



## 1 서 론

오늘날 대부분의 에너지를 전기에 의존함에 따라 전력사용이 급증하고 부하가 대용량화되어 안정적 전력공급이 중요한 문제로 대두되었다. 이러한 추세에 따라 송·배전 설비도 점차 대용량화 및 고전압화되고 신뢰성을 요구하게 되며, 각종 배전 설비의 제조기술이 더욱 복잡 다양하게 발전하고 있다.

그 중 전력계통에서 뇌 혹은 개폐서지 등의 과전압을 흡수·억제하여, 전력설비와 계통보호를 위해 설치하는 것이 피뢰기이다. 따라서 어떻게 과전압을 낮게 억제할 수 있을까 하는 것이 피뢰기의 가장 중요한 성능이라고 말할 수 있다.

피뢰기의 구조는 크게 애판과 특성소자로 구성된다. 종래의 피뢰기는 직렬갭과 비직선성 탄화규소(SiC) 소자로 구성되어 있었지만 1980년 이후부터는 비직선성이 우수한 ZnO(산화아연) 소자를 이용한 직렬갭이 없는 피뢰기(산화아연형 피뢰기)가 실용화되어 송·배전 선로 등 광범위하게 채용되고 있는 실정이다.

현재까지 피뢰기 열화에 대한 평가를 위한 방법으로 ZnO 소자 평가를 주로 하고 있다. 그러나 피뢰기 고장의 유형을 살펴보면 피뢰기에 ZnO 소자 자체의 열화 이외에 하우징 열화 및 제작 불량으로 인한 수분

침투가 또 하나의 고장 원인이다.

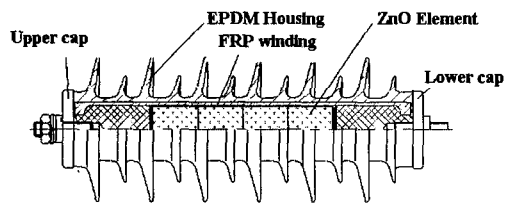


그림 1. 폴리머 피뢰기 구조

현재 사용 중인 배전용 폴리머 피뢰기는 그림 1과 같이 특성소자를 FRP 와인딩 처리한 후 미리 제작된 애판에 삽입하는 형태이다. 따라서 상하부 기밀 불량이나 애판 재질이 불량할 경우 내부로 수분이 침투하여 FRP 와인딩과 하우징 사이의 계면에서 트래킹을 유발하고 결국에는 섬락 고장으로 진전될 수 있을 것이다.

최근 이러한 형태의 고장이 다수 발생함에 따라 전력연구원에서는 국내 배전선로에 대표적으로 사용되는 폴리머 피뢰기의 침수특성시험을 통해 수분침투에 대한 저항성 및 재질특성 변화를 분석하였다. 또한 폴리머 피뢰기의 장기 신뢰성을 짧은 기간에 평가할 수 있다면, 설계 혹은 제조 결함이 있는 피뢰기가 현장에 설치되는 것을 방지할 수 있을 것이다. 따라서 폴리머 피뢰기의 장기 신뢰성을 평가할 수 있는 복합기술

화 시험 장비를 개발하여 특성평가를 실시하였다.

## 2. 피뢰기의 열화작용과 형태

### 2.1 피뢰기의 환경인자와 열화작용

유기 고분자 재료를 옥외에서 사용할 때 문제가 되는 것은 고전압 스트레스가 인가됨으로 인해 각종 자연환경인자의 작용이 가속화 되는 것이다. 표 1에 환경인자와 열화작용과의 관계를 나타내었으며, 그림 2에서는 열화 Process의 예를 나타내었다.

표 1. 환경인자와 열화작용

환경인자	열화작용
자외선(U.V)	자외선 열화(분자의 절단) 열에 의한 열화 가속
비나 결로에 의한 물이나 수분	습도 열화( $\epsilon$ , $\tan\delta$ 의 증대, 파괴전압 저항을 저하)
염분, Dust 등 오손 물질	도전을 증대에 의한 표면 저항을 저하(염해, 오손)
대기 오염 Gas (NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> 등)	오염 Gas와 Filler와 반응 O <sub>3</sub> 열화, 도전을 증대
환경변화 (계절, 주야)	반복되는 열 스트레스에 의한 기계적 열화

