

터빈-발전기 Governor Droop의 그래프와 비례식을 통한 특성 고찰

(Understanding Governor Droop of Turbine-Generator through Graph and Proportional Expression)

이상중*

(Sang-Joong Lee)

Abstract

This paper presents a simpler calculation of the generator load sharing according to the change of system frequency and the droop setting of turbine-generator governor. The author firstly draws a graph based on the generator operation at rated MW output and normal frequency, and secondly, builds a proportional expression using the graph in order to obtain the solution in a simpler way rather than using conventional mathematical calculation, to provide the readers with an easier understanding of the droop setting of turbine-generator governor.

Key Words : Droop Setting, Turbine-Generator Governor, Generator Load Sharing, Proportional Expression

1. 서 론

많은 문헌들이 터빈발전기 조속기(Turbine-generator governor)의 속도조정률(Droop)과 주파수 변동에 따른 발전기의 출력변동에 대하여 훌륭하게 설명하고 있다[1-6]. 그러나 속도조정률 대하여 오랫동안 강의 하면서 느낀 점은, 계통감각과 발전소 실무경험이 전 무한 학생들에게 속도조정률이란 용어는 개념을 잡기

에 매우 생소하며, 속도조정률과 주파수 변동에 따른 발전기의 출력변동을 제대로 이해하는데 적지 않는 시간을 소모하고 있음을 알 수 있었다.

본 논문은 조속기 속도조정률의 역할과 필요성에 대하여 실무적 측면에서 좀 더 쉽고 구체적으로 설명하고, 속도조정률에 대한 기존의 정의를 바탕으로 간단한 그래프와 비례식을 세움으로써, 주파수 변화에 따른 발전기의 출력변화를 쉽게 계산할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 실제 계통에 최대한 가까운 상황과 데이터를 사례연구로 제시하여 실무감각을 익히는데 도움을 주고자 하였다.

2. 조속기와 속도조정률

계통수요 변동시 발전기의 제어시스템이 연료량을

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
* Main author : Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Electrical Engineering, Professor, PE
Tel : 02-970-6411, Fax : 02-978-2754
E-mail : sjlee@seoultech.ac.kr
접수일자 : 2012년 11월 14일
1차심사 : 2012년 11월 16일, 2차심사 : 2013년 1월 2일
심사완료 : 2013년 1월 8일

조절하여 계통수요에 알맞은 전력을 발생함으로써, 항상 터빈 등 기계의 회전속도를 일정하게 유지하도록 제어하는 장치를 조속기(調速機, Speed Governor)라 한다. 발전기의 경우 터빈의 회전속도를 조절하는 방식에는 Load Limit 방식과 Governor Free 방식이 있다. Load Limit 방식은 발전기의 회전속도(또는 출력량)를 일정하게 고정해 두는 것을 말하며, 주파수 변화 등 전력계통 상황에 따라 발전기의 회전속도가 자동으로 제어되도록 하는 방식을 Governor Free 방식이라고 한다[1]. 계통 주파수의 변화에 따라서 조속기가 동작할 때, 주파수 변화분(터빈 회전속도의 변화분)과 발전기 출력의 변화분과의 비를 백분율로 나타낸 것을 속도조정률(Droop, 速度調整率, Speed Regulation Rate)이라고 하며, 속도조정률은 수차나 터빈의 조속기 특성을 나타내는 지표로 이용된다. 즉, 속도조정률 (%)만큼의 주파수가 변했을 때 발전기 출력이 '0'에서 정격출력까지 변화되는 것을 나타낸다[1].

A,B,C, ...K, ... 등 다수 발전소의 발전기가 병렬운전 중인 전력계통에서, 예를 들어 K 발전기가 비상정지되어, 계통전체에 Ψ MW만큼의 발전량이 부족하게 되는 상황이 발생할 경우, 발전량과 소요부하 간의 불균형은 주파수 저하를 초래하게 되고, 이를 복구하기 위하여 Governor Free Mode로 정상운전 중인 발전기들의 순동예비력(Spinning Reserve, Appendix)으로 우선 증발하게 된다.

