

리액터 기동 유도발전기의 동작 특성 해석

Operating Characteristic Analysis of the Induction Generator by the Reactor Starting

김 종 겹[†]
 (Jong-Gyeum Kim)

Abstract - In general, the voltage stability of induction generator is lower than synchronous generator. However, induction generator has many advantages rather than a synchronous generator in terms of price and maintenance. So Induction generator is used little by little in small hydroelectric power station rather than 1000kW recently. Squirrel cage induction generator generates a high inrush current at the grid-connection. This high inrush current causes a voltage drop on the grid. In order to increase the penetration of the induction generator, it is necessary to present a method of reducing inrush current. In this study, we suggested that it is possible to present a reactor startup method, by applying the parameter to reduce the voltage drop.

Key Words : Induction generator, Inrush current, Reactor tap, Small hydro, Voltage dip

1. 서 론

수력설비에서는 발전설비 용량에 따라 만 kW이상의 대수력으로 분류되고, 천kW에서 만kW 이하의 설비용량은 소수력설비로 분류하고 있다[1~4].

수력설비에서 발전설비 용량이 클수록 계통 연계시에 전압 안정성을 고려하여 동기발전기를 많이 적용하였다[2,3]. 그러나 소수력의 경우 초기 투자비와 유지비용이 높아 동기발전기보다는 유도발전기에 대한 점유비중을 점차 높여 나가고 있다[2,3,5].

유도 발전기는 기계적 및 전기적으로 다른 발전기보다 형태가 간결하고, 브러시나 정류자가 필요 없으며 유지보수비가 낮아 최근 소수력에 많이 적용되고 있다[2~7].

소수력은 주로 민가와 떨어지고 변전소와도 거리가 있어 소용량의 경우를 제외하고는 전원 안정성을 고려하여 동기발전기를 많이 적용하였지만, 최근에는 천 kW급의 소수력 발전소에 유도발전기를 적용하는 사례가 점차 높아지고 있다[2,3,4,6,7].

소수력 발전소에 동기발전기보다 유리한 유도발전기의 보급 확대가 필요하지만, 전력 발생을 위해 계통으로부터 무효전력의 수수와 기동시 돌입전류가 높기 때문에 전압강하가 가장 큰 문제로 지적되고 있으므로 발전기의 적용에 앞서 전압강하와 같은 사전 문제 검토가 필요하다.

그래서 본 논문에서는 천 kW급 유도발전기를 설치하여 부하와 전원에 전력을 공급할 경우 발생하는 전압강하를 줄이기 위해 리액터 기동을 적용하여 안정적인 유도발전기를 적용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 유도발전기 연결 계통 구성

2.1 계통 구성도

그림 1은 변전소, 배전선로, 부하, 변압기 그리고 유도발전기로 구성된 소수력 발전 계통도이다[3].

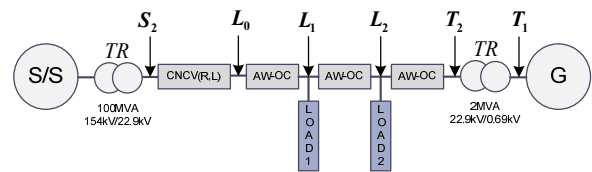


그림 1 배전선로, 부하 및 발전기 구성도
 Fig. 1 System diagram of D/L, Load and Generator

그림 1에서와 같이 소수력 발전소는 변전소로부터 멀리 떨어진 곳에 설치되어 있다. 이때 변전소로부터 발전소에 이르기까지는 수용가에 전력을 공급하고, 부하 말단에 유도발전기를 설치하였다. 배전선로의 경우 가공선로이지만, 변전소는 대부분 도심지 근처에 있기 때문에 케이블로 설정하였다.

그림 1에서 좌측의 변압기는 변전소에서 22.9kV로 변환시켜 배전선로의 부하에 전력을 공급하고 있고, 우측의 변압기는 발전기에 연결된 것으로서 690V의 저압에서 22.9kV로 변환한 것이다. 배전선로 말단에는 1,500kW의 유도발전기가 설치되어 있다.