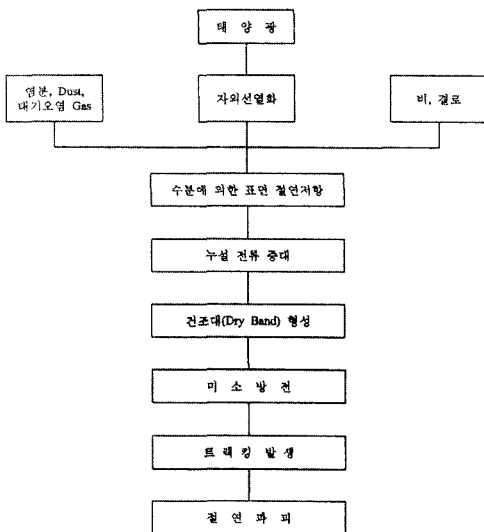


그림 2. 열화 Process

### 2.2 피뢰기의 누설전류

피뢰기의 열화 판정을 위해 가장 중요한 것은 누설 전류의 양이다. 피뢰기의 누설전류는 ZnO 소자 자체의 저항분 전류와 용량분 전류에 의해 애관의 용량분 전류와 애관과 소자 사이의 용량분 전류가 그림 3과 같이 중첩된 것이며, 저항분 전류, 용량분 전류와 구별하기 위해 전 누설전류라 부른다.

피뢰기 소자의 열화에 대해서는 많은 연구가 수행되어 있지만 확립된 진단방법과 판정기준은 확정되어 있지 않다. 일본에서 운용되고 있는 누설전류에 대한 관리치는 초기치 0.3 ~ 0.8 [mA]에 대해 초기치의 1.3 ~ 1.5배를 기준 값으로 하여 열화정도를 판단하고 있다.

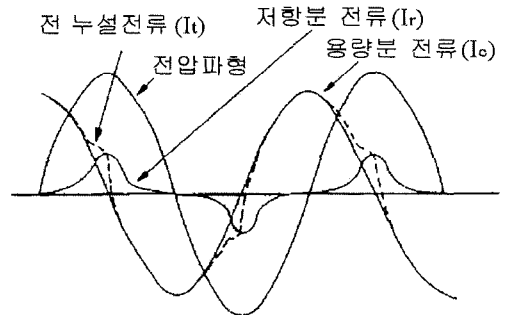


그림 3. 피뢰기의 누설전류

### 2.3 피뢰기 열화요인과 형태

#### 가) ZnO 소자의 열화

ZnO 소자의 저항분 전류는 그림 4와 같이 전압이 일정할 경우에는 소자온도가 높을수록 증가하는 온도 특성을 가지고 있다. 저항분 전류가 증가하면 발열량이 증가하고 피뢰기의 방열특성을 상회하고, 다시 저항분 전류가 증가하는 현상이 반복된다. 이로 인한 열폭주로 절연파괴에 이르게 된다.

#### 나) 상시 과전에 의한 열화

그림 5에 나타난 것처럼 과전율을 파라메타로

하여 수개월 정도의 단기간 시험으로 수 십년 이상의 기대 수명을 검증할 수 있다. 하지만 ZnO 소자는 소재의 배합조성과 제조기술의 개량으로 저항분 누설전류가 거의 변화하지 않는 경우에는 이런 방법에 의한 수명의 추정이 불가능하다.

IEC 규격(IEC 99-4-1991)에서는 115°C 1000시간 JEC 217-1984에서는 105(°C) 180시간의 가속 과전 시험에 따라 수명을 보증하고 있다.