부족한 발전량을 특정한 발전소, 예를 들어 A 발전기가 전량 감당하도록 할 수도 있겠으나, A 발전기가 Ψ MW만큼의 출력을 증발할 여유가 없을 수도 있고, A 발전기 혼자서 Ψ MW만큼의 출력을 증발하자면 시간이 많이 걸려 계통 주파수 복구가 그만큼 늦어질 수도 있다. 또한 출력 증발량이 클수록 그만큼 발전소 제어계통의 동요가 커지고 발전기, 터빈, 보일러 등 발전설비의 전기적, 기계적 피로도 커진다. 특히 연료의 연소로 발전하는 화력발전소의 경우, 연료 주입량의 급격한 증가, 스팀/가스 유량 및 온도의 급변 등으로 인해 연소장치, 터빈, 배관 등에 발생하는 열 스트레스가 불가피해 진다. 이에 따른 제어계통의 불안정, 열피로의 누적은 사고 발생확률을 높이고 발전소의 수명

단축을 초래하게 된다.

그래서 발전소측 실무자들은 설비 보호차원에서 될 수 있으면 Governor Free 운전을 안하려하지만, 계통 전체의 안정운용을 관장하는 현재 KPX의 '전력시장 운영규칙'에는 '발전회원은 Governor Free 운전으로 계통주파수 유지에 적극 협조하여야 한다.'는 의무조항이 삽입되어 있다[2]. 과거 통합 한전 시절에는 Governor Free 운전 실적을 사업소의 경영평가 조항에 포함시키는 방법 등으로 발전소들의 Governor Free 운전을 유도하기도 하였다.

속도조정률이란 K 발전기의 탈락으로 빚어진 Ψ MW의 발전량 부족을, A,B,C,... 등 Governor Free Mode로 정상운전 되고 있는 발전소들이 적절히 나누어 분담함으로써, 발전출력의 급변에 따른 각 발전소 제어계통의 동요와 전기, 기계, 열적 피로를 완화하면서, 계통 주파수를 조속히 복구시키고자, 각 발전소들의 용량과 특성에 맞도록 터빈발전기 조속기에 주어지는 값이다.

각 발전소의 특성을 고려하여 속도조정률의 크기도 달라지는데, 발전소의 출력변화가 용이하고, 열적피로가 비교적 적은 수력/내연(Diesel)은 3~4% 정도, GT는 4~5%, 기력은 5~6% 정도로 주어진다[2]. 발전소 또는 계통의 상황에 따라 속도조정률은 조정되기도 한다.

부하측 사고로 인해 부하가 급감하는 수급불균형이 발생할 경우도 Governor Free 운전 중인 발전기들은 주어진 속도조정률에 따라 출력을 감발하게 된다.

3. 속도조정률과 주파수 변화에 따른 발전기 출력변화 계산 사례

속도조정률과 주파수 변화에 따른 발전기의 출력변화를 계산하는 기존의 한 예제를 살펴보자.

사례연구 1. 정격출력 50,000kW의 수차 발전기가 60Hz의 전력계통에 접속되어 전부하, 정격 주파수로 운전 중에 있다. 여기서 이 계통에 접속되어 있던 일부의 부하가 갑자기 차단되어 주파수가 60.3Hz로 상승하였다고 하면 발전기 출력 kW는 어떻게 되겠는가? 단 수차발전기의 속도조정률은 3%라 하고 조속

기 특성은 직선이라고 한다[3-4].

풀이 : 속도조정률의 일반식은

$$\delta = \frac{\left(\frac{N_1 - N_2}{N_N}\right)}{\left(\frac{P_2 - P_1}{P_N}\right)} \times 100 \quad (1)$$

이다. 제의에 따라

$$\delta = 3\%, \quad P_N = P_2 = 50,000 [kW] \quad (2)$$

회전수는 주파수와 비례하므로 k를 비례상수라 하면

$$\begin{aligned} N_N &= N_2 = 60k \\ N_1 &= 60.3k \end{aligned} \quad (3)$$

를 위 식에 대입하면

$$\begin{aligned} 3 &= \frac{\left(\frac{60.3k - 60k}{60k}\right)}{\left(\frac{50,000 - P_1}{50,000}\right)} \times 100 = \frac{50,000(60.3k - 60k)}{60k(50,000 - P_1)} \times 100 \\ &= \frac{25,000}{50,000 - P_1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\therefore P_1 = 41,666 [kW] \quad (5)$$

즉 주파수가 60.3Hz로 올라간 후의 발전기 출력은 41,666kW가 된다.

