

# 대용량 몰드변압기 정밀절연진단 결과 고찰

(A study of Insulation Diagnosis for Large-Capacity Mold Transformer)

이은춘\* · 김재철\*\*

(Eun-Chun Lee · Jae-Chul Kim)

## Abstract

When the large-capacity Mold type Transformer was passed through rain, after it was dried and its parts were changed, Insulation Diagnosis was made to evaluate the condition of it and decide to recharge. Using the evaluation of Insulation Diagnosis, the urgent decision-making for recharge made blackout time minimum. In this study, it was considered that Insulation Diagnosis for the large-capacity Mold type Transformer is applied to decision-making for reuse of high voltage electric power equipment by analysis of the case study.

Key Words : Mold type Transformer, Insulation, Winding Resistance, P.I Test, Tan $\delta$ , Partial Discharge

## 1. 서 론

최근 기상이변의 심화로 하절기 집중호우에 의한 수변전설비의 침수사고가 많이 발생하고 있다. 2013년 7월 경기 북부지역 집중호우시 정수장(500,000m<sup>3</sup>/day) 변전실 옥상에 설치된 큐비클 환기구로 빗물이 유입되어 몰드변압기(22.9/3.3kV, 8,500kVA) 2차측 단자(Bus bar)의 단락(지락)현상으로 과전류계전기(OCR)와 비율차동계전기(RDR)가 동작하여 불시에 정전되

는 사고가 발생하였다.

본 연구에서는 침수사고 변압기에 대하여 현장에서 긴급 건조작업 및 소손 부품을 교체하고 충전 가능 여부를 판단하기 위하여 정밀 절연진단을 실시하였으며 진단결과를 활용하여 충전이 가능하다는 신속한 의사결정으로 정전시간을 최소화한 사례를 중심으로, 대용량 몰드변압기 정밀 절연진단 기술에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 사고조사 및 긴급보수

#### 2.1.1 사고조사

변압기 계통이 차단된 원인은 그림 1과 같이 건물 옥상에 설치된 배풍구를 통해 빗물이 유입되면서 몰드변압기 상단에 위치한 2차측 단자(BUS)의 상간 단

\* 주저자 : 한국수자원공사 K-water연구원, 차장  
\*\* 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수  
\* Main author : Korea Water Resources Corporation. General Manager  
\*\* Corresponding author : Soongsil Univ. Dept of Electrical Engineering Prof.  
Tel : 042-870-7670, Fax : 042-870-7699  
E-mail : esse@kwater.or.kr  
접수일자 : 2014년 7월 23일  
1차심사 : 2014년 7월 29일  
심사완료 : 2014년 8월 20일

대용량 몰드변압기 정밀절연진단 결과 고찰

락사고와 동시에 대지간의 지락사고가 발생되었으며, 이로 인해 보호계전기가 동작하여 차단기가 개로 (Trip)된 것으로 판단된다.



그림 1. 빗물침투 환풍구 및 2차측 상간단락 흔적  
Fig. 1. Ceiling fan passed through rain & Traces of Arc flash



그림 2. 에폭시수지 균열 및 BUS 코로나 침식  
Fig. 2. Epoxy crack & Erosion by BUS Corona discharge

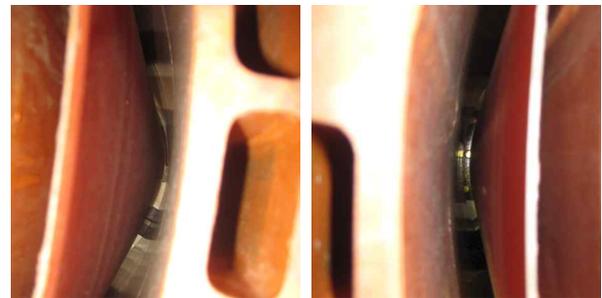
또한 전원차단의 직접적인 원인은 아니지만 그림 2와 같이 에폭시수지의 균열부위(a)와 단자(BUS) 등이 코로나 방전(b)에 의해 침식정도가 심하여 항구복구가 필요한 실정이다.

복구방법은 BUS 표면을 매끄럽게 다듬질하고, 절

연페인트 또는 열수축 절연튜브를 삽입하여 전계강도를 균일하게 하여야 한다.

