

Analysis of Conductive Interference Around Substation Exclusively Fed by Cables Under Ground Fault Condition

崔鍾基[†] · 李東一^{*} · 金在俊^{**} · 柳然杓^{***} · 鄭昌守[§] · 金慶哲^{§§}

(Jong-kee Choi · Dong-il Lee · Jae-joon Kim · Yeon-pyo Yoo · Chang-soo Jung · Kyung-chul Kim)

Abstract - Recently, substations have been constructed in GIS (Gas Insulated Switchgear) and indoor type because of the increasing difficulties of securing locations. In case of urban substations, it is also common that the substations are exclusively fed by underground cables. Sometimes, the infrastructures in urban area, such as communication facilities, are located near substations to be constructed. In this paper, we examined such a case that a branch office building of KT(Korea Telecom) was located near 154 kV underground GIS substation under construction with about 100 meters of the lateral distance between two facilities. GPR (Ground Potential Rise) at the substation and the transferred earth potential at the KT building through the earth in SLG (Single-Line-to-Ground) fault condition were investigated based on a series of computer simulations. The calculated earth potential at a distance of 100 m from the substation was below 120 V which satisfying the limit value of 650 V.

Key Words : 접지전류, 접지저항, 저항성간섭

1. 서 론

최근 들어 신설되는 변전소는 부지확보의 어려움 등을 이유로 옥내 GIS(Gas Insulated Switchgear)형으로 건설되는 경우가 대부분이며, 특히 도심지 변전소의 경우에는 인입출선로가 모두 지중선인 경우가 많다. 이처럼 인입출이 지중선로인 변전소에서는 지락사고가 나더라도 변전소의 접지전위 상승의 매우 작은 것으로 알려져 있으나[1,2,3], 부지난 등의 이유로 변전소가 통신설비나 가스배관 등 중요한 기간시설물 인근에 건설되는 경우에 변전소 지락사고시 전위간섭에 이슈가 되는 경우가 종종 발생되고 있다. 본 논문에서는 154 kV 변전소로부터 약 100 m 인근에 통신설비(통신지국)가 위치하고 있는 경우에, 변전소 지락사고로 인해 토양을 통하여 통신설비에 미치는 저항성 간섭 또는 대지의 전위상승을 평가하고자 한다. 이를 위해 4회선의 지중선로에서 π 분기되는 변전소의 접지전류 계산모델을 구성하였고, 변전소의 접지저항 및 쉬스접지가 변전소 및 통신설비 전위상승에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 변전소 지락시 접지전류 및 전위 해석

2.1 계산모델의 기술

변전소 지락사고로 인한 인근 토양전위상승의 해석을 위해서는 먼저 지락점의 고장전류 외에 접지전류의 계산이 필요하지만, 일반적으로 전력계통 고장해석에 사용되는 대칭좌표법은 중성선과 대지를 통합하여 해석하므로 접지전류의 계산은 원칙적으로 불가능하다. 이같은 이유로 접지전류의 계산은 영상회로를 적절히 수정하여 계산하는 방법[4]이나 불평형회로를 직접 푸는 방법이 사용되나[5,6], 전자는 계산절차가 너무 복잡하여 최근에는 거의 사용되지 않고 있다. 본 논문에서는 F.P.Dawalibi가 제안한 양단소거법 기반의 SPLITS(Simulation of Power Line Terminal and Station)를 이용하여 접지전류를 계산한다. 이 프로그램은 EPRI 프로젝트의 일환으로 개발된 PATHS 프로그램이 상업용으로 개선된 것으로[7,13,14], 가공 송전선의 경우 EMTP와 계산결과도 거의 동일함이 확인되었다[16].

모의대상 전력계통의 간략도를 그림 1에 보였다. A,B변전소는 4회선 지중선로로 연결되어 있고 두 변전소 중간에서 π 분기하여 C변전소로 2회선이 공급되며, 전 구간이 모두 지중선로로 되어있다. 보다 상세한 선로 정보는 표 1에 요약하였다.