4. 그래프를 통한 속도조정률의 고찰

4.1 정격출력 1기 발전기의 경우

발전소는 대개 정격출력에서 최상의 효율을 낼 수 있도록 설계되고 전력계통은 정격 주파수로 유지되는 것이 일반적이다. 우리나라 전력계통은 세계에서 가장 우수한 주파수 품질을 보유하고 있어 평상시 거의 완벽한 정격주파수 60Hz를 유지하고 있다.

속도조정률은 속도조정률 (%)만큼의 주파수가 변

했을 때 발전기 출력이 '0'에서 정격출력까지 변화되는 것을 나타내므로,[1] 사례연구 1과 같은 정격출력 $P_N = 50 MW$ 및 정격 주파수 $f_N = 60 Hz$ 의 경우 속도조정률의 정의에 따라 그림 1과 같은 속도조정률 특성 그래프를 그릴 수 있다[3-7].

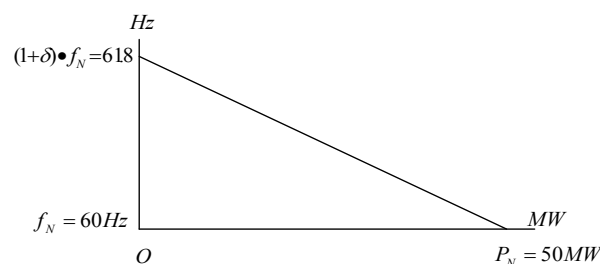


그림 1. 정격 50MW, 60Hz 발전기의 3% Droop 특성곡선

Fig. 1. 3% droop characteristic curve for rated 50MW output at normal frequency 60Hz

이 그래프를 이해하면 정격 운전 중인 발전기의 주파수에 대한 출력변화를 쉽게 계산할 수 있다. 60.3Hz에서의 발전기 출력을 $P_{60.3}$ 라 하면 그림 2에서 다음의 비례식이 성립한다.

$$P_{60.3} : 50 = (61.8 - 60.3) : (61.8 - 60) \quad (6)$$

내항급=외항급 관계를 이용하여 식 (6)을 풀면 :

$$P_{60.3} = 50 \times \frac{61.8 - 60.3}{61.8 - 60} = 41.66 [MW] \quad (7)$$

로 (5)와 동일한 해를 간단히 얻을 수 있다.

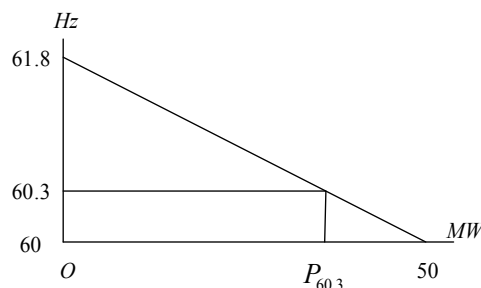


그림 2. 정격 50MW, 3% Droop 발전기의 60.3Hz 출력
Fig. 2. Generator MW at 60.3Hz and 3% Droop

그림 1, 2를 이용하면 (1)과 같은 복잡한 공식을 사용하지 않고도 계산이 더욱 쉬워진다.

4.2 임의출력 1기 발전기의 경우

발전기가 정격 주파수에서 정격출력 P_N 이 아닌 임의의 출력 P_X 로 운전되는 경우의 속도조정률 특성곡선은 그림 3과 같이 이동되지만, [3-7] 계산 요령은 동일하다.

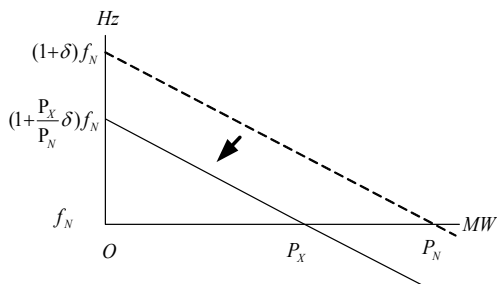


그림 3. δ % 터빈-발전기 Droop 특성곡선의 평행이동
Fig. 3. Shifted droop characteristic curve for arbitrary MW output at normal frequency

사례연구 2 : 정격출력 28.8MW, 속도조정률 3%의 춘천 수력발전소 #1 수차 발전기가 계통에 병입되어 75% 부하로 운전 중에 있다. 계통 사고로 주파수가 갑자기 59.7Hz로 떨어질 경우 발전기 출력 MW는?