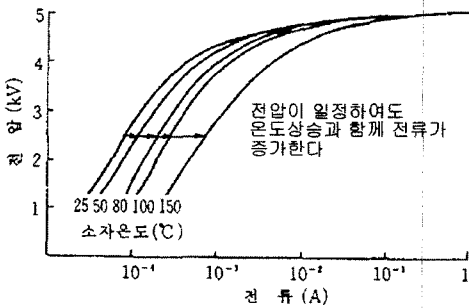


그림 4. 소자 온도에 따른 누설전류변화

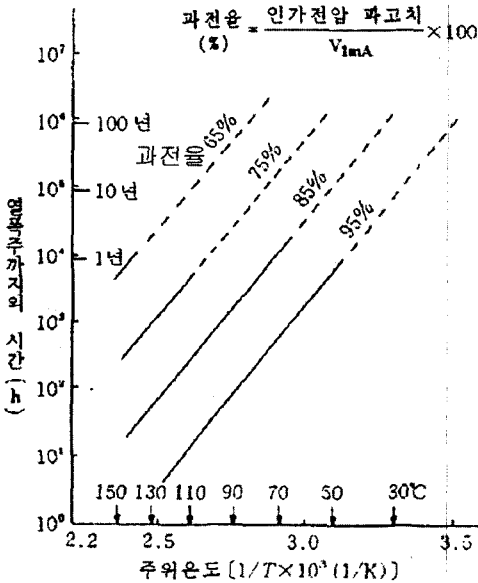


그림 5. 과전에 의한 피뢰기의 열화

다) 서지흡수에 의한 열화

ZnO 소자의 저항분 누설전류는 단시간 과전압 이라든가 개폐서지에 의한 비교적 긴 파형(수백  $\mu$ s ~ 수백 ms)의 큰 에너지를 흡수하면 온도 상승에 의해 일시적으로 증가하지만, 온도가 상온으로 되돌아오면 원래 값으로 복귀하는 경향이 있다.

한편 뇌 서지와 같이 단파형(수  $\mu$ s ~ 수십  $\mu$ s)의 대용량 전류가 반복해서 흐르면 그림 6에서처럼 누설전류는 상온으로 돌아와도 증가하는 경향을 보이고 있다.

이것은 소재의 특성이 영구적으로 변화한 것을 나타내는 것으로 열화현상이라 생각된다.

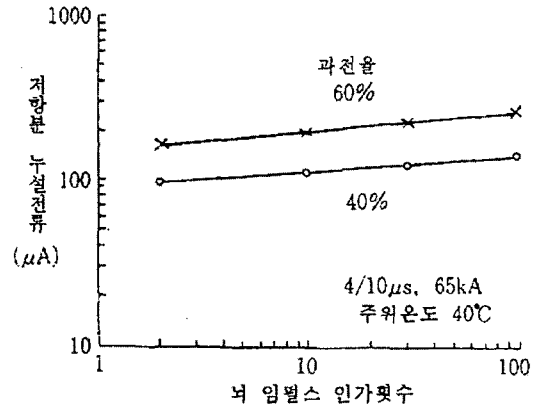


그림 6. 서지 흡수에 따른 누설전류변화

라) 흡수에 의한 열화

소자가 흡수된 경우에는 전압, 전류 특성에 변화가 생기기 때문에 누설전류는 그림 7에서와 같이 증가하는 경향을 보인다. 산화아연형 피뢰기(애자형) 내부를 인공적으로 흡수시킨 경우에 그림 8 ~ 10에 나타난 것처럼 과전 이후에 저항분 누설전류가 변화를 보이고, 전 누설전류는 미약하지만 과전 5개월 후의 저항분 누설전류 및 전 누설전류는 큰 변화를 보였다.

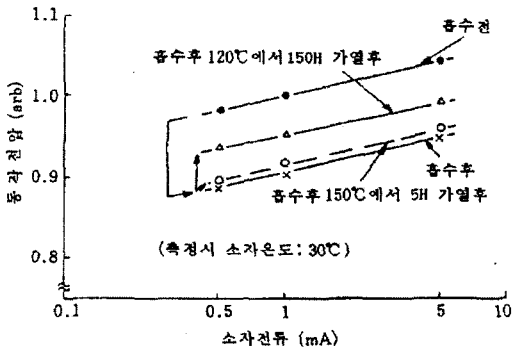


그림 7. 흡수에 의한 누설전류 변화

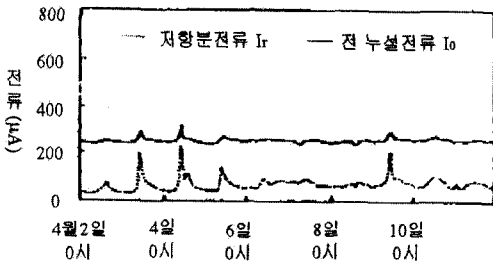


그림 8. 흡수 피뢰기의 누설전류(과전직후)

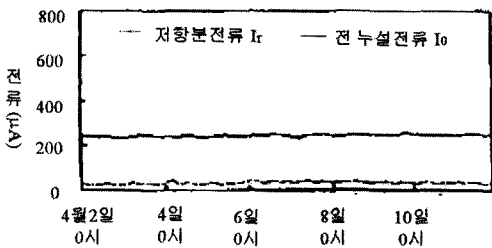


그림 9. 정상 피뢰기의 누설전류(과전직후)