그림 1에서 변전소 변압기의 정상분 및 영상분 %임피던스는 기준 용량 100MVA를 기준으로 각각 다음과 같다.

$$- \%Z1 = 0.225 + j33.334(\%)$$

$$- \%Z0 = 0 + j48.324(\%)$$

그리고 변전소에서 발전소까지 케이블과 가공전선에 대한 정상분 및 영상분 %임피던스는 표 1과 같다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2014년 6월 30일

수정일자 : 2014년 7월 22일

최종완료 : 2014년 7월 28일

표 1 케이블 및 가공전선 %임피던스

Table 1 %Impedance of cable & overhead wire

구 분		단위 %Z	
		%R	%X
CNCV 325mm ²	정상	1.4325	2.3742
	영상	4.4678	1.5617
AW-OC 160mm ²	정상	3.47	7.46
	영상	11.99	29.26

그림 1에 사용된 케이블, 전선 그리고 부하에 대한 내용은 표 2와 같다.

표 2 케이블/가공전선 및 부하

Table 2 Cable/overhead wire and Load

케이블 /전선	CNCV 325mm ²	AW-OC 160mm ²	AW-OC 160mm ²	AW-OC 160mm ²
From S/S	1km	2km	2km	2km
부하	-	4,000kW pf=0.8	4,000kW pf=0.8	-

2.2 리액터 탭 파라미터[8,9]

유도발전기의 기동시 돌입전류에 의한 전압강하를 줄이기 위해 설치할 기동용 리액터의 파라미터 선정이 중요하다. 기동용 리액터의 파라미터 선정은 식 (1)과 같이 발전기의 정격전류 I_n 를 먼저 구한다.

$$I_n = \frac{P(W)}{\sqrt{3} \times V \times \cos \theta} \quad (1)$$

유도발전기의 경우 기동전류 I_{st} 는 정격전류의 수배에 해당되는 것으로 대개 제작사의 시험 성적서에 표기된 값을 선정하면 된다.

리액터로 기동할 경우 탭에 흐르는 전류는 식 (2)와 같이 발전기의 임피던스 Z_{gen} 와 리액터의 임피던스 Z_{tap} 으로부터 구할 수 있다.

$$I_{tap} = \frac{V}{(Z_{tap} + Z_{gen})} \quad (2)$$

식 (2)와 같이 발전기의 임피던스를 구하는 것이 어려울 경우 발전기의 기동전류를 알 경우 쉽게 탭의 비율로 리액터 파라미터를 구할 수 있다.

기동용 리액터의 탭 전류 I_{tap} 는 기동전류에 탭 비율($\alpha\%$)의 곱으로 표현할 수 있다.

$$I_{tap} = \frac{\alpha}{100} \times I_{st} \quad (3)$$

이때 리액터 탭 전압은 다음과 같다.

$$V_{tap} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V \times (100 - \alpha\%) \quad (4)$$

따라서 리액터 탭의 인덕턴스 L_{tap} 는 식 (3) 및 (4)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$L_{tap} = \frac{Z_{tap}}{\omega} \quad (5)$$

2.3 유도발전기

유도발전기의 1차측은 저압이지만, 변압기를 통해 특고압으로 변환시켜 배전계통에 연결하여 전원측으로 전력을 공급하도록 되어 있다.

그림 2는 소수력 발전소의 구성도로 수차 터빈에 의해 발생된 기계적인 에너지를 농형 유도발전기에 의해 전기적 에너지를 변화시켜 발생된 전력을 변압기를 통해 계통에 공급하도록 하고 있다.

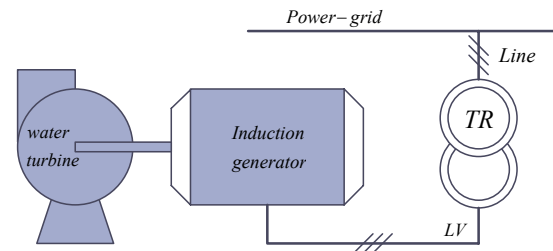


그림 2 유도발전기의 구성도

Fig. 2 Schematic diagram of Induction generator

본 연구에 적용된 3상 농형 유도발전기 사양은 표 3과 같다.