풀이 : 정격 28.8MW, 속도조정률 3%의 수차 발전기가 75% 부하로 운전 중일 경우 속도조정률 특성 그래프는 그림 4와 같다[3-7].

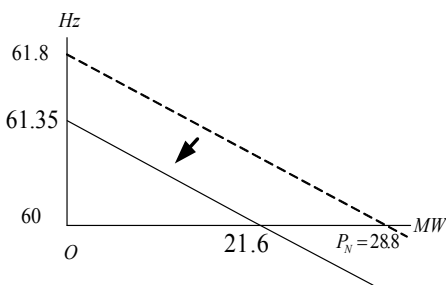


그림 4. 정격 28.8MW, 3% Droop 발전기의 75% 출력 운전시 Droop 특성곡선
Fig. 4. Shifted droop characteristic curve under 21.6MW output at normal frequency

59.7Hz에서의 발전기 출력을 $P_{59.7}$ 라 하면 그림 5에서 다음의 비례식이 성립한다.

$$P_{59.7} : 21.6 = (61.35 - 59.7) : (61.35 - 60) \quad (8)$$

내항곱=외항곱 관계를 이용하여 식 (8)을 풀면 :

$$P_{59.7} = 21.6 \times \frac{61.35 - 59.7}{61.35 - 60} = 26.4 [MW] \quad (9)$$

가 된다.

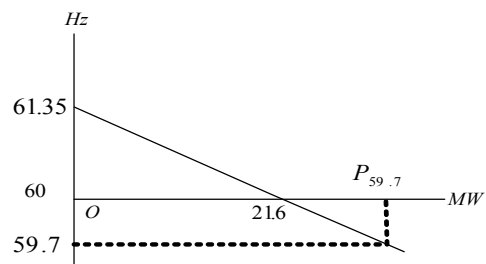


그림 5. 21.6MW, 3% Droop, 정격주파수 운전 중인 춘천 #1의 59.7Hz에서의 출력변화
Fig. 5. MW variation at 59.7Hz of #1 Chunchon operating with 21.6MW and 3% droop at normal frequency

4.3 임의출력 3기 도서(島嶼) 발전기의 경우

사례연구 3 : 울릉도는 2012년 10월 현재 남양내연 10,500kW, 저동내연 8,000kW, 추산수력 700kW, 합계 19,200kW의 발전설비를 가지고 있다[8-9]. 추산수력의 수차발전기의 속도조정률은 5%로 주어지고 있다고 한다[8-10].

지금 설비용량 10,700kW(추산수력 700kW, 남양내연 6,000kW, 저동내연 4,000kW)의 발전기가 계통에 투입되어 정격주파수 하에서 모든 발전기가 75% 부하로 운전 중이라 하자(즉 추산수력 525kW, 남양내연 4,500kW, 저동내연 3,000kW).

태풍으로 인한 D/L 사고로 발전출력이 6,500kW로 갑자기 감소하였다고 하면, 이때의 주파수와 남양내연, 저동내연, 추산수력 각각의 발전출력을 구하라. 편이상 남양내연의 모든 발전기의 속도조정률은 3%, 저동내연은 4%로 주어지고 있다고 가정한다.

풀이 : 합계 출력 6,500kW에서 운전주파수를 f_{op} 라 할 때, 추산, 남양, 저동 발전소의 발전출력을 각각 P_C , P_N , P_J 라 하면,

$$P_C + P_N + P_J = 6,500 [kW] \quad (10)$$

- 1) 용량 700kW, 속도조정률 5%, 추산수력 수차발전기의 60Hz, 75% 출력(525kW)에 대한 속도조정률 특성곡선은 그림 6과 같다.

