

Measurement and Analysis of Frequency Characteristics of Grounding Systems

崔鍾基* · 安勇豪* · 具禪根* · 朴基濬* · 尹珍烈** · 鄭吉朝** · 柳輔赫*** · 金正勳§
 (Jongkee Choi · Yongho Ahn · Seongeun Goo · Kijun Park · Jinyul Yoon · B.H. Ryu · J.H. Kim)

Abstract - Since DC ground resistance, which is a good index of the performance of a grounding system in low frequency, does not show the performance in transient state. We measured ground impedances in frequency domain ranging from 0.1 Hz to 900 kHz maximum to quantify the transient grounding performance of 4 types of grounding system. Transfer function was derived from the measured frequency-dependant ground impedance of a grounding grid. A simulation has been performed to verify the transfer function using EMTP (Electro-Magnetic Transient Program).

Key Words : ground impedance, ground mesh, frequency characteristics, EMTP

1. 서 론

접지저항은 접지극의 성능을 수치화하여 보여주는 가장 대표적인 성능지수이지만, 낙뢰나 각종 스위칭 동작시 발생되는 썬지전류 유입시의 접지성능까지 알려주지는 못한다. 이는 주파수가 커질수록 저주파 대역에서는 무시할 수 있었던 접지도체의 인덕턴스와 유전체로서의 토양성질 등으로 인하여, 그 특성이 저주파일 때와 매우 달라지기 때문이다. 접지저항이 갖는 이러한 한계 때문에, 썬지 유입시 접지극의 접지성능을 정량적으로 나타내기 위해서 접지극의 임펄스 접지임피던스를 측정하기도 한다 [1, 2]. 그러나 임펄스 접지임피던스는 주입전류의 파형에 의존적인 값으로서, 접지저항처럼 인가전원에 독립적인 값이 아닌 상대적인 성능지수라는 한계를 갖는다 [3].

주파수 영역의 접지임피던스는 저주파 대역의 접지성능만을 보여주는 일반적인 접지저항과는 달리, 고주파 대역까지도 포함하기 때문에 과도상태 접지성능지수가 될 수 있으며, 임펄스 접지임피던스와는 달리 입력전원에 독립적인 값이다. 즉 접지임피던스의 주파수 특성을 알게되면, 푸리에 변환기법에 의해 임의 파형의 전류 인가시 접지극의 전위상승 파형을 계산할 수 있게된다. 이러한 이유로 접지극의 임펄스 전류주입을 통해 얻어진 시간영역의 임펄스 응답의 주파수 스펙트럼으로부터 접지임피던스를 추출하려는 시도가 있었다[4]. 몇몇 연구자들은 주파수 영역에서 직접적으로 접지

임피던스를 측정하기도 하였으나, 이는 가압된 변전소의 접지계통에서 60 Hz의 접지임피던스를 측정하는 것이 목적이었다. 따라서 측정 주파수범위도 최대 수백 Hz를 넘지 않으며, 이는 접지극의 과도특성 연구와는 거리가 있는 것이었다 [5, 6].

이 논문에서는 접지임피던스 측정을 위해 구축한 시스템에 대하여 간략히 기술하였고, 주파수 범위 0.1 Hz에서 최대 900 kHz의 시험전류를 접지시스템에 주입하면서 접지극의 전위상승을 측정함으로써 주파수 영역에서 직접 접지임피던스를 측정하였다. 접지망 및 송배전 접지계통이 병렬연결된 접지계통의 접지임피던스 측정사례를 각각 보였으며, 측정된 접지임피던스로부터 전달함수를 구하였다. 이렇게 구해진 전달함수를 이용한 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) 계산사례를 제시함으로써 접지계통의 전자기 과도현상의 정량적 해석이 가능함을 보였다.

2. 본 론

2.1 접지임피던스 측정시스템

그림 1은 접지임피던스 측정시스템과 측정회로의 구성을 보인 것이다. 측정시스템 주요 구성요소와 각각의 기능은 아래와 같다.