표 3 유도발전기 사양

Table 3 Specification of Induction generator

Quantity	value
Voltage	0.69kV
rated output	1,500kW
pole	10
power factor	0.83
efficiency	92%

표 4 유도발전기 파라미터

Table 4 Induction generator parameter

parameters	Values
stator resistance, R_s	0.00477[Ω]
rotor resistance, R_r	0.00542[Ω]
stator leakage inductance, L_s	0.055979[mH]
rotor leakage inductance, L_r	0.055979[mH]
mutual inductance, L_m	1.695[mH]
inertia moment, J	594[kg·m ²]
damping coefficient, D	1/0.0017[1/s]

표 3에 적용된 농형 유도발전기를 가지고서 리액터 기동 특성 분석을 위해 구한 파라미터는 표 4와 같다.

3. 동작 특성 분석

소수력 발전에 사용되는 유량과 낙차는 큰 변화가 없는 반면, 배전선로의 사용 부하는 대개 시간에 따라 변화가 많으므로 유도발전기로 전력생산 후 계통에 투입할 경우 전압강하가 높기 때문에 대안 제시를 위한 사전 해석이 필요하다. 해석에는 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[10].

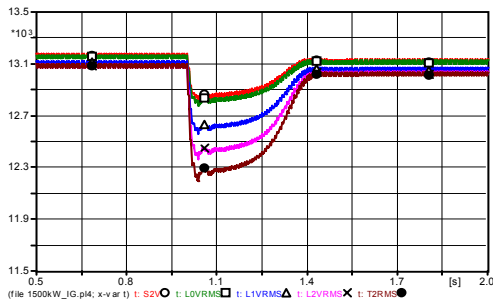
그림 3은 그림 1과 같은 회로에서 부하 변동에 따라 유도발전기를 배전선로에 투입할 때 전압강하 크기를 비교 분석한 결과이다. 부하 1과 부하 2의 역률은 0.8로 일정하게 하고 용량의 변화(2,000kW/4,000kW/8,000kW)만 고려하였다. 그림 3에서 전압을 분석한 포인트는 변전소 2차측(S2V)/케이블과 가공전선로가 접속한 곳(L0V)/부하 1 지점(L1V)/부하 2 지점(L2V)/ 발전소 변압기 특고압측(T2)이다. 각 지점에서의 전압은 상전압으로 변전소에서 거리가 멀어지고, 부하용량이

증가함에 따라 전압강하가 점차 커짐을 알 수 있다. 이는 같은 거리 조건에서 부하가 증가함에 따른 발생현상이다.

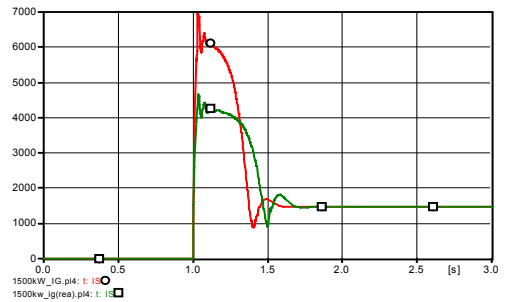
부하의 증가에 따라 발전기의 특고압측 포인트를 기준으로 계산한 전압강하율은(6.73%→6.68%→6.59%)로 약간씩 감소함을 알 수 있다. 이 전압강하율은 분산전원 허용범위를 5%를 초과하기 때문에 안정적인 기동 운영을 위해서는 낮출 필요가 있다.

그림 3의 결과를 전압강하를 대상으로 분산형전원 연계기준에 적용하면, 순시전압변동범위를 3~5%로 제한하고 있으므로 유도발전기의 적용은 불가하나, 배전선로 전압 유지범위인 20,800~23,800V 범위는 만족한다.