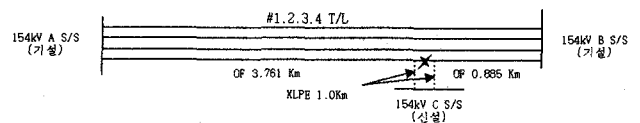


그림 1. C변전소 인근 계통도
Fig. 1. Underground T/L System under Consideration

[†] 교신저자, 正會員 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
E-mail : jkchoi@kepco.co.kr

* 正會員 : 한국전력공사 전력연구원 송전기술그룹장
** 正會員 : 한국전력공사 송변전건설처 건설기술팀 과장
*** 正會員 : 한국전력공사 전자통신처 전력유도팀 과장
§ 正會員 : 한국전력공사 전자통신처 전력유도팀 팀장
§§ 正會員 : 弘益大學校 電氣工學科 教授

接受日字 : 2005年 9月 22日
最終完了 : 2005年 11月 2日

표 1. 지중선로의 선종 및 길이

Table 1. Cable Spec. and T/L Lengths

구 간	길이 [km]	선 종	비고
A~B S/S	4.646	OF1200mm ² x 4.646 km(기설)	#1,2,3 T/L (기설)
B~C S/S	4.761	OF1200mm ² x 3.761km(기설), XLPE 1200mm ² x 1.0km(신설)	#4T/L
C~B S/S	1.885	OF1200mm ² x 0.885km(기설), XLPE 1200mm ² x 1.0km(신설)	1pi 분기

먼저 PSS/E를 이용하여 A~B 변전소간 선로에서 B 변전소로부터 0.885 km 지점에서 1선지락 사고전류를 계산한 하였으며, A, B 변전소에서 6 kA와 34 kA 가 각각 지락점으로 유입되는 것으로 나타났다. 이 값들을 근거로 A, B 변전소의 전원임피던스(각각 1.079+j14.416, .176+j2.551 Ω)를 산정하였으며 지락점에서 시작하는 1 km의 지중선로를 추가함으로써 C 변전소의 1선지락시 고장 및 접지전류 계산모델을 완성하였으며, 상시 부하전류는 무시하기로 한다.

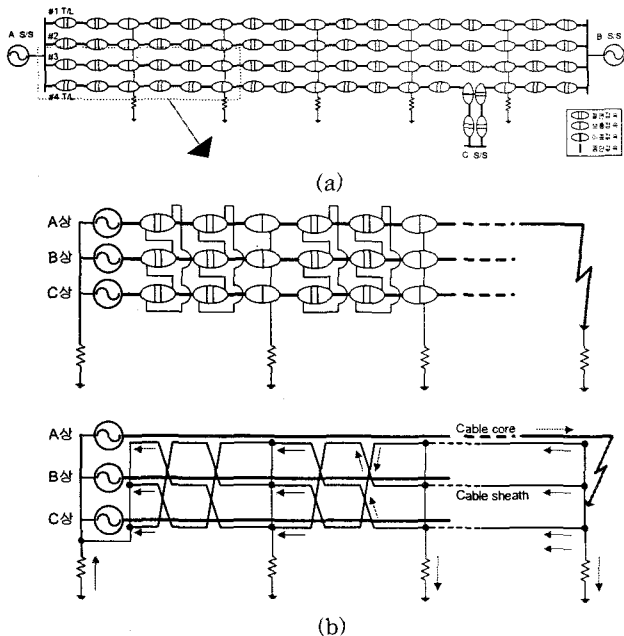


그림 2. 지중선로 접속함 구성

Fig. 2. Connection and Grounding Configurations of Underground Transmission Lines

그림 2는 각 회선의 접속함 접지상태 및 지락고장전류의 흐름도를 표시한 상세도이며, 접속함간 거리는 부록 1에 수록하였다. 지락고장시 지중선로는 고장상의 케이블 코어와 고장 및 건전한 케이블 쉬스들 사이의 강력한 유도결합(또는 차폐효과) 때문에 가공선로에 비해 불평형전류 또는 접지전류가 매우 작다[1,2,3]. 그림 3은 C변전소 1선지락시 A변전소- π 분기점간 고장선로의 쉬스전압 계산 예를 보인 것이며, 고장선로 중간의 4개 보통접속점(접지점)에서 쉬스전압이 동전위가 되는 것을 확인할 수 있다. 계산조건은 모든 선로의 쉬스는 양단에서 접지되었고, 등가전원단 접지저항은 0.1 Ω, 보통접속함 접지저항은 10 Ω 및 지락점(C 변전소) 접지저항은 1 Ω을 각각 상정한 경우이다.