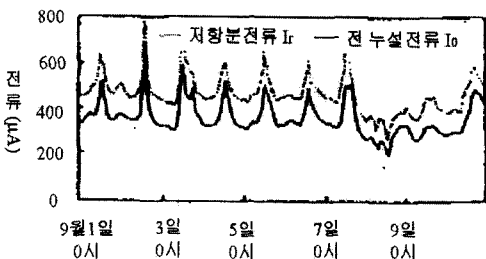


그림 10. 흡수 피뢰기의 누설전류(5개월 후)

마) 그 외의 주요한 열화

염진해, 풍해, 강우 등에 의한 누설전류의 증가와 애관 표면과 내부에서의 부분방전의 영향에 의한 열화도 있다.

### 3. 폴리머 피뢰기의 침수시험

최근 수분 흡습으로 인한 피뢰기의 고장이 다수 발생함에 따라 국내 배전선로에 대표적으로 사용되는 폴리머 피뢰기의 침수특성시험을 통해 수분침투에 대한 저항성 및 재질특성 변화를 분석하였다. 피뢰기의 고장이 침수 시험을 위하여 정격이 18[kV], 5[kA]인 3개사의 신품 폴리머 피뢰기를 준비하여 실험을 실시하였다. 침수 시험용 수조의 크기는 30[cm] × 50[cm] × 15[cm]이며 상온에서 130[°C]까지 온도 조절이 가능한 것이다. 침수 조건은 수온 95[°C]에서 80일간 시험하였다.

침수시험 후 전기적인 특성 분석과 하우징의 특성 변화에 대해 분석하였다. 피뢰기의 누설전류는 침수 시간에 따라 증가하였으며, 동작개시전압, 절연저항 측정은 신품과 침수 시험 후 측정값의 차이가 컸다. 이것으로 피뢰기의 수분 침투 여부를 확인할 수 있었다. 피뢰기의 단로기 또한 모두가 수분 침투가 있었으며 기밀유지에 개선이 필요하다. 시료 하우징은 표면 열화에 의해 발수성이 많이 저하되었음을 확인할 수 있었다.

그림 11과 그림 12는 시료의 침수시험 전과 후의 시료를 STRI CIS 가이드에 따라 발수성을 시험한 것으로 침수 시험 후 발수성이 떨어짐을 육안으로 확인할 수 있었다.

### 4. 복합가속열화 시험장치의 개발

#### 4.1 복합가속열화 시험장치 구조

복합가속열화 시험장치는 폴리머피뢰기가 사용되



그림 11. 발수성(시험전) -HC1



그림 12. 발수성(침수 80일 후)- HC1

는 현장의 환경을 모의할 수 있도록 설계되었으며, 여기에 인가되는 환경요소는 자외선(UV), 온도, 습도, 고전압 인가, 염무, 강우 등이 있으며 태양광의 자외선을 모의하기 위하여 시료에서 15[cm] 떨어진 곳에서 파장이 280~315[nm]인 UV-B 램프가 조사되도록 제작하였고 기온은 -20~80[°C] 변화 범위에서 여름주기에는 15~80[°C], 겨울주기에는 -20~15[°C]까지 변화 시키도록 하였다. 그리고 습도는 여름주기에는 40~80[%], 겨울주기에는 30~60[%]로 변화시키며 피뢰기 표면 열화에 가장 큰 영향을 미

치는 항목으로 예상된다.

전압은 소자에 스트레스가 가해지도록 최대연속운전전압(MCOV)인 15.3[kV]를 인가하며 염무는 전도도가 4000 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]인 물을 2.5 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]씩 분무하고 강우는 전도도가 30~70 [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]인 물을 5[mm/min]의 강수량 비율로 분사한다.

누설전류 측정방식은 복합열화가속 시험 중 피뢰기의 열화상태 감시를 위하여 누설전류 측정시스템을 설치하였고, 피뢰기 애관을 통한 누설전류와 내부를 통한 누설전류를 구분하여 측정할 수 있도록 하였으



그림 13. 복합가속열화 시험장치

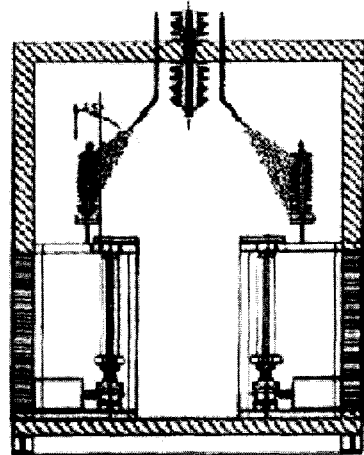


그림 14. 복합가속열화시험장치 개략도

며, 내부 누설전류 중에 포함된 저항분 누설전류도 분석이 가능하도록 구성하였다.