2.1.2 긴급보수

빗물 침투된 몰드변압기의 외관 점검 후 절연파괴된 에폭시아자는 교체하고, 코로나 방전에 의한 BUS 침식부분은 연마 등을 통하여 침예한 부분의 전계집중을 완화토록 하였다. 그리고 대형 건조기 (온풍기) 2대를 이용하여 건조작업을 약 5시간 동안 실시한 결과 그림 3과 같이 에폭시 표면의 물기가 제거되었다.



(a) 변압기 2차 단자측 (b) 변압기 1차 단자측

그림 3. 건조작업 후 에폭시 표면 제습상태  
Fig. 3. Epoxy condition after Dry

이와 같이 현장에서 건조작업과 동시에 소모 부품들을 교체하고 정밀 절연진단을 실시하여 충전여부에 대한 의사결정을 하였다.

2.2 정밀 절연진단 일반

2.2.1 진단대상 설비

침수사고가 발생한 정수장의 수변전설비의 단선결선도는 그림 4와 같고, 진단 대상 주변압기의 설비제원은 표 1과 같다.

2.2.2 진단종류 및 절연열화 판정기준

변압기의 절연 종류별로 분류하면 유입식, 가스식 및 건식으로 대별되며, 몰드변압기는 건식에 해당된다. 몰드변압기의 진단 종류 및 절연열화 판정기준은 표 2와 같다.

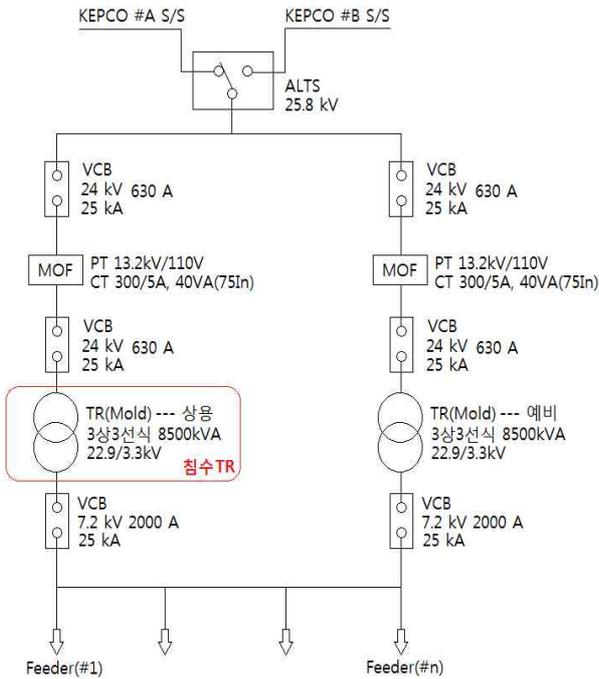


그림 4. 정수장 수변전설비의 단선결선도  
Fig. 4. One line Diagram of Power Substation in Water Treatment Plant

표 1. 진단대상 몰드변압기 설비 제원  
Table 1. Electrical Characteristics of Transformer

항 목	규 격
정격용량	8,500kVA
정격전압(1차/2차)	22.9 / 3.3kV
정격전류(1차/2차)	214.3 / 1,487.1A
변압기 결선	△-△
절연계급	F종
기준충격절연강도	95kV
제작일자	2008. 06.(국내 H사 제품)

표 2. 몰드변압기 진단종류 및 열화 판정기준  
Table 2. Test & Evaluation of Mold Transformer

진단 종류	관련 규정	기 준 값
권선저항	IEEE Std 62-1995	오차 ±5 % 이내
절연저항 (HV)	(일)전기학회기술보고 제752호-2000 (1.8항 몰드변성기)	≥500MΩ : 양 100~500 : 요주의 <100MΩ : 불량

진단 종류	관련 규정	기 준 값
절연저항 (LV) 1kV이상	IEEE Std 43-2000	100MΩ 이상 (40℃기준)
성극지수	IEEE Std 62-1995	Trend 관리
유전정접	IEEE C57.12.91-1995	23kV급 1.0%이하 6.6kV급 0.5%이하
권선비	IEEE Std 62-1995	오차 ±0.5 % 이내
부분방전	IEC 60076-11	10pC 이하

### 2.3 정밀 절연진단 결과

2.3.1 권선저항 시험(Winding Resistance Test)  
변압기 권선의 층간단락, 병렬권선의 회로개방 및 연결점의 접촉저항을 검사하는 시험으로, 선간 저항을 측정후 상권선 환산 식을 이용하여 각 상별 저항치를 계산하고, 이 값을 20℃ 기준으로 환산하였다.