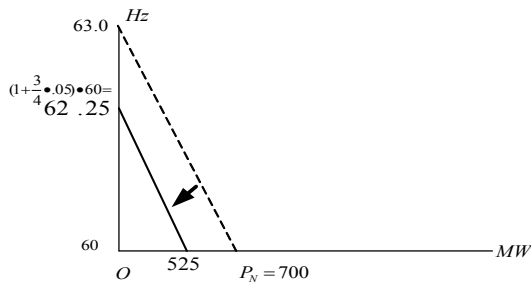


그림 6. 525kW 운전시 추산수력의 5% Droop 특성곡선
Fig. 6. Droop characteristic curve of Chusan H/P for 525kW output at 60Hz with 5% Droop

- 2) 투입 설비용량 6,000kW, 속도조정률 3% 남양내연의 60Hz, 75% 출력(4,500kW)에 대한 속도조정률 특성곡선을 추가하면 그림 7과 같다.

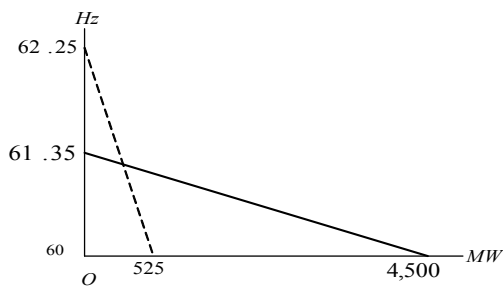


그림 7. 4,500kW 운전시 남양내연의 3% Droop 특성곡선
Fig. 7. Droop characteristic curve of Namyang D/G for 4,500kW output at 60Hz with 3% Droop

- 3) 투입 설비용량 4,000kW, 속도조정률 4%, 저동내연의 75% 출력(3,000kW)에 대한 속도조정률 특성곡선을 추가하면 그림 8과 같다.

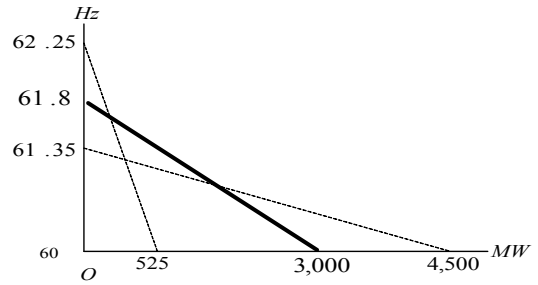


그림 8. 3,000kW 운전시 저동내연의 4% Droop 특성곡선
Fig. 8. Droop characteristic curve of Jeodong D/G for 3,000kW output at 60Hz with 4% Droop

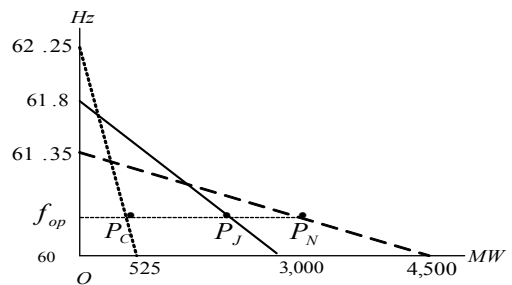


그림 9. 추산수력, 저동내연, 남양내연의 MW 및 주파수 f_{op}
Fig. 9. MW P_C , P_N , P_J and frequency f_{op} of Chusan H/P, Jeodong and Namyang D/G

그림 9로부터, 주파수 f_{op} Hz에서, 다음과 같은 세 개의 비례식을 얻을 수 있다.

$$P_C : 525 = (62.25 - f_{op}) : (62.25 - 60) \quad (11)$$

$$P_J : 3,000 = (61.8 - f_{op}) : (61.8 - 60) \quad (12)$$

$$P_N : 4,500 = (61.35 - f_{op}) : (61.35 - 60) \quad (13)$$

(10), (11), (12), (13)을 연립으로 풀면 :

$$P_C = 457.0 [kW] \quad (14)$$

$$P_J = 2,514.3 [kW]$$

$$P_N = 3,528.7 [kW]$$

$$f_{op} = 60.29 [Hz]$$

를 얻는다.

