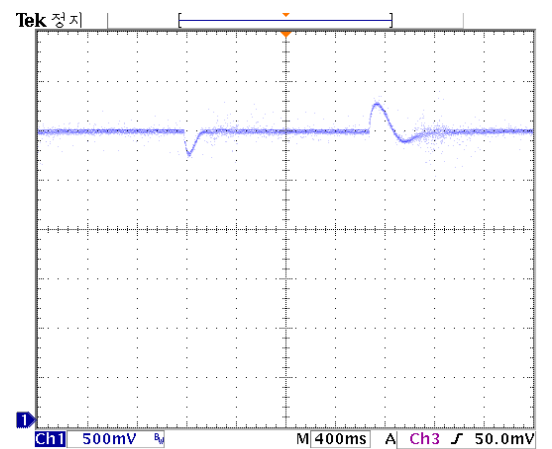
(a)



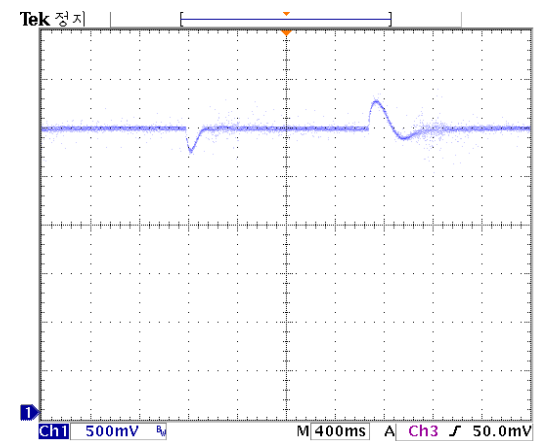
(a)



(b)



(b)



(c)

그림 6 전 부하 차단 시 출력전압 실효치 파형 (a) 기존의 방법, (b) 제안한 방법

Fig. 6 RMS waveforms of output voltage when the full load is broken (a) traditional method, (b) proposed method

4. 결론

본 논문에서는 엔진구동형 동기발전기에 있어서 전 부하 차단과 같은 급격한 부하 변동 시에 출력전압의 과도한 상승을 억제하기 위한 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 주계자 회로에 스위치와 저항을 추가로 설치하고, 외부의 자동전압조정기에서 출력전압의 과도 상승 시 검출된 신호에 의해 동작시켜 주계자의 자기에너지를 빠르게 감소시키고 결과적으로 출력전압의 상승을 억제시키는 것이다. 시험을 위하여 인버터 구동 유도전동기와 직결한 10[KW] 동기발전기 시스템에 이 방법을 적용하고 검토하였다. 전 부하 차단 시 출력전압은 정격 출력 전압의 약 7[%] 범위까지 상승하며, 전압이 변동하는 과도기간도 110[ms]로 되며, 이러한 보상회로가 없는 기존의 방식에 비하여 과도전압은 약 50[%] 정도, 과도기간은 약 80[%] 까지 억제하고 있다. 또한 제시된 방

그림 7 계자저항 값의 변화에 따른 출력전압 실효치 파형 (a) 20 [Ω], (b) 10 [Ω], (c) 5 [Ω]

Fig. 7 RMS waveforms of output voltage for the variation of the value of field resistor (a) 20 [Ω], (b) 10 [Ω], (c) 5 [Ω]

식은 자동전압조정기에 사용된 i-PID제어기 파라미터를 수정하지 않고서도 잘 조합을 이루어 동작하고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

‘이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음’

References

- [1] Sang-Hoon Park, Jae-Sung Yu, Sang-Seuk Lee, and Chung-Yuen Won, “Output voltage control of synchronous generator for ships using a PMG type digital AVR”, International Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, pp.417-421, 2009.
- [2] Dong-Hee Lee, Tae-Hyoung Kim, and Jin-Woo Ahn, “Control of digital AVR in stand alone generator for improved dynamic characteristics”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1978-1982, 2008.
- [3] Sang-Hoon Park, Sang-Seuk Lee, Jae-Sung Yu, Su-Won Lee, and Chung-Yuen Won, “Voltage Control of a Synchronous Generator for Ship using a Compound Type Digital AVR”, Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58P, No. 4, pp. 397-403, 2009.
- [4] Dong-Hwan Yu, Sang-Hooh Park, Chung-Yuen Won, Jae-Sung Yu, Sang-Seuk Lee, and Sung-Joon Ahn, “Voltage Control of Synchronous Generator for Ships using a PMG Type Digital Automatic Voltage Regulator”, Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 14, No. 1, pp. 38-45, 2009.
- [5] Nirgudkar Saurabh S., and Sarode Uday B., “Implementation of Digital Automatic Voltage Regulator (AVR) for small laboratory alternator”, International Conference on Energy Systems and Applications, pp. 338-341, 2015.

저 자 소 개



안 영 주 (安 永 珠)

1986년 부경대학교 전기공학과 졸업.
1988년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년 3월 ~ 현재 부경대학교 공과대학 제어계측공학과 교수. 현 본 학회 정회원.