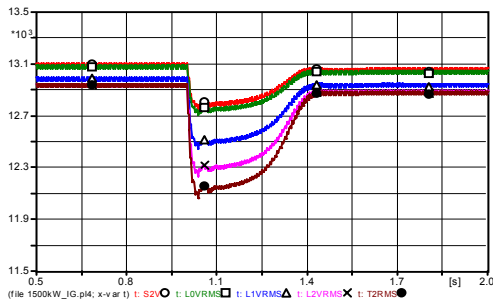
그림 3에서와 같이 1초 시점에서 유도발전기를 계통에 연결할 경우 일시적으로 전압강하가 발생한 후 약 0.4초가 지난 1.4초 이후에 상전압이 계통투입전과 비교해서 약간 낮게 나타나고 있다. 동기발전기는 발전 후 계통에 투입할 경우 짧은 전압강하 이후 바로 초기전압으로 복귀되지만, 유도발전기의 경우에 무효전력의 지원 부족으로 초기 전압으로 복귀되지 않기 때문이다.



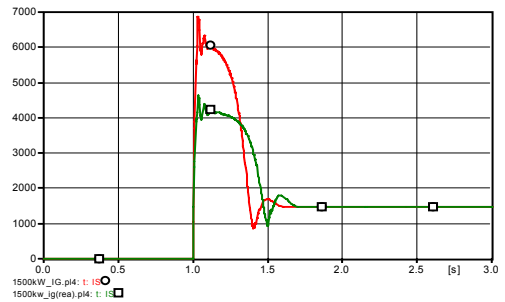
(a) 1,000kW 적용시



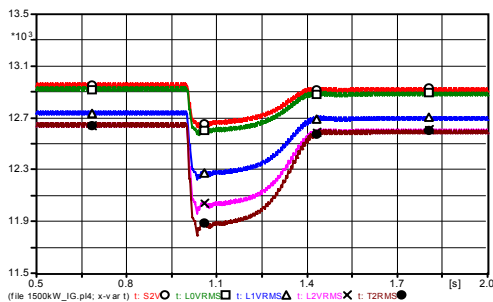
(a) 1,000kW 부하



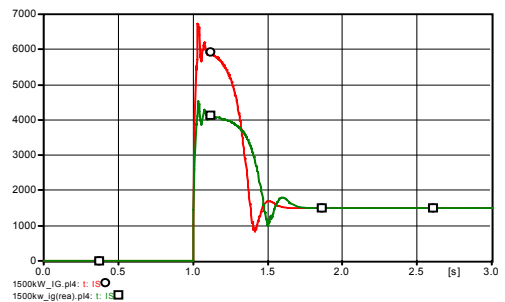
(b) 2,000kW 적용시



(b) 2,000kW 부하



(c) 4,000kW 적용시



(c) 4,000kW 부하

그림 3 부하의 변화에 따른 전압 강하
Fig. 3 Voltage dip by load adjustment

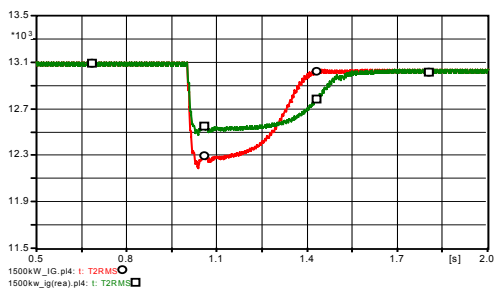
그림 4 리액터 사용 전후의 기동전류
Fig. 4 Starting current before/after using reactor

그림 3에서와 같이 유도발전기의 기동 후 계통 연결시 발생하는 돌입전류에 의한 전압강하를 낮추는 경제적인 방법으로 리액터를 적용할 수 있다.

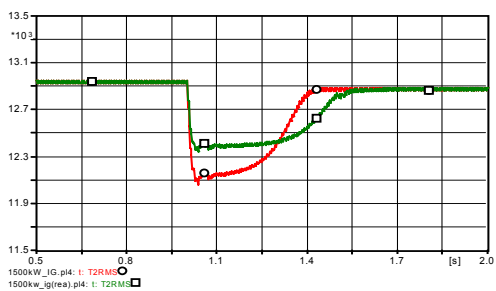
그림 4는 본 해석에서 3종류의 부하를 적용할 때 기동시 돌입전류를 줄이기 위해 리액터 사용전후의 전류 크기를 비교한 것이다. 유도발전기의 기동전류를 줄이기 위해 사용한 리액터의 파라미터는 식 (5)로 구한 값을 적용하였다.