그림 4는 같은 조건에서 각 선로들 중 한 상의 쉬스만을

선택하여 4회선 선로에서 쉬스전류 계산결과를 보인 것이다. 고장선로(그림 2의 #4 T/L)에 속한 쉬스에는 고장상과의 강한 유도결합에 의해 큰 귀환전류가 흐르고, 전력구 내의 고장 난 선로 건너편에 위치한 선로들은 고장상과의 쉬스간 유도결합이 약하므로 상대적으로 작은 귀환전류가 흐름을 확인할 수 있다.

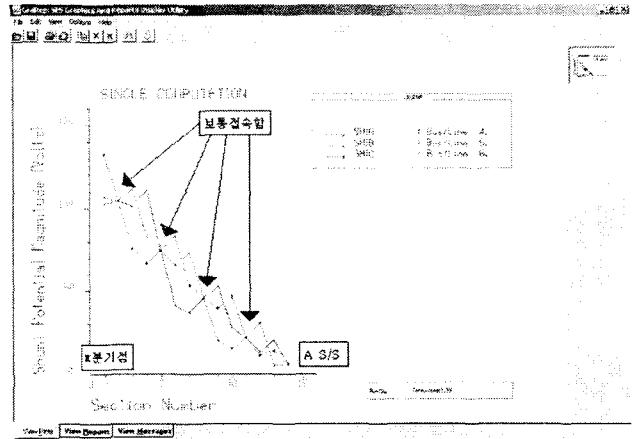


그림 3. C변전소 1선지락시 π 분기점-A S/S간 고장회선(#4 T/L)의 쉬스전위 분포

Fig. 3. Sheath Potentials Along a Faulted Line between π -junction and A S/S when SLG Fault at C S/S

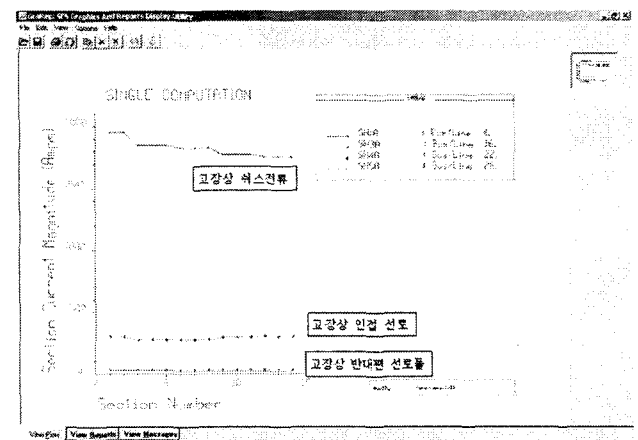


그림 4. C변전소 1선지락시 π 분기점-A S/S간 쉬스전류

Fig. 4. Sheath Currents between π -junction point and A S/S under SLG Fault at C S/S

그림 3과 4에서 보인 바와 같이 1선지락사고시 쉬스전류 및 전압분포 계산결과를 확인함으로써, 위에서 간략히 기술한 SPLITS 해석모델에 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

2.2 접지저항 및 중단접속 방법에 따른 영향

여기서는 앞 절에 기술한 SPLITS 모델을 기초로 하여 지락점인 C변전소 접지저항이 접지극의 전위상승(Ground Potential Rise)에 미치는 영향을 검토하였다. 그림 5는 지락사고가 난 C변전소 접지저항에 따른 변전소 접지극 전위상승 및 접지전류 계산결과를 보인 것이다. 접지저항 R_g (또는 대지극로 임피던스)가 커질수록 대지로 누설되는 접지전

류(I_g)는 작아지고 접지극의 전위상승(Ground Potential Rise) = $V_g = I_g \times R_g$ 값은 커짐을 볼 수 있다.