시험 당시 측정환경은 대기온도 28.6℃, 습도 82.4%, 권선(1, 2차) 온도는 33℃를 나타냈으며, 권선저항 측정결과는 표 3과 같다. 각 상의 권선저항 최대편차가 5%이내일 때 양호 판정을 한다[1].

표 3. 권선저항 시험결과 및 판정  
Table 3. Evaluation of Winding Resistance Test

구 분	측정	측정치 (mΩ)	상	계산치 (mΩ)	20℃ 환산(mΩ)	편차 [%]	판정
HV측 (△)	R-S	283.5	R	425.25	404.58	0.00	양호
	R-T	283.6	S	425.55	404.86	0.07	
	S-T	283.4	T	424.95	404.29	-0.06	
	평균	283.5	×	425.25	404.57	×	
LV측 (△)	R-S	2,984	R	4,450	4,230	-1.16	양호
	R-T	3,033	S	4,597	4,370	2.10	
	S-T	2,987	T	4,459	4,240	-0.93	
	평균	3,001	×	4,502	4,280	×	

대용량 몰드변압기 정밀절연진단 결과 고찰

2.3.2 절연저항 시험(Insulation Resistance Test)

절연저항시험은 권선과 대지간의 절연상태를 측정하는 시험으로 3상 일괄 처리한 1, 2차권선과 대지 간에 DC 5,000V(HV측), 1,000V(LV측)를 각각 인가하고 1분 후의 절연저항 값을 측정하였으며, 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. 절연저항 시험결과 및 판정  
Table 4. Evaluation of Insulation Resistance Test

구 분	측정치(1분값)		40℃ 환산값		판 정
	HV	LV	HV	LV	
절연저항(MΩ)	56,400	85,400	34,868	52,521	양호

몰드변압기의 절연저항은 40℃로 환산한 값을 기준으로 고압측 500MΩ, 저압측 100MΩ이상 유지할 때 양호로 판정한다[2].

측정온도 t℃의 절연저항을 40℃로 환산하는 방법은 식 (1)과 같다[3].

$$R_{40} = R_t \times 2^{\frac{t-40}{10}} \quad (1)$$

2.3.3 성극지수 시험(Polarization Index Test)

성극지수(성극비) 시험은 절연저항시험과 병행하여 측정하며, 절연물의 오손 및 흡습 정도를 알아보기 위하여 실시한다. 절연물에 흐르는 1분 후의 전류값(충전, 흡수, 누설전류)과 10분 후의 전류값(누설전류)을 측정하여 식 (2)에 의하여 성극비를 산출하며, 시험 시 전류변화 추이 및 파형의 동요(kick)를 관찰한다.

$$\text{성극비}(PI) = \frac{\text{전압인가 1분후의 전류}}{\text{전압인가 10분후의 전류}} \quad (2)$$

절연저항 및 성극비 시험 회로도도 그림 5와 같고, 성극지수 시험결과는 그림 6 및 표 5와 같다. 건식변압기의 성극비(P.I)는 Trend 관리를 권장하며, 유입 변압기 기준으로 1.5 이상을 유지할 때 양호판정을 한다[1].