그림 4에서와 같이 직입 기동으로 운전하는 발전기를 계통에 투입할 때 돌입전류는 부하용량이 증가함에 따라 미세하게 감소하고, 정격전류의 4.5배가 되지만, 리액터를 적용하여 투입할 때 3배로 줄어든 것을 확인할 수 있다.

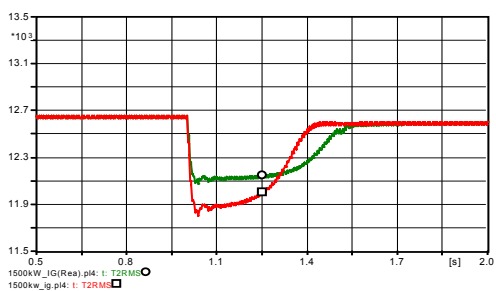
그림 5는 배전선로에 제시한 3종류의 부하를 연결한 상태에서 유도발전기를 직입기동과 리액터 기동시의 전압 강하를 비교한 것이다.



(a) 1,000kW부하(6.733%→4.537%)



(b) 2,000kW부하(6.679%→4.496%)



(c) 4,000kW부하(6.586%→4.433%)

그림 5 리액터 적용 전후 전압강하 비교
Fig. 5 Voltage dip comparison before/after reactor apply

그림 5에서와 같이 직입 기동일 경우 전압강하율은 분산 전원 순간전압 허용범위를 초과하지만, 0.08mH의 리액터를 적용하여 해석한 결과 모두 5% 이내로 들어간다는 것을 확인할 수 있다.

전압강하를 줄이기 위해 유도발전기 앞단에 리액터 설치 유무에 따른 토크 및 전력발생에 대해 분석하였다.

그림 6은 배전선로 부하가 8,000kW인 경우에서 리액터 설치 전(○)과 후(□)의 발전기 토크 크기를 분석한 결과이다. 그림 6에서와 같이 토크 값이 정(+)로 나타나는 것은 발전기를 의미하고, 토크가 부(-)로 나타날 경우 전동기를 의미한다[9].

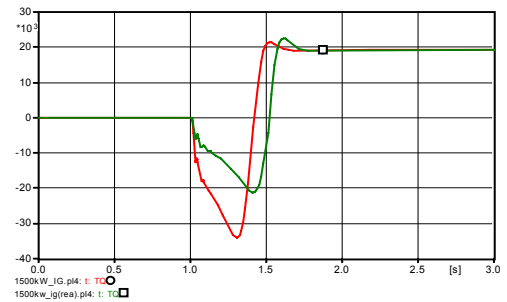
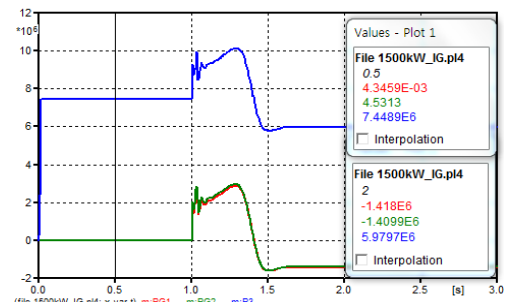


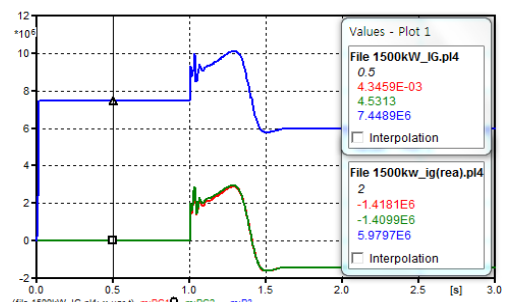
그림 6 리액터 적용 전후 토크 비교
Fig. 6 Torque comparison before/after reactor apply

그림 6에서 알 수 있듯이 과도상태에서만 리액터를 투입할 때가 토크 크기가 직입 기동에 비해 낮지만, 정상적인 운전에서는 동일하다는 것을 알 수 있다. 단지 정상상태의 전력발생 시점이 리액터를 사용할 때 약간 늦을 뿐이다.