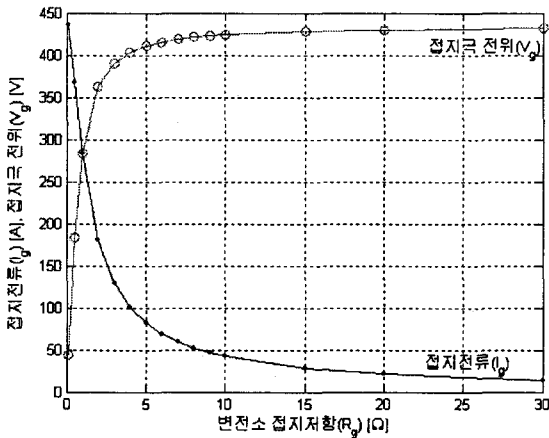
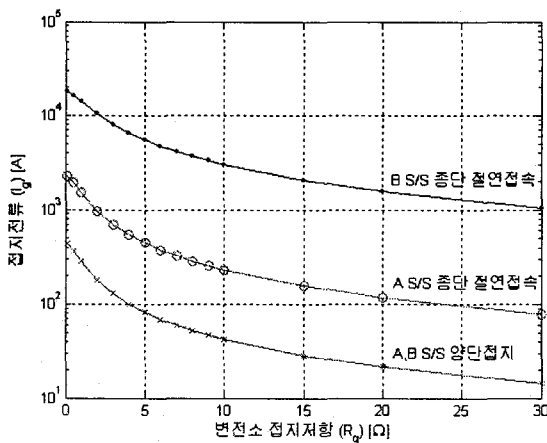


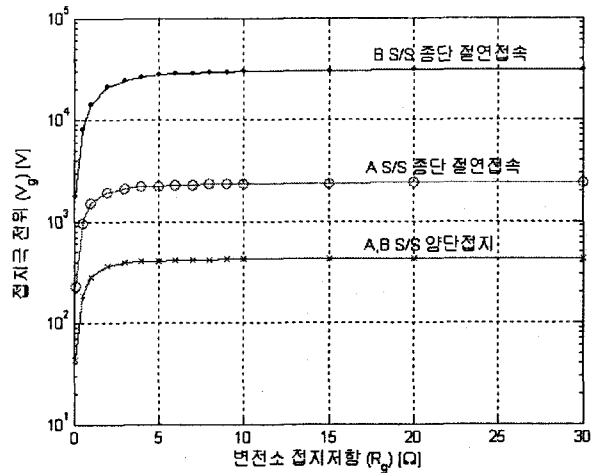
그림 5. 접지저항에 따른 접지전류와 접지극 전위상승
Fig. 5. Ground Resistance Vs. Ground Current and Ground Potential Rise

그림 5의 계산결과로부터 접지저항이 커진다고 하여서 접지극의 전위가 비례하여 커지는 것은 아님을 알 수 있다. 본 논문의 사례에서는 접지저항이 약 10 Ω을 초과하면서부터 접지극의 전위상승 억제 측면에서 접지저항 저감에 의한 접지극 전위상승(GPR)의 저감효과는 포화된다.

케이블 슈스는 지중선로 종단에서 변전소 접지망과 연결함으로써 선로 양단에서 접지되는 것이 일반적이거나, 접속함 간격의 불균일 등의 이유로 상시 슈스전류가 커서 송전용량에 제약을 받는 경우에는 선로 한쪽의 종단을 변전소 접지망과 분리하고 절연접속된 케이블 슈스들 사이에 피뢰기를 설치하여 운전하는 경우가 있다. 이 경우에는 선로나 변전소 지락사고시 고장전류의 귀환경로가 끊어져서 접지전위 억제 측면에서 불리해지게 된다. 이처럼 지중선로에서 양단접지 대신 편단접지 채용에 따른 접지극 전위상승의 정도를 검토하기 위하여 A, B 변전소 종단접속부를 각각 절연 접속한 경우 C 변전소의 접지극 전위상승을 계산하고 그 결과를 양단접지와 상호 비교하였다 (그림 6 참조).