챔버 내에서 열화 된 피뢰기 시료에 대해 시험기간 동안 측정된 내부 누설전류 변화량을 분석하고, 하우징 표면의 트래킹이나 침식상태를 관찰하여 열화상태를 평가하였으며, 동작개시전압 및 미세구조 분석 등과 같은 화학분석 시험도 병행하였다. 그림 13은 복합가속열화 시험장치이며 그림 14는 시험장치의 개략도이다.

### 4.2 복합가속열화 시험주기

국내의 기후환경을 모의하여 복합열화주기를 만들었다. 여름주기와 겨울주기로 나누어지며, 여름주기에는 온도, 습도 그리고 자외선이 가해지는 시간이 많으며, 강수도 자주 있다. 겨울주기에는 기온 및 습도가 낮으며, 강수가 1회에 그치고 여름주기는 11회 반복하며 겨울주기는 10회 반복하여 전체 주기의 3000시간 동안 반복된다. 다음 표 2는 가속열화 주기표이다.

표 2. 복합열화시험장치 주기

(a)여름주기

염무					
강수					
온도(°C)		15			
습도(%)		40			
UV					
전압(kV)	15.2				
시간(hour)	1	2	3	4	5

(b)여름주기

염무					
강수					
온도(°C)	4				
습도(%)	30				
UV					
전압(kV)	15.2				
시간(hour)	1	2	3	4	5

### 4.3 옥외시험장

폴리머 피뢰기의 열화과정을 관찰하기 위해 옥외 열화 테스트 시험장을 서해안(고창)에 설립하였다. 옥외 열화 테스트 결과와 복합가속열화 시험장치의 결과를 비교할 것이다. 이 결과를 통해 옥외 조건보다 복합가속열화 챔버에서 열화가 어느 정도 가속되는지 결정할 예정이다. 20개의 폴리머 피뢰기를 시험장에 설치하여 장기 신뢰성을 평가할 예정이다. 인가전압은 13.2(kV)이고, 기후 상태와 누설전류의 관찰을 통해 기상조건이 폴리머 피뢰기의 열화에 미치는 영향을 파악할 수 있을 것이다.

측정된 기후조건은 다음과 같다.

- 풍속과 풍향
- 상대 습도
- 기온
- 이슬점 온도
- 기압
- 강수량
- UV-B(280~315[nm])방사

누설전류에 관한 측정요소들은 다음과 같다.

- 누설전류 피크
- 누설전류 펄스 수
- 평균누설전류
- RMS 누설전류

그림 15는 옥외 열화 시험장이다.

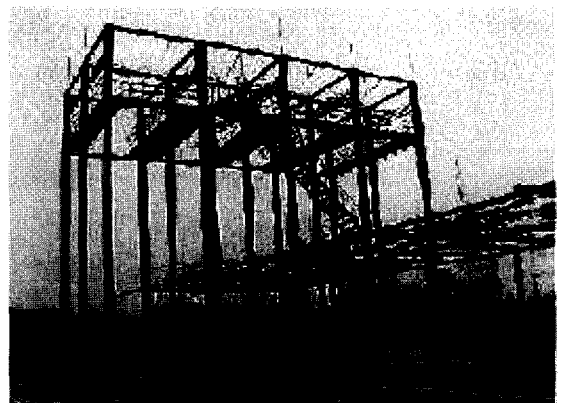


그림 15. 옥외 열화 시험장

## 5. 폴리머 피뢰기 고장 사례

그림 16은 현장에서 사용 중 고장이 발생한 피뢰기

를 해체한 사진이며, 그림 17은 FRP 와인딩 계면에서 발생한 트래킹의 사진이다. 고장 파괴기는 하우징과 피뢰기 소자 어셈블리 사이의 계면에서 트래킹이 발생하여 계면관통 지락이 발생한 것으로 판단된다.

