

배전용 변압기를 통하여 저압 전원선으로 전파되는 뇌서지

(Lightning Surges Transferred to Low-voltage AC Power Lines through Distribution Transformers)

이복희* · 이동문 · 이수봉

(Bok - Hee Lee · Dong - Moon Lee · Su - Bong Lee)

요 약

정밀하고 소형화된 전자기기 사용의 증가로 인한 전원공급의 질적 향상에 대한 필요성이 강하게 증가하고 있다. 저압전원 배전계통에서의 과도 과전압은 직격 또는 유도뢰에 의해 유도되어지고, 가정, 사무실, 공장 등의 자동화시스템이나 병원설비와 같은 중요한 시스템의 손상이나 고장의 원인이 되고 있다. 본 논문에서는 임펄스 발생기를 이용하여 배전용 변압기를 거쳐 저압 전원시스템으로 이행되는 뇌과전압의 양상에 대하여 실험적으로 조사하였다. 배전용 변압기의 1차측에 설치한 피뢰기와 수용가측 추가접지는 저압 전원시스템으로 이행되는 뇌서지전압의 제한에는 크게 기여하지 않았다.

Abstract

A strong need to improve the quality of electric power is increased because of increasing use of the sensitive and small-sized electronic devices. The transient overvoltages on low-voltage AC power distribution systems are induced by direct or indirect lightning return strokes, and they can cause damage and/or malfunction of the utility systems for home automation, office automation and factory automation as well as medical equipment. The behaviors of lightning overvoltages transferred through the transformer to the low voltage AC power distribution systems were experimentally investigated using a Marx generator. The surge voltages in low-voltage ac power systems are rarely limited by the application of the surge arrester to the primary side of distribution transformer and a custom service ground.

Key Words : Lightning overvoltage, Surge protective devices, Low-voltage ac power system, Custom service ground

1. 서 론

전원공급의 질적 향상의 중요성 증가로 인하여 일

반 수용가를 비롯하여 병원, 컴퓨터실과 같은 특정 부하에 전기를 공급하는 저압 전원선의 뇌과전압 조사가 특별히 관심을 끌고 있다. 과도 이상전압의 많은 조사는 다양한 환경에서 수행되었다. 특히 통신선과 컴퓨터의 전원선에 대한 과도이상전압은 상당히 심도 있게 연구되었다. 그럼에도 불구하고 저압 전원선에서의 과도 이상전압은 잘 알려지지 않았다.

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2003년 3월 20일

1차심사 : 2003년 3월 27일, 2차심사 : 2003년 5월 6일

심사완료 : 2003년 5월 22일

통신/신호선을 통하여 전자기기에 침입하는 뇌서지는 광섬유케이블의 적용으로 어느 정도 방지될 수 있지만 전원선으로 침입하는 뇌서지에 대한 위협은 아직도 여전히 남아있다. 더욱 더 깊게 연구되어야 할 과제 중의 하나는 배전용 변압기를 거쳐 저압 전원선으로 이행되는 뇌과전압이다. 직격뢰 또는 유도뢰에 의한 뇌과전압은 배전용 변압기 1차측 고압 배전선에 유도되고 배전용 변압기 2차측 저압 전원선으로 이행된다. 저압 전원선에서의 뇌과전압의 종류로는 고압 배전선으로부터 변압기를 거쳐 이행되는 뇌서지, 저압 전원선에서의 직격뢰에 의한 과전압, 저압 전원선에서 유도되는 과전압, 뇌보호설비의 섬락에 의한 과전압이 있다. 이러한 저압 전원선에서 뇌과전압의 특성을 정확하게 분석하는 것은 마이크로일렉트로닉스 소자와 시스템의 효과적인 뇌서지 보호를 위해 매우 중요하다[1]~[5].

이 논문은 전원선을 통하여 침입하는 뇌서지에 대한 효과적인 보호 대책을 마련하기 위하여 배전용 변압기의 1차측으로부터 2차측으로 이행되는 뇌서지의 특성 분석에 기초를 두었다. 임펄스발생장치를 이용하여 배전용 변압기 1차측으로 1.2/40[μ s]의 뇌임펄스전압을 인가하였을 때 배전용 변압기 1차측 피뢰기의 설치유무에 따라 2차측으로 이행되는 뇌서지전압의 특성과 배전용 변압기 2차측 수용가에 추가로 접지를 시설하였을 경우 나타나는 이행전압의 양상을 조사하였다. 또한 이론적 시뮬레이션을 통하여 배전용 변압기의 내부 파라미터를 분석하고 저압측으로 이행되는 뇌서지전압의 특성을 조사하였다.