(a) 접지전류 (Ground Current)



(b) 접지극 전위상승(Ground Potential Rise)

그림 6. A-B S/S간 선로의 편단/양단접속에 따른 C변전소 접지극 전위

Fig. 6. Ground Potential Rise at C S/S in accordance with Terminal Grounding at A and B S/S

그림 6에서 보면 예상했던 대로 접지극 전위상승(GPR)이 크게 상승하며, C변전소와 가까운 B변전소 종단부를 절연접속하는 경우가 GPR 증가가 훨씬 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

3. 변전소 인근에서의 전위간섭 평가

통신설비의 보호에 관한 ITU (International Telecommunication Union) 지침에 따르면 전력선 고장시 위험방지를 위한 대지전위 제한치는 430~650 V이다[8]. 변전소는 고장이 거의 없고 또 고장이 발생되더라도 고장지속시간이 수 싸이클에 불과하므로 상기 ITU 지침에서 정의한 고신뢰도 전력설비로 분류되며, 따라서 변전소 지락시 인근 설비의 대지전위 제한치로 650 V가 적용되고 있다[9].

그림 7은 변전소 지락사고시 인근 설비의 전위상승을 계산하기 위한 모델을 보인 것이다. 변전소 접지극을 등가화한 반구전극 전위(V_0)를 1.0 이라고 했을 때, 반구전극 경계면으로부터 x만큼 떨어진 지점의 전위 $V(x)$ 는 식 1에 의해 구해질 수 있다.

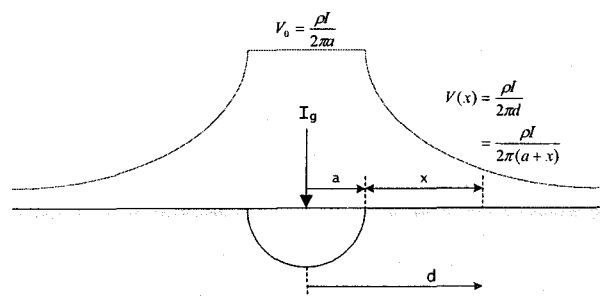


그림 7. 대지전위 계산을 위한 반구전극 모델
Fig. 7. Hemispheric Electrode Model for Earth Surface Potential Calculation

$$\frac{V(x)}{V_0} = \frac{\frac{\rho I_g}{2\pi(a+x)}}{\frac{\rho I_g}{2\pi a}} = \frac{a}{a+x} \quad (1)$$

반구전극의 표면적이 변전소 건물구조체(그림 8b)의 표면적과 같다고 상정하면, 식 2와 3에 의해 반구전극의 등가반지름은 36.7 m로 산정할 수 있다.

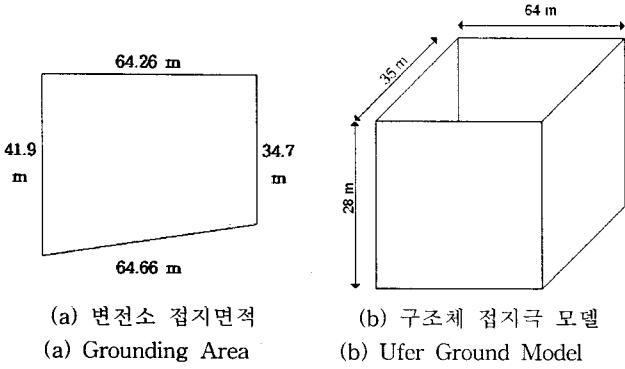


그림 8. 변전소 접지극 모델

Fig. 8. Equivalent Ground Electrode of the Substation Building

$$S = 2 \times 64 \times 28 + 2 \times 35 \times 38 + 64 \times 35 = 8484 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$a = \sqrt{\frac{S}{2\pi}} = \sqrt{\frac{8484}{2\pi}} = 36.7 \text{ m} \quad (3)$$

변전소 경계로부터 이격거리(x)에 따른 전위상승 계산결과를 그림 9에 보였으며, 약 100 m 떨어진 지점에서 $V(x)/V_0$ 는 약 0.26 으로 계산된다.