계면에서 트래킹이 발생한 원인은 기밀유지 실패 및 계면의 접촉상태 불량으로 인하여 계면에 수분 및 이물질이 침투함으로써 트래킹이 발생한 것으로 사료된다.

동일한 위치의 고장상이 아닌 전전상의 파괴기를 기밀 시험한 후 측정된 누설전류가 1[mA] 이상이었으며, 동작개시전압도 0.8[kV]에 불과한 결과로 보아 내부에 흡습이 발생하는 것으로 추정되므로 기밀 상태가 양호하지 않은 것으로 판단되었다.

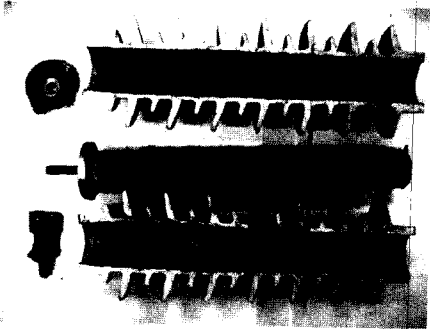


그림 16. 고장 파괴기 해체

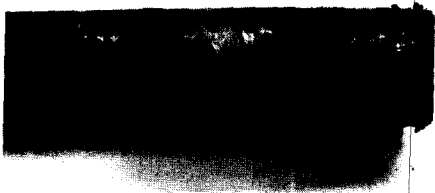


그림 17. FRP 계면 트래킹

는 FRP 와인딩을 애관에 삽입하는 폴리머 피뢰기의 수분침투 저항성이 약한 것으로 나타났으며, 단로기 또한 수분 억제 능력이 취약한 것으로 나타나 구조개선이 필요한 것으로 판단된다.

복합가속열화 시험장치 시험 후 피뢰기는 단기간에 상당한 열화가 발생하였다. 그리고 누설전류는 증가하였고 발수성은 감소하였으며 표면은 열화와 크랙이 발생하였다. 이를 옥의 열화 시험장의 시료와 비교 분석하여 향후 가속계수를 결정할 예정이다.

폴리머피뢰기의 장기 신뢰성이 확보되기 위해서는 고장 점유가 가장 많은 수분 흡습 및 제조 불량의 원인을 분석이 필수적이며 이 문제를 개선하기 위한 대안이 요구된다. 따라서 신뢰성평가를 위해 침수 시험 및 복합가속열화 시험을 실시하여 성능평가시험을 비교하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] R.Matsuoka, "Effect of test parameters on deterioration of polymer insulator housing materials by accelerated aging tests", High Voltage Engineering Symposium, IEE, 1999.
- [2] Jeffrey, "Multistress aging tests of polymer housed surge arrester", IEEE Trans. Power Delivery vol.13, No 27, 1998.
- [3] W. Strunk, Jr. and E.B. White, The Elements of Style, New York, NY, USA: The Macmillan Company, 1959.
- [4] K.S. Cole and R.H. Cole, "Dispersion and absorption in dielectrics I. AC characteristics," J. Chem. Phys., vol. 9, pp. 341351, 1941.
- [5] E. Detyna, "Perfect inviscid fluids and gauge theory," in Mathematical Methods in Hydrodynamics and Integrability in Dynamical Systems, no. 88 in AIP Conference Proceedings, (New York), pp. 99107, American Institute of Physics, 1982.

## 6. 결 론

폴리머 피뢰기를 침수 시험한 결과 소자를 포함하

[6] 송일근, 김찬영, 김주용, 한재홍, 이병성, "배전기자의 수명예측 기준제정(최종보고서)", 전력연구원, 2000.

[7] 송일근, 김찬영, 김주용, "배전용 피뢰기 열화특성 분석", 전력연구원, 1999.

◇ 저 자 소 개 ◇



권태호(權泰皓)

1975년 5월 21일생. 2000년 호서대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003~ 현재 : 한전 전력연구원 전력계통연구

실 연구원.

Tel : 042-865-5921.

E-mail : thkwon@kepri.re.kr



송일근(宋一根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 전기공학과(학사). 1986년 숭실대 대학원 전기공학과(석사). 1997년 숭실대 대학원 전기공학과(박사). 1985년~현재, 전력연구원 배전기술그룹 P/L(책임급/부장). 관심

분야: 배전설비 건전성평가 및 열화진단기술.

Tel : 042-865 -5920.

E-mail : iksong@kepri.re.kr