2. 뇌서지의 침입경로

일반 가정에서 사용하고 있는 가전기에 입사하는 뇌서지의 침입경로에 대한 대표적인 예를 그림 1에 나타내었다. 각 가전기는 AC 전원에 접속되어 있으며, 기기에 따라 접지, 안테나, 통신선에 접속되어 있다. 이와 같은 가정용 전자기기에 대해 뇌서지가 다양한 경로로 침입하고 다양한 경로로 방류된다. 일반적으로 주택에 침입하는 뇌서지는 크게 직격뢰와 유도뢰로 분류할 수 있다. 직격뢰는 주로 TV 안테나에 낙뢰가 떨어지는 경우를 생각할 수 있다. 주

택에 낙뢰가 침입하였을 때 뇌전류 일부가 배전선에 역류하고 배전선에 뇌과전압이 발생해 피해가 생기는데 이것을 역류뢰라고 한다. 또한 주택 근처에 낙뢰가 발생하면 낙뢰지점의 대지전위가 상승하여 배전선과 통신선의 접지를 통해 뇌서지가 주택에 침입하는 경우도 있다.

이에 비해 유도되는 전원선과 통신선 근처의 수목이나 건축물에 낙뢰가 입사한 경우로 뇌방전로를 흐르는 전류(뇌격전류)에 의한 선로근처 전자계의 급격한 변화로 발생하는 과전압이다. TV와 라디오 방송을 예로 들면 뇌방전로는 전파를 송출하는 송신안테나, 배전선로는 수신안테나로 생각할 수 있다[6]~[8].

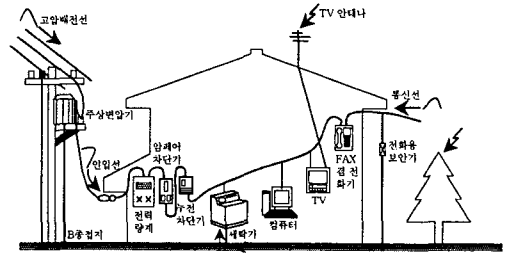


그림 1. 뇌서지의 침입경로
Fig. 1. Invading path of lightning surges

3. 실험

병렬충전식 8단 Marx형 임펄스전압발생장치를 이용하여 실험전압을 공급하였으며, 임펄스전압발생장치의 등가회로를 그림 2에 나타내었다. 뇌임펄스전압의 파두시간(Tf) 및 파미시간(Tt)의 크기는 약 1.2/40[μ s]이다[9].

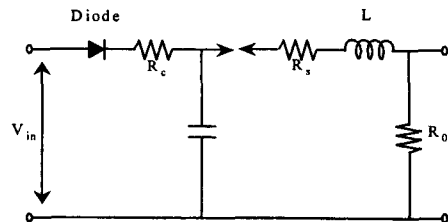


그림 2. 임펄스전압발생장치의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the Marx impulse generator

배전용 변압기를 통하여 저압 전원선으로 전파되는 뇌서지

용량성 전계센서를 이용하여 인가전압을 측정하였고, 이 센서는 수 ns의 상승시간과 200[MHz]의 주파수 대역을 가지므로 정확한 실험전압의 측정이 가능하였으며, 뇌임펄스전압 파형을 그림 3에 나타내었다.

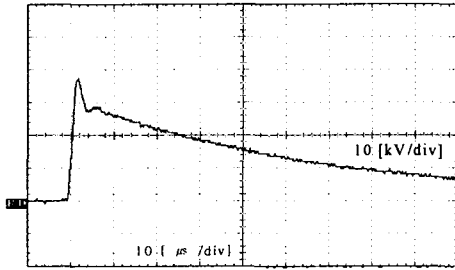


그림 3 임펄스전압 파형
Fig. 3 Impulse voltage waveform

4. 결과 및 고찰

4.1 배전용 변압기를 거쳐 저압 전원선으로의 뇌서지전압의 전파

본 실험에서는 배전선의 고압측(1차측)에 낙뢰가 입사한 경우 배전용 변압기의 저압측(2차측)으로 이행되는 뇌서지전압의 양상 및 특성을 조사하였다. 특히, 배전용 변압기의 1차측에 피뢰기와 수용가측 추가접지의 설치 유무에 따라 2차측으로 이행되는 뇌서지의 양상에 대하여 실험하였다.

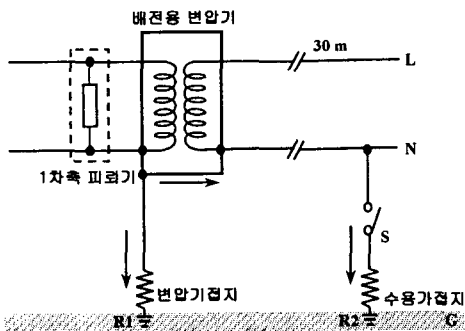
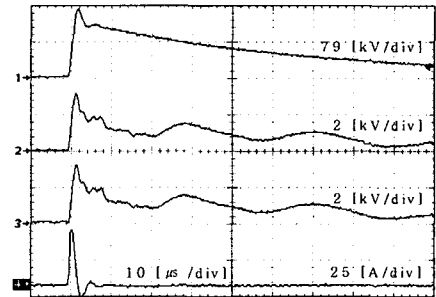
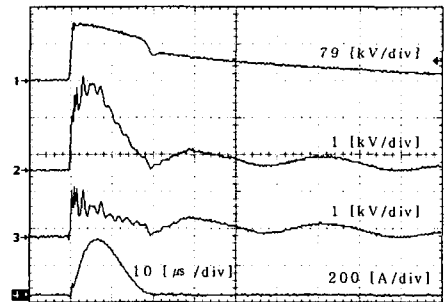