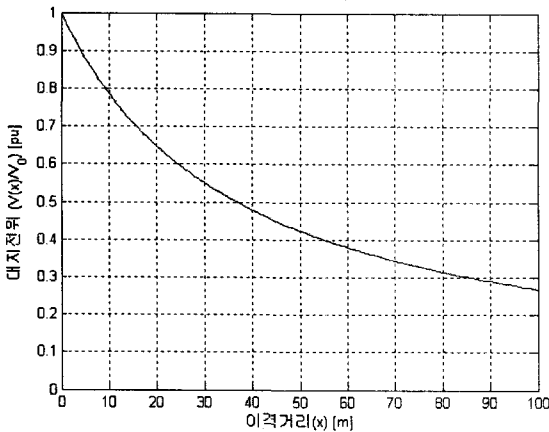


그림 9. 이격거리별 대지전위 분포
Fig. 9. Lateral Distance Vs. Earth Surface Potential Rise

C변전소의 접지극 전위상승(GPR)인 V_0 는 그림 5 (접지 저항에 따른 접지극 전위상승 계산곡선)에 C변전소 접지저항 실측치인 0.7 Ω 를 적용함으로써 구할 수 있으며, 여기에 0.26을 곱하면 변전소로부터 100 m 떨어진 지점의 전위 ($V(x=100)$)는 약 73 V로 계산된다. 보수적인 조건을 상정하기 위하여 그림 5의 GPR 수렴치인 450 V를 대입하더라도 $V(x)$ 는 120 V를 넘지 않는다.

IEEE의 접지측정 지침 중 하나인 Std 81.2의 기술에 따르면 배전선로 중선선의 병렬연결에 의해 전체 변전소 접지계통의 접지저항은 변전소 접지망 단독으로 있을 때의 10분의 1로 떨어지는 것이 보통(typical)이다[10]. 본 논문의 SPLITS 모델은 이러한 배전선로 중선선의 병렬연결에 의한 저감효과를 무시한 보수적인 모델인 점을 감안하면, C변전소 지락사고시 100 m 이격지점의 전위상승값은 정동부 제한치인 650 V를 충분히 만족한다고 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 도심지 부지 난으로 인해 변전소가 통신설비 등 중요 기간시설물 인근에 건설되는 경우에 변전소 지락사고시에 토양을 통한 전위간섭이 변전소 인근설비에 미치는 영향을 검토한 사례를 제시하였다. 이를 위하여 SPLITS 프로그램을 이용하여 지중 4회선 선로를 갖는 해석모델을 구성하고 지락점(C변전소)의 접지저항 및 선로 양단의 접지상태에 따른 전위간섭을 계산한 결과, 접지저항이 어떤 값을 초과하게 되면 접지극의 전위상승이 포화점에 도달하게 된다. 또한 접지극 전위상승치를 제한하기 위해 지중선로는 반드시 양단접지되어야 함을 보였다.