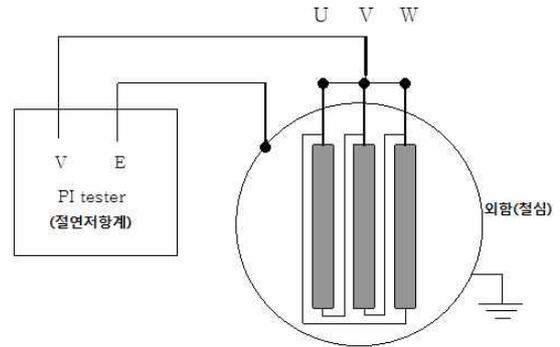
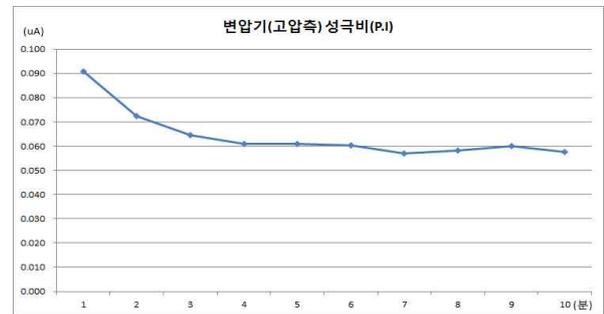
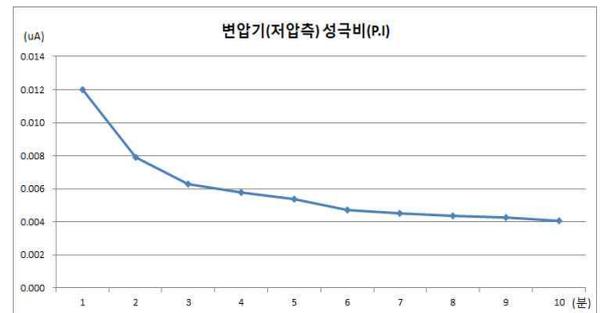


그림 5. 절연저항 및 성극비 시험회로도  
Fig. 5. Evaluation of Insulation Resistance & P.I Test



(a) 고압측(HV) 성극비 측정결과



(b) 저압측(LV) 성극비 측정결과

그림 6. 성극비 측정 그래프  
Fig. 6. Graph of Polarization Index Test

표 5. 성극지수 시험결과 및 판정  
Table 5. Evaluation of Polarization Index Test

구 분	측정 위치	측정값(MΩ)		P.I	판 정
		1분	10분		
절연저항	HV	56,400	89,100	1.58	양호
	LV	85,400	253,000	2.96	양호

### 2.3.4 유전정접 시험(tanδ Test)

유전정접 시험은 변압기 절연물에 교류전압을 인가하여 절연상태 및 열화 정도를 진단하는 시험으로, 시험장비는 Schering Bridge를 조합하여 사용한다.

시험전압은 교류 10kV까지 인가하여 절연물의 유전체 손실각(tan δ)을 측정하며, 시험 회로도는 그림 7과 같다. 그림 7에서 CX, RX는 측정 시료의 정전용량과 저항이고, CN은 표준콘덴서이다.

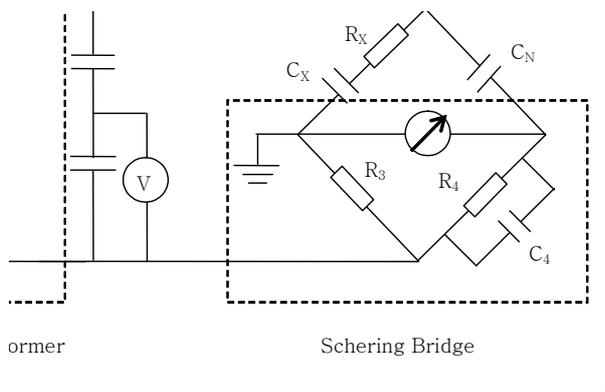


그림 7. 유전정접 시험 회로도  
Fig. 7. Circuit Diagram of Tanδ Test

유전정접 시험 및 판정 결과는 표 6과 같고, 몰드변압기의 유전정접 판정기준은 23kV급에서 1.0%이하를 양호하다고 판정한다[4].

표 6. 유전정접 시험 및 판정 결과  
Table 6. Evaluation of Tanδ Test

구 분	UST A	GST A+B	GSTg A	판정
	1차/2차	1차+2차/접지	1차/접지	
tanδ(%)	0.26	0.45	1.21	요주의

표 6의 UST A는 대지와 절연된 1, 2차 측의 측정값이고, GST A+B는 1, 2차와 대지간의 측정값이다. 그리고 GSTg A는 2차측을 제외한 1차와 대지간의 측정값을 의미한다.