리액터를 적용 전후에 대한 전력발생의 크기 분석을 실시하였다. 그림 7은 배전선로 부하가 8,000kW인 경우에 대해 리액터 적용 전후의 유도발전기에서 발생하는 유효전력의 크기를 분석한 것이다. 그림 7에서 PG1은 발전기측, PG2는



(a) 리액터 미적용



(b) 리액터 적용

그림 7 리액터 투입 전후의 유효전력 비교
Fig. 7 Active power comparison before/after reactor apply

부하의 말단, P3는 변전소 2차측의 전력 포인트이다.

그림 7(a)는 리액터를 사용하지 않고 발전기의 투입 전후 유효전력의 크기를 나타낸 것으로서 0.5초에서는 발전기 투입전으로 부하에 필요한 전력의 대부분(7,449kW)을 전원측에서 공급하지만, 1초에 발전기를 투입하여 1.5초 이후에는 발전기로부터 -1,418kW에 해당되는 전력을 전원측과 반대로 계통에 공급하므로 부하에 필요한 부족분에 해당되는 5,980 kW 전력만 전원측에서 공급되고 있음을 알 수 있다.

그림 7(b)는 리액터를 사용한 경우 발전기 투입 전후 전력 변화를 나타낸 것이다. 리액터를 사용하지 않은 그림 7(a)와 비교해서 전력의 공급시간만 약간 늦을 뿐 동일한 결과가 나타남을 알 수 있다.

계산결과 유도발전기 기동에 의한 돌입전류의 크기를 제한하기 위해 리액터 적정 파라미터를 찾아낼 경우 전압강하 허용범위 이내로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

유도발전기를 계통에 투입할 때 가장 크게 문제가 되는 것은 돌입전류에 의해 전압강하이다. 이 돌입전류의 저감과 전압강하를 줄이기 위해 리액터 기동방식을 적용할 경우 전압강하율이 분산전원기준 허용범위 안에 들어가는 리액터의 최적 파라미터를 찾는 것이 중요하다.

그래서 본 논문에서는 천 kW 이상 되는 농형 유도발전기를 사용할 경우 돌입전류와 전압강하율을 계산하여 적정한 리액터 파라미터를 찾아 발전기에 적용시켜 해석한 결과 분산전원 순시전압 강하 허용 범위 안에 들어갈 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 리액터를 적용 전후 유도발전기에서 생산된 토크 및 전력 크기를 비교한 결과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구결과는 앞으로 소수력의 설계 적용 검토시 동기발전기와 유도발전기 적용여부 검토에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

[1] 2012 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO
 [2] Yong-kuk Kim, Jong-Gyeum Kim, "A Study on the Operation Characteristic of Induction Generator in the Small Hydropower Plant", KIEE, Vol. 62, No.5, pp.632-638, 2013. 05
 [3] Yong-kuk Kim, Jong-Gyeum Kim, Seung Hyun Lim, Young-Kwan Choi, "Study for selection of generator type in the small hydropower plant by analyzing the power flow of the distribution line the plant is connected", KIEE, EMECS Autumn Conference, 2012, 11
 [4] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, Il-Jung Kim, Young-Kuk-Kim, "Characteristics Analysis of Induction generator with a change in rotor speed", KIEE, Vol.60, No.18, pp.2225-2229, 2011. 12
 [5] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, "Application Guidelines for Induction Generators," in Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives,

Milwaukee, Wisconsin, May 18-21, 1997, Paper WC1/5.1 - WC1/5.3.

[6] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004
 [7] D. S. Henderson, "Synchronous or induction Generators? -The choice for small scale generation", IEE Conf, Pub, pp.146-149, 1996
 [8] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics Analysis for Reactor starting method of 3-phase Induction Motor considering saturation", KIEE, Vol.26, No.8, pp. 65-70, 2012.8
 [9] Jong-Gyeum Kim, "Starting Characterization of Induction Motor using Reactor Tap Change", KIEE, Vol.63P, No.1, pp. 24-28, 2014.3
 [10] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 미국 위스콘신대학 방문 교수, 현재 당학회 평의원