지중선로는 상도체(전력케이블 심선)와 중선선 역할을 하는 케이블 쉬스들간의 강한 유도결합(또는 차폐효과)에 의하여 가공선로에 비해 접지전류가 상당히 작아지는 것으로 알려져 있는데[5,6,7] 본 논문의 컴퓨터 시뮬레이션 결과 이같은 사실을 재확인할 수 있었으며 본 논문의 검토대상인 구체적 사례에서 변전소로부터 100 m 인근지점에 위치한 통신설비의 전위간섭은 ITU 및 정보통신부 기준을 충분히 만족함을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 SPLITS 해석모델은 유사 조건의 변전소 인근 전위간섭 해석시에 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] S.T.Sobral, J.B.Barbosa, V.S.Costa, "Ground potential rise characteristics of urban step-down substations fed by power cables-a practical example", IEEE Trans. on PD, vol.3, no.4, Oct. 1988
- [2] J.T.Villas, D.Mukhedkar, V.R.Fernandes, "Ground grid design of a transition station system-a typical example of fault transfer", IEEE Trans. on PD, vol.5,pp.124-129, Jan. 1990
- [3] J.M.Nahman, V.B.Djordjevic, D.D.Salamon, effects of HV and MV under- ground cables associated with urban distribution substations", IEEE Trans. on PD, vol.17, , pp.111-116, Jan. 2002
- [4] S.Sebo, "Zero sequence current distribution along transmission lines", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-88, No.6, Jun. 1969, pp.910-919
- [5] J.M.Nahman, "Proximity effects on the ground fault current distribution within the earthing system formed by a substation and the associated transmission lines", IEE Proc.-Generation,

Transmission and Distribution, Vol.135, No.6, 1988, pp.497-502

- [6] L.M.Popovic, "Practical method for evaluating ground fault current distribution in station supplied by an unhomogeneous line", IEEE Trans. on PD, Vol.12, Apr. 1997, pp.722-727
- [7] EPRI EL-2699, Transmission Line Grounding, Vol.1, 1982
- [8] ITU-T Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines, Volume VI - Danger and disturbance, 1989
- [9] 정통부 고시 제2001-99호, 전력유도의 구체적 산출 방법에 관한 기술기준, 2001
- [10] IEEE guide for measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems, IEEE Std 81.9-1991, pp. 38
- [11] IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault, IEEE Std. 367-1997
- [12] ITU-T Recommendation K.8, Separation in the soil between telecommunication cables and earthing system of power facilities, 1988
- [13] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol.6, No.2, April 1993, pp. 19-24.
- [14] SPLITS Users' Manual, Safe Engineering Services & technologies ltd., 2000
- [15] TRALIN Users' Manual, Safe Engineering Services & technologies ltd., 2000
- [16] 한전 전력연구원, "전력설비 지락사고시 도체-대지간 고장전류 분포", 한국부식학회 전기방식위원회 특별심포지움, 2001



이 동 일 (李 東 一)

1958년 3월 15일 생. 1979년 단국대 전기공학과 졸업. 1983년 인하대 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한양대 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 책임연구원

E-mail : leedi@kepco.co.kr

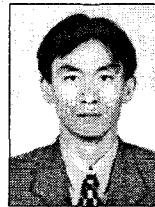


김 재 준 (金 在 俊)

1960년 9월 5일 생. 1987년 서울대부설 방송대 행정학과 졸업. 1979년 한국전력공사 입사. 2005년 ~ 현재 한국전력공사 송변전건설처 건설기술팀 과장

Tel : 02-3456-5112

E-mail : kjj@kepco.co.kr



유 연 표 (柳 然 杓)

1959년 1월 4일 생. 1986년 광운대 전기공학과 졸업. 1987년 한국전력공사 입사. 2005년 ~ 현재 한국전력공사 전자통신처 전력유도팀 과장

Tel : 02-3456-5341

E-mail : youyp@kepco.co.kr



정 창 수 (鄭 昌 守)

1958년 2월 25일 생. 1982년 조선대 전기공학과 졸업. 1994년 조선대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 조선대대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전자통신처 전력유도팀장

Tel : 02-3456-5340

E-mail : jung1164@kepco.co.kr



김 경 철 (金 慶 哲)

1954년 1월 20일 생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1984년 New Mexico State University 전기공학과 졸업(석사). 1988년 University of Texas at Arlington 전기공학과 졸업(박사)

현재 홍익대학교 전기공학과 교수

Tel : 041-860-2568

E-mail : yangjier@wow.hongik.ac.kr

저 자 소 개



최 중 기 (崔 鍾 基)

1969년 2월 1일 생. 1992년 동국대 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대 전기제어공학과 졸업(석사). 1995년 ~ 현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원

E-mail : jkchoi@kepco.co.kr