- (1) 신호발생기 : 0.1 Hz ~ 최대 900 kHz 정현파 발생
- (2) 파워앰프 : (1)의 신호 증폭 (접지극-보조전극간 시험 전류 인가)
- (3) 프로그래머블 고역필터 : 가압된 접지계통에 잔류하는 기본주파수(60 Hz) 및 고조파 잡음 제거
- (4) 오실로스코프 : 접지극 주입전류 및 전위파형 측정
- (5) 휴대용 PC : 측정파형의 스펙트럼 분석

* 正 會 員 : 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

** 正 會 員 : 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원

*** 正 會 員 : 한국산업안전공단 기술위원

§ 正 會 員 : 홍익대학교 전기공학과 교수

接受日字 : 2002年 4月 1日

最終完了 : 2003年 11月 1日

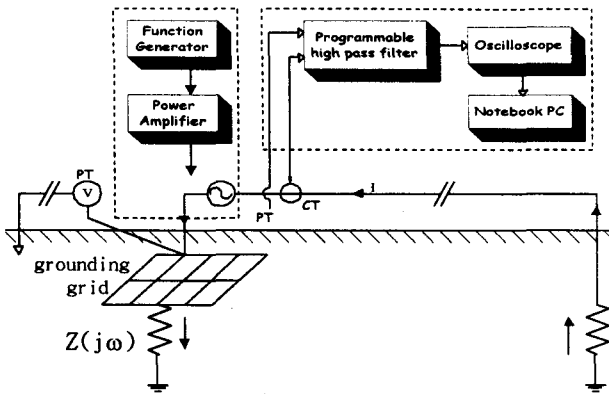


그림 1. 접지임피던스 측정시스템과 측정회로
Fig. 1. Experimental set-up

주파수별 접지임피던스 측정절차는 다음과 같다. 그림 1의 함수발생기에서 발생된 전압신호를 파워앰프로 증폭하여 접지망과 원거리 전류접지극 사이에 전류를 흐르게 한다. 이때 인가전류와 접지망의 전위상승 파형을 측정하여 푸리에변환을 통해 인가전류의 주파수에서의 접지임피던스를 구한다. 인가전원의 주파수를 달리하면서 측정을 반복함으로써 주파수별 접지임피던스를 얻는다.

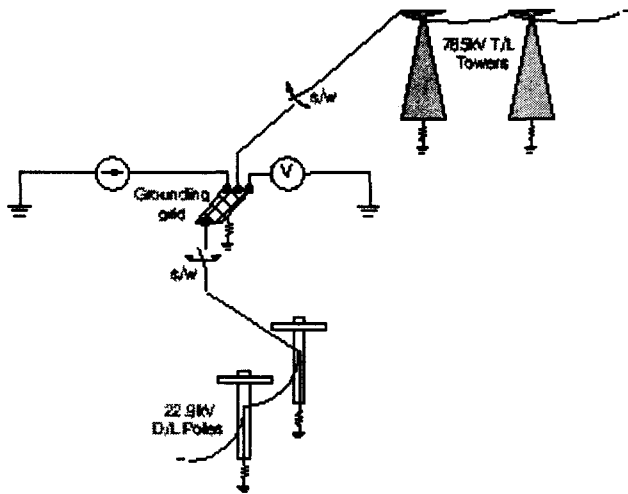


그림 2. 실증시험장 구성
Fig. 2. Configuration of test site

2.2 접지임피던스 측정사례

그림 2는 접지임피던스 측정을 위한 실증시험장 각 부분의 배치를 보인 것이며, 측정대상 시험접지망의 제원은 각각 면적 27 m x 9 m, 도체굵기 150 mm², 매설깊이 약 1.1 m, 접지도체 간격 3 m 이다. 시험접지망으로부터 약 100 m 거리에 765 kV 송전철탐 4기로 구성된 시험선로가 있으며, 그 반대쪽에 22.9 kV 상용선로가 위치하고 있다.