### 2.3.5 권선비 시험(Turn Ratio Test)

상용주파 저전압(AC 240V)을 인가하여 각 상별 권선비를 측정하고, 현재의 Tap에서 이론적 권선비(1차

/2차전압)와 비교하여 오차를 측정하였으며, 권선비 시험 및 판정결과는 표 7과 같다. 권선비의 허용오차는 0.5% 이하를 양호로 판정한다[1].

표 7. 권선비 시험 및 판정 결과  
Table 7. Evaluation of Turn Ratio Test

계산치 (1차/2차)	U-V/u-v		V-W/v-w		W-U/w-u		판정
	측정치	편차(%)	측정치	편차(%)	측정치	편차(%)	
6.9393	6.9378	-0.023	6.9362	-0.046	6.9364	-0.043	양호

### 2.3.6 부분방전 시험(Partial Discharge Test)

부분방전시험은 절연체 내부의 미소 공극(Void), 도체 및 절연체 표면에서 발생하는 방전량(pC)을 측정하여 절연체의 건정성을 평가하는 시험이며, 10pC 이상이면 불량으로 판정한다[5].

그러나 사고현장의 경우 각종 수처리설비가 동작 중에 있는 관계로 주변 노이즈(Back Noise)가 약 700pC으로 측정되었다. 따라서 노이즈가 판정기준 10pC을 훨씬 상회하여 부분방전시험은 실시하지 않았다.

## 2.4 진단결과를 활용한 충전여부 의사결정

빗물 침투된 변압기를 대상으로 Arc 방전이 발생한 부분을 연마하여 매끄럽게 하고, 절연 파괴된 지지대 교체 및 급속 온풍기를 이용한 건조작업 등을 실시하고 절연진단을 실시하였다.

진단결과는 유전정접시험을 제외한 나머지 시험은 모두 양호하였으나, 유전정접 시험에서 기준값을 약간 초과하였다. 유전정접이 초과한 부분은 금번 빗물 침투와 관계없는 1차측(GSTgA)의 값이므로 변압기 2차측 권선의 절연상태는 비교적 건전하다고 판정하였다.

변압기 권선의 정밀절연진단 결과와 육안점검에서 발견된 결함을 현지조치하고, 현장 실무자의 회의를 거쳐 변압기를 충전하여도 문제가 없다는 결론을 도출했으며, 무부하로 10분 정도 충전해서 이상이 없을 때 부하운전으로 전환토록 의결했다[6].

충전결과 변압기의 무부하 전압, 전류 및 소음 등이 정상으로 나타나 부하운전으로 전환하였다.

### 2.5 충전여부 의사결정 절차 제안

우리나라의 경우 대부분의 전력설비가 지하에 위치해 있고, 기상이변 등에 의한 집중호우가 빈번한 현실을 감안할 때, 침수사고의 위험성이 점점 높아가고 있다.

본 연구를 통하여 전력설비의 침수사고가 발생하였을 때 현장에서 긴급복구를 수행한 후 정밀 절연진단을 실시하고, 그 결과를 토대로 충전여부를 결정하는 절차를 제안하면 그림 8과 같다.