5. 결 론

본 논문은 터빈-발전기의 조속기 속도조정률의 역할과 필요성에 대하여 실무적 측면에서 좀 더 구체적으로 설명하였다. 속도조정률에 대한 기존의 정의를 바탕으로 그래프를 그리고 간단한 비례식을 세움으로써, 주파수 변화에 따른 발전기의 출력변화를 쉽게 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

정격출력 운전 중인 1기 발전기의 경우, 임의출력 운전 중인 1기 발전기의 경우 및 임의출력 운전 중인 3기 발전기의 도서 시스템의 경우를 사례연구로 제시하였다. 실제 계통에 최대한 가까운 상황과 데이터를 제시하여, 실무감각을 익히는데 도움을 주고자 노력하였다.

Acknowledgement

This study was financially supported by Seoul National University of Science & Technology.

References

- [1] KPX, EPSIS (Electric Power Statistics Information System) <http://www.kpx.or.kr/epsis/>, 2013. 1.
- [2] KPX, Operation Rules on Electric Power Market, 2011. 12.
- [3] K.Y. Song, Electric Power Generation, Dongilbook Co., 2011. 8, p 162.
- [4] K.Y. Song, Power System Engineering, Dongilbook Co., 2012. 3, pp 236-237.
- [5] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, John Wiley & Sons Inc., New York, 1996, pp. 336-339.
- [6] Cosse, R., Alford, M, Hajiaghajani, M., Hamilton, E., "Turbine/generator governor droop/isochronous fundamentals-A graphical approach", 2011 Petroleum and Chemical Industry Conference(PCIC), Industry Applications Society 58 Annual IEEE, 2011, pp 1-8.
- [7] S.J. Lee, "Understanding Turbine-Generator Droop thru Drawing a Graph", Proceedings of 2012 Fall Conference of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers(KIIEE), Coex, Seoul, pp 27-28, 2012.10.19.
- [8] Ulleung D/G Power Plant, Jeo-dong, Ulleung, Kyeongbuk, http://ulleung.grandculture.net/Contents/Index?contents_id=GC01500838.
- [9] KEPCO Ulleung Branch, 179-7 Do-dong, Ulleung, Kyeongbuk, <http://map.naver.com/local/siteview.nhn?code=>

11797816.

[10] Shinil-Kigong, Hyomun-dong 812-1, Bukgu, Ulsan.

Appendix

운전예비력(運轉豫備力, Operation Reserve)

공급예비력에서 급전정지 용량을 제외한 발전 여유용량을 말한다. 이는 주파수 조정, 전력계통의 사고 및 부하변동 등에 대비 하여 신속히(통상 10분 이내) 대응하기 위하여 확보한다. 운전예비력은 경제급전과 계통 신뢰도 측면에서 깊은 관계가 있으며, 신뢰도 유지 범위의 적정 운전예비력을 확보하도록 고원가 발전기를 대상으로 기동정지를 시행한다. 또한, 운전예비력은 발전기 출력 응답시간 및 기동소요시간에 따라 순동예비력과 비순동예비력으로 구분한다. 비순동예비력은 정지 중인 발전기 중 필요시 신속하게(10분 이내) 기동이 가능한 발전기로 주로 수력, 양수, 가스터빈 등이며, 계통의 고장이나, 부하급변 시 대응할 수 있는 예비력이다.

순동 예비력(瞬動 豫備力, Spinning Reserve, SP)은 운전 중인 발전기의 조속기 자동응동분 등 순간적으로(10초 이내) 출력증가가 가능한 량을 말한다. 즉, 급격한 주파수 저하시, 다른 운전예비력이 발생될 때까지 즉시 출력을 증가시켜(10초 정도 이내) 자동발전 가능한 공급예비전력을 말한다. Governor Free 운전 중인 발전기의 Governor Free 분의 발전력 등을 말한다. 전력계통의 주파수 조절능력의 척도이며, 계통고장이나 사고시의 안정도 및 부하차단 등의 평가자료로 사용된다[1].

◇ 저자소개 ◇



이상중 (李尙中)

1955년생. 부산공업고등전문학교 전기과 5년 졸업. 성균관대학교 전기공학과 졸업. 충남대학교 대학원 졸업(박사). 1987~1988년 PSEC 수료(Power System Engineering Course, GE Research Center in Schenectady, NY). 1976년 한국전력 입사. 1988~1996년 한전전력연구원 계통연구실. 1995년 한전전력연구원 수화력발전연구실 부장. 1996년 한전보령화력본부 복합시운전부장, 제어계측부장. 1998년~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 교수.