접지임피던스의 측정주파수 범위는 0.1 ~ 최대 900 kHz 이었고, 다음의 4가지 경우를 대상으로 변전소 접지망과 송전철탐 탐각접지 및 배전선로 중성선의 다중접지계통의 병렬연결에 따라 주파수별 접지임피던스가 어떻게 변동되는지를 측정하였다.

- (A) 시험접지망 단독일 때
- (B) 시험접지망과 765 kV 송전철탐의 탐각접지(4기) 병렬연결시
- (C) 시험접지망과 22.9 kV 상용선로의 중성선 병렬연결시
- (D) 시험접지망, 765 kV 송전철탐 탐각접지 및 22.9 kV 중성선 다중접지 병렬연결시

그림 3~6은 접지계통 A,B,C,D의 접지임피던스 측정결과를 각각 보인 것이다.

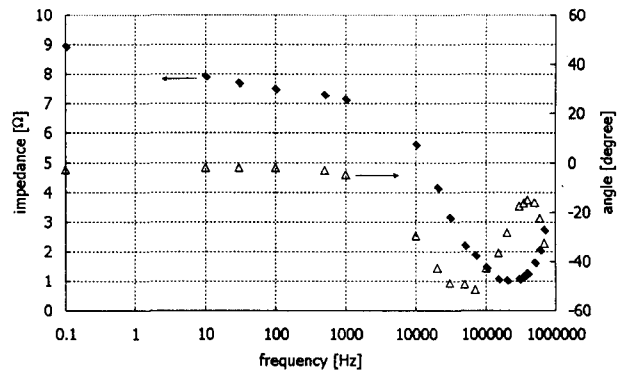


그림 3. 접지계통-A의 접지임피던스 측정결과
Fig. 3. Measured ground impedance for the system (A)

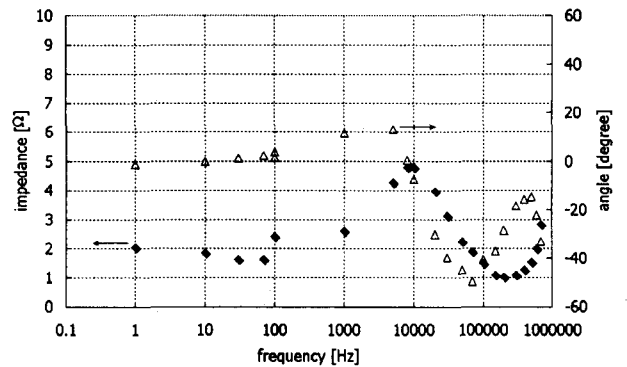


그림 4. 접지계통-B의 접지임피던스 측정결과
Fig. 4. Measured ground impedance for the system (B)

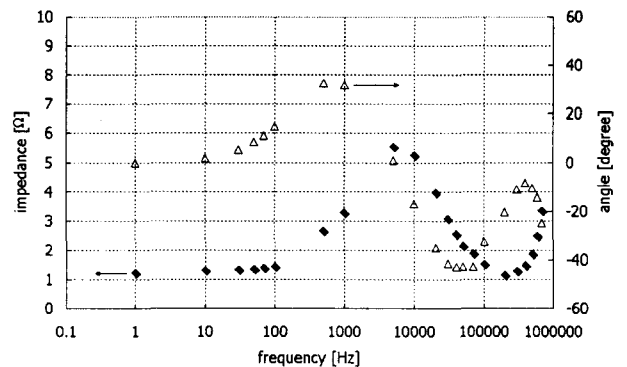


그림 5. 접지계통-C의 접지임피던스 측정결과
Fig. 5. Measured ground impedance for the system (C)