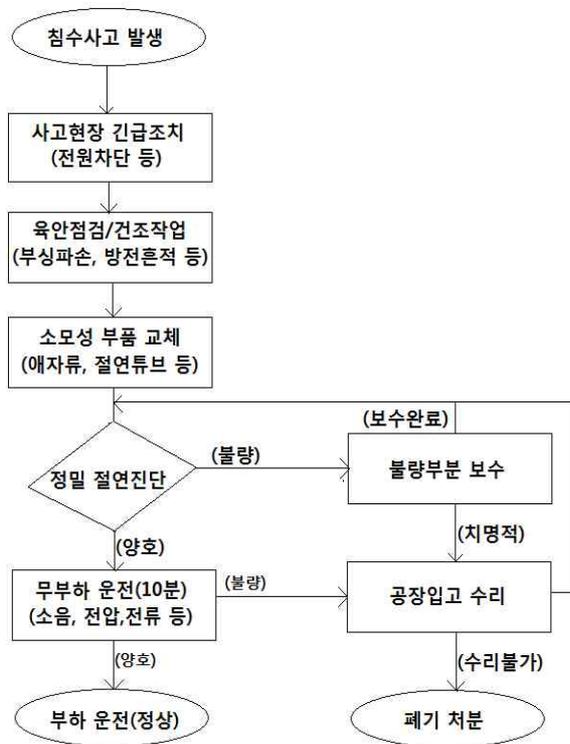


그림 8. 침수사고시 충전여부 의사결정 절차서  
Fig. 8. Flow chart of Decision Making for Recharge

전력설비의 침수사고는 대부분 단락 또는 지락보호 계전기에 의해 즉시 차단되므로, 그림 8의 절차에 준하여 현장 수리 및 진단을 통해 충전여부를 결정할 때 정전시간을 최대한 줄일 수 있을 것이다. 사고가 발생하였을 경우 통상적으로 제작업체 기술자를 현장에 호출하여 충전여부를 결정하였으나, 이는 경험에 의존한 추측을 기반으로 한 것이기에 신뢰도가 낮다.

또한 제작자 측에서 공장입고를 요구할 때 정전에 따른 생산중지와 운반비용 등의 경제적 손실이 커지므로 가급적이면 현장 진단을 통하여 충전여부를 결정하는 것이 바람직하다.

### 3. 결 론

정수장에서 빗물이 침투한 대용량 몰드변압기를 대상으로 육안점검, 긴급보수 및 정밀절연진단을 실시하고 각각의 결과를 종합하여 사고변압기의 충전여부에 대한 신속한 의사결정으로 정전시간을 최소화 한 효과를 거두었으며, 다음과 같은 연구결과와 교훈을 얻었다.

- 1) 옥내 큐비클에 수납되는 몰드변압기의 환풍구는 옥상에 설치하는 것보다 건축물 측면에 설치하여 빗물 등이 침입하지 않는 구조로 하여야 한다.
- 2) 대용량 변압기 침수 사고시 공장에 반출하여 수리·진단하는 것이 원칙이나, 정전시간 축소 및 비용절감 등을 위하여 현장에서 긴급보수하고 진단할 수 있는 인력 및 장비의 확산, 보급이 필요하다.
- 3) 전력설비 침수사고 현장에서 긴급수리 및 정밀진단을 통하여 충전여부 의사결정을 위한 절차를 제안하였다.
- 4) 주요 전력설비의 부속자재를 적정 예비품으로 보관하여 유사시 적기에 사용함으로써, 사고복구 시간을 단축시킬 수 있다.

현재까지는 전력설비 정밀절연진단 결과를 판정할 때, 주로 외국규격(IEEE)을 활용하고 있으나, 앞으로는 국내의 제조기술 및 설비운영 환경 등을 고려한 자체 규정을 제정하여 공표함으로써 전기설비의 합리적인 자산관리를 실현할 필요가 있다.

그리고 유입변압기에 대한 On-Line 상태감시시스템의 개발·적용은 급속도로 확산되고 있으나, 22.9kV 이하에서 사용되고 있는 몰드변압기에 대한 상태감시 기술은 개발·보급이 저조한 실정이다. 따라서 향후에는 건식 몰드변압기의 상태감시기술을 개발하여 보급함으로써 수·변전설비의 신뢰도 향상에 기여하여야 한다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2014년 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

### References

- [1] IEEE Std 62-1995, "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus-Part 1".
- [2] IEEJ Technical Report No.752-2000, Chapter 1.8 Mold type Transformer.
- [3] IEEE Std 43-2000, 『IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery』 2000.3.
- [4] IEEE Std C57.12.91-1995, "IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers".
- [5] IEC 60076-11:Power transformers -Part11:Dry-type transformers.
- [6] Electrotechnical Regulation & Conformity Criteria KEA, 2014.
- [7] High voltage Diagnosis on the electric power equipment K-water, 1990.

### ◇ 저자소개 ◇



#### 이은춘(李殷春)

1965년 2월 2일생. 1992년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2006년 충남대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 숭실대학교 대학원 전기공학과(박사 수료). 현재 한국수자원공사 K-water 연구원 차장.

Tel : (042)870-7670

E-mail : esse@kwater.or.kr



#### 김재철(金載哲)

1957년 3월 1일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년 ~ 현재 숭실대학교 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (02)820-0647

E-mail : jckim@ssu.ac.kr