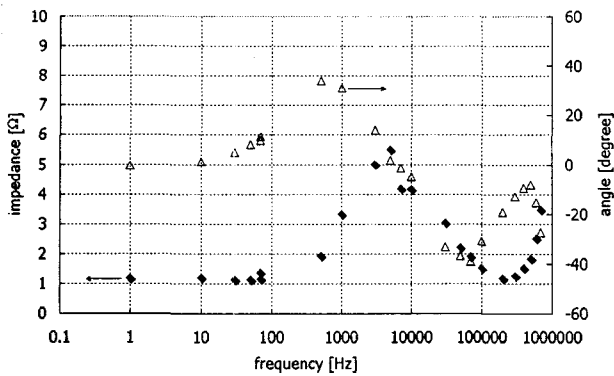


그림 6. 접지계통-D의 접지임피던스 측정결과
Fig. 6. Measured ground impedance for the system (D)

접지계통의 일반적인 주파수 특성은 다양한 매질이 복합된 비균질 매질로서의 토양 모델링의 곤란함과 더불어, 접지망을 구성하는 접지도체와 접지도체, 접지도체와 토양간 상호작용을 기술하는 방정식의 복잡함으로 인해 그 설명이 곤란한 면은 있으나, 그림 3~6의 측정결과에 근거하여 접지임피던스의 주파수 특성을 다음과 같이 요약하였다.

- (1) 접지망 단독일 때(그림 3), 주파수가 증가할수록 접지임피던스의 크기와 위상이 감소한다. 이는 접지임피던스의 실수부(저항성분)가 주도적인 경우, 주파수 증가에 따라 저항율이 감소하는 토양의 주파수 특성 [9]을 추종하기 때문으로 생각된다.
- (2) 접지망이 송배전 접지계통과 병렬연결되면(그림 4~6), 접지망 단독일 때와는 반대로, 주파수가 증가할수록 접지임피던스 크기와 위상이 증가한다. 이는 접지임피던스에서 실수부(저항성분)가 주도적이지 못할 때는 접지도체(인덕턴스)의 주파수 특성을 추종하기 때문으로 생각된다.

그림 3~6의 접지임피던스 측정결과는, 접지봉을 대상으로 한 임펄스 시험결과로부터 접지임피던스를 추출했던 Bourg 등이 발표한 연구문헌의 결과와 비교했을 때, 주파수에 따른 접지임피던스 크기나 위상의 변이경향이 서로 유사함을 보여준다 ([4], 그림 7 참조). Bourg의 측정결과는 접지봉의 길이가 길어질수록, 즉 접지저항이 작아질수록 주파수 증가에 따라 접지임피던스의 크기와 위상이 증가하였으며, 본 논문(그림 4~6)에서 시험대상이 접지봉이 아닌 접지망이라는 차이점이 있지만, 단독의 접지망과 송배전 접지계통과의 병렬연결로 인해 접지저항이 작아진 경우에 주파수 증가에 따라 접지임피던스의 크기와 위상이 증가하였다. 또한 Bourg의 측정결과 중 길이가 짧고 접지저항이 큰 접지봉일 때의 결과는, 본 논문에서 외부 접지망과 병렬연결이 없이 접지망 단독일 때의 접지임피던스와 그 주파수 특성이 유사하다. 즉 주파수가 증가할수록 접지망의 접지임피던스 크기와 위상은 감소한다.

그림 3~6에서 볼 때, 접지망과 송배전 접지계통의 병렬연결시 약 10 kHz 이하 주파수 대역의 접지임피던스 크기가 감소한다. 예를 들어 1 Hz에서 접지망 단독일 때 약 8 Ω, 송전 접지계통 병렬연결시 약 2 Ω, 송배전 접지계통이 모두 병렬연결되면 약 1 Ω으로 감소한다. 그러나 10 kHz를 초과하면 접지망과 송배전 접지계통의 병렬연결에 의한 접지계통의 주

파수 특성 변화는 매우 적다. 이는 시험대상 접지망에서 외부 접지계통의 병렬연결로 인한 접지임피던스 크기 저감 또는 접지성능의 개선효과는 10 kHz 이하의 주파수 대역에만 제한된다는 것을 의미한다. 이러한 접지계통의 주파수 특성은 토양구조와 토양의 주파수 특성 및 접지극 형상 등의 함수이다.

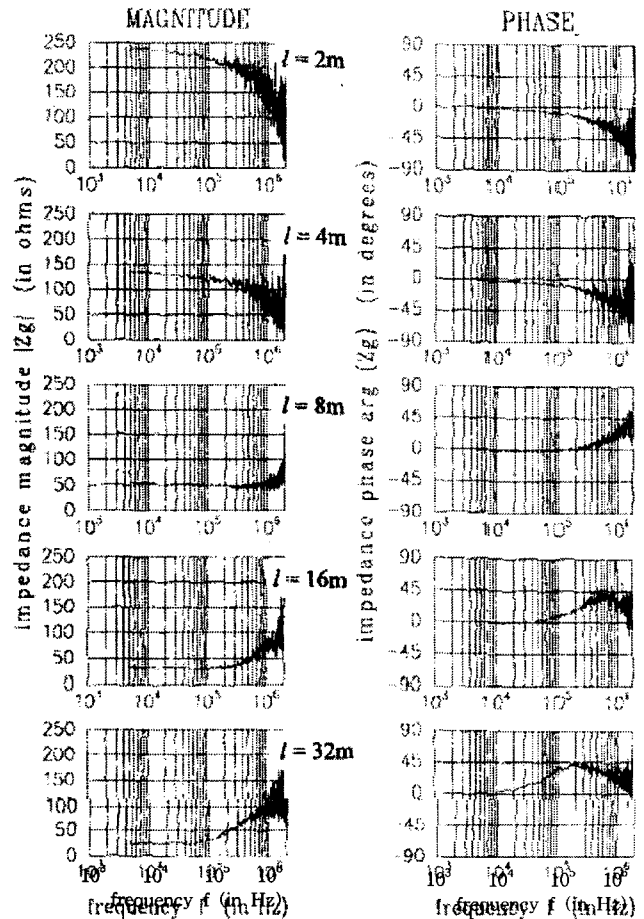


그림 7. 접지봉 길이와 주파수에 따른 접지임피던스^[4]
Fig. 7. Ground impedances of ground rod with different rod lengths

2.3 과도현상 해석을 위한 접지극 모델링

접지임피던스의 주파수 특성을 알면, 그로부터 푸리에 변환기법을 이용하여 전달함수를 구함으로써 임의의 전류파형 유입시 접지극 전위상승을 계산할 수 있다. 본 절에서는 2.2 절에서 측정된 접지임피던스의 주파수특성으로부터 전달함수를 추출하고 EMTP를 이용하여 임펄스 전류유입시 접지극의 전위상승을 계산하였다.

ARMAFIT은 EMTP의 ATP (Alternative Transient Program) 버전에 포함되어 있는 독립된 유틸리티로서, 주파수 의존적인 가공지선이나 케이블 모델을 만들어주는 별도의 fitting 프로그램으로서 어드미턴스값으로 주어진 주파수 특성을 라플라스 s-함수 모델로 fitting하는데 사용하였다 [7]. s-함수 모델은 EMTP 데이터 케이스내의 branch 카드에서 KIZILCAY F-DEPENDENT 요소로서 사용되었다.

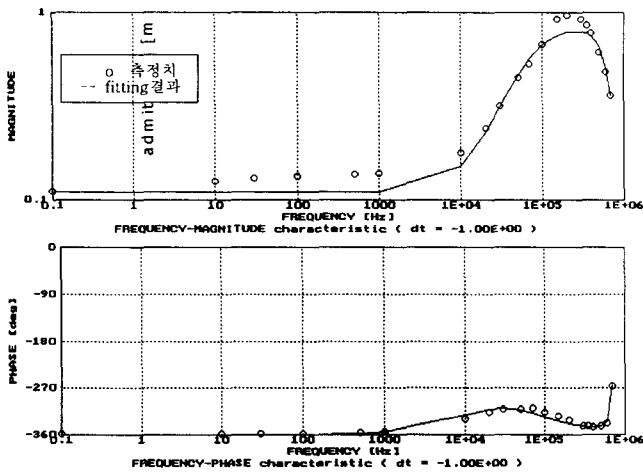


그림 8. 접지계통-A의 어드미턴스 vs. 주파수.
 Fig. 8. Admittance vs. frequency for the system (A)

그림 8은 접지망 단독(접지계통-A)의 접지임피던스 측정치를 어드미턴스로 바꾸고 ARMAFIT을 이용하여 3차의 라플라스 s-함수로 fitting한 결과이며, 주파수 특성이 보다 복잡한 접지계통-B, C, D의 경우에는 ARMAFIT을 이용한 전달함수 식별이 곤란하였다.

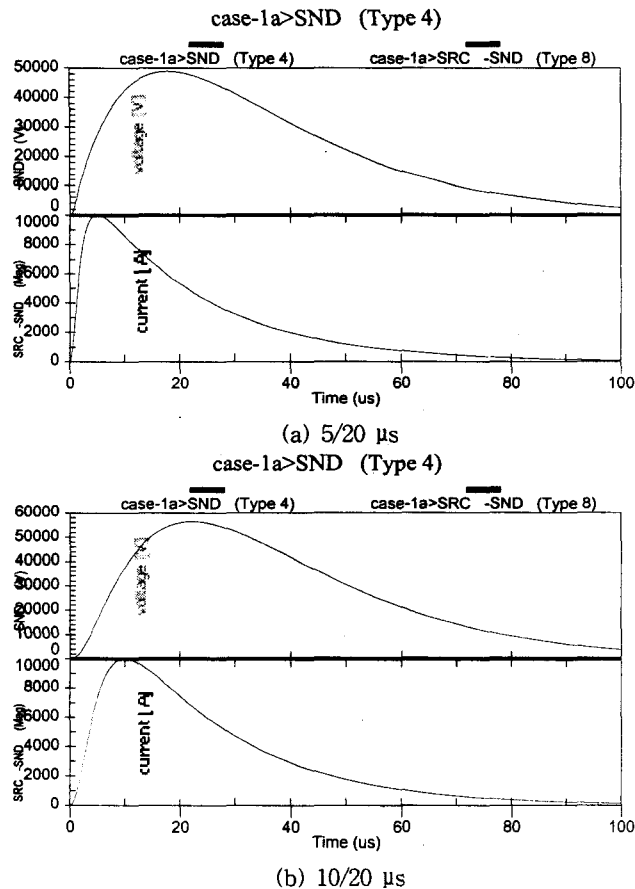


그림 9. 접지극의 과도 전위상승 계산결과
 Fig. 9. Transient potential rise calculation results

그림 9는 KIZILCAY 요소에 파두치 10 kA, 파미장이 20

μs, 파두장이 각각 5, 10 μs인 전류를 인가했을 때 전위상승 계산결과를 보인 것이다. 본문에서 측정된 결과와 EMTP를 이용하여 임의의 전류파형 인가시 접지극 전위상승 계산이 가능함을 보여준다.

3. 결론

접지극의 과도상태 접지성능 특성을 평가하기 위하여 접지망 단독일 때와 송배전 접지계통이 접지망과 병렬연결되었을 때의 접지임피던스를 주파수 영역에서 직접 측정하였다. 송배전 접지계통과 접지망이 병렬연결된 접지계통의 접지임피던스 측정결과는 Bourg 등이 발표한 접지봉 임피던스 측정결과와 유사한 주파수 특성을 보였다. 4가지 종류의 접지시스템에서 실측된 접지임피던스의 주파수 특성으로부터 전달함수를 구하고 EMTP를 이용한 접지극 전위상승 계산사례를 보임으로써 접지극의 과도상태 접지성능 연구에 유용하게 사용할 수 있음을 보였다.

참고 문헌

- [1] Chen Yunping, Zha Xiaoming, Zhao Lei, "The measurement of impulse grounding resistance and inductance of grounding network", International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998, vol. 1 pp. 352~355
- [2] I.F.Gonos, F.V.Topalis, I.A.Stathopoulos, "Transient impedance of grounding rods", International Symposium on High Voltage Engineering, 1999, vol.2 pp. 272~275
- [3] Hyung-soo Lee, Sang-hun Chang, "Simulation of transient grounding performance of grounding grid", International Conference on Electrical Engineering, 2001
- [4] S.Bourg, B.Sacepe, T.Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1995, pp. 584~589
- [5] A.P.S.Meliopoulos, S.Patel, G.J.Cokkinides, "A new method and instrument for touch and step voltage measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9, Oct. 1994, pp. 1850~1860
- [6] I.D.Lu, R.M.Shier, "Application of a digital signal analyzer to the measurement of power system ground impedance", IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-100, no.4, Apr. 1981
- [7] T.Noda, N.Nagaoka, A.Ametani, "Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, Jan. 1996, pp. 401~411
- [8] J.K.Choi, J.W.Woo, E.B.Shim, G.J.Jung, "Computer simulation of transient performance of grounding grid", Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, 2001
- [9] C.Portela, "Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior", International Symposium on

EMC, Vol.2, 1999, pp.1004~1009

- [10] R.Johansson, System modeling and identification, Prentice Hall, 1993
- [11] 이복희, 박종순, "서지전류에 대한 과도접지임피던스의 특성", 대한전기학회 논문지, 1997, pp. 717~723
- [12] 전력연구원, 축소형 변전소 접지효과 증대방안 연구(최종보고서), 1998, pp. 56~69
- [13] 전력연구원, 운전 중인 변전소의 접지계통 진단기술 개발 연구(최종보고서), 2002, pp. 72~102

저 자 소 개



최 종 기(崔 鍾 基)

1969년 2월 1일 생. 1992년 동국대 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대 전기제어공학과 졸업(석사). 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
 Email : jkchoi@kepri.re.kr



윤 진 열(尹 珍 烈)

1956년 3월 15일 생. 1982년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원
 Email : jyoon@kepri.re.kr



안 용 호(安 勇 豪)

1961년 7월 10일 생. 1984년 인천대 전기공학과 졸업. 2000년 전북대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 한국전력공사 입사. 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
 Email : yhan@kepri.re.kr



정 길 조(鄭 吉 朝)

1949년 8월 16일 생. 1983년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1974년 한국전력공사 입사. 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 송변전기술그룹 그룹장



구 선 근(具 禪 根)

1967년 10월 16일 생. 1986년 연세대 물리학과 졸업. 1994년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 송변전기술그룹 선임연구원
 Email : freeon@kepri.re.kr



류 보 혁(柳 輔 赫)

1956년 9월 7일 생. 1983년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 홍익대학교 대학원 전기제어공학과 박사과정 수료 한국산업안전공단 산업안전보건연구원 기술지원 재직중.
 Email : bhryu@kosha.net



박 기 준(朴 基 濬)

1968년생. 1991년 인하대 공대 응용물리학과 졸업. 1993년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 송변전기술그룹 선임연구원
 Email : killer@kepri.re.kr



김 정 훈(金 正 勳)

1955년 9월 13일 생. 1978년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 미국 Penn State Univ. 방문교수. 현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수. 대한전기학회 사업이사, 평의원 및 용어위원회 위원장
 Email : kimjh@wow.hongik.ac.kr