그림 4. 배전용 변압기 2차측으로 침투하는 뇌서지전압의 이행특성을 평가하기 위한 실험회로
Fig. 4. Experimental circuit for evaluating the transfer characteristic of lightning surge entering into the secondary side of distribution transformer

배전용 변압기 1차측에 입사하는 뇌서지를 모의한 임펄스전압을 전압선과 접지사이에 인가하였고 2차측으로 이행되는 전압은 전압선과 중성선(차동모드), 전압선과 접지(공통모드)사이에서 측정하였다. 그리고 배전용 변압기의 접지저항은 5[Ω]이고 수용가 접지저항은 1[Ω]으로 설정하였다. 실험에서는 1.8[kV] 2.5[kA] 배전용 산화아연 캡리드 피뢰기와 22.9[kV] 10[kVA] 배전용 변압기를 사용하였다. 저압전원 인입선의 길이는 30[m]로 실험을 수행하였고, 스위치 S를 닫아 수용가 추가접지를 시설한 경우를 모의하였다. 이와 같은 실험을 위한 회로도를 그림 4에 나타내었다.



(a) 피뢰기 미설치시



(b) 피뢰기 설치시

1 : 인가전압 2 : 공통모드전압
3 : 차동모드전압 4 : 접지전류

그림 5. 배전용 변압기 1차측에 피뢰기의 설치 유무에 따른 뇌서지전압과 전류 파형

Fig. 5. Waveforms of lightning surge voltage and current according as the surge arresters at the primary side of distribution transformers were present or not

배전용 변압기 1차측 피뢰기의 설치 유무에 따라

2차측으로 이행되는 뇌서지전압의 양상을 나타내는 인가전압, 2차측 이행전압(공통모드, 차동모드), 접지전류 등에 대한 실측 파형을 그림 5에 나타내었다. 피뢰기를 설치하면 인가전압이 피뢰기의 동작개시 전압 이상이 되면 피뢰기의 동작으로 피뢰기의 제한 전압으로 되기 때문에 인가전압을 변수로 할 수가 없어 배전용 변압기 1차측에 피뢰기를 설치하지 않았을 경우는 인가전압을 변수로, 그리고 피뢰기가 설치된 경우에는 변압기 접지저항에 흐르는 전류를 변수로 하여 2차측에 이행되는 전압의 양상을 조사하였다.

배전용 피뢰기를 변압기 1차측에 설치하지 않고 뇌임펄스전압이 인가되었을 때 2차측 이행전압의 크기를 그림 6에 나타내었다. 배전용 변압기 1차측에 피뢰기가 설치되지 않았을 경우 배전용 변압기 1차측의 인가전압이 증가함에 따라 2차측 이행전압은 차동모드와 공통모드전압 모두 증가하는 경향을 나타내었으며, 공통모드와 차동모드로 이행되는 뇌서지전압의 크기는 거의 비슷하게 나타났다.

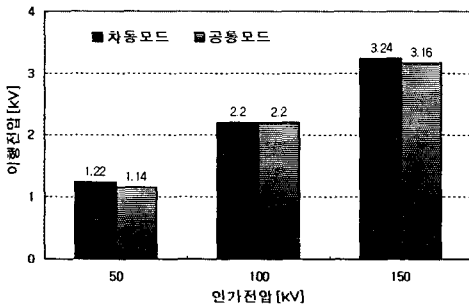


그림 6. 피뢰기가 설치되지 않았을 경우 배전용 변압기 2차측으로 이행되는 뇌서지전압의 특성
 Fig. 6. Characteristic of lightning surge voltage transferred to the secondary side of the distribution transformer without a surge arrester

배전용 변압기 1차측에 낙뢰가 입사하였을 때 피뢰기가 설치되었을 경우 그림 7에 나타낸 바와 같이 2차측으로 이행되는 뇌서지의 차동모드전압은 피뢰기가 설치되지 않았을 경우보다 낮게 나타났다. 그리고 공통모드로 이행되는 뇌서지전압은 차동모드로 이행되는 뇌서지전압에 비해 다소 높게 선형적으로

증가하는 경향으로 나타났다. 배전용 변압기 1차측에서 2차측으로 이행되는 차동모드전압은 피뢰기를 설치함으로써 인가전압의 크기에 따라 다르며 인가전압이 50[kV]인 경우 약 25%, 100[kV]인 경우 약 45%, 150[kV]인 경우 약 65% 저감되었다. 그러나 대부분의 뇌서지 피해가 공통모드전압에 의해 발생하기 때문에 피뢰기를 설치하더라도 피뢰기에 흐르는 접지전류에 의한 전위상승분이 차동모드전압에 포함되어 공통모드전압으로 나타나기 때문에 1차측 배전용 피뢰기의 설치가 저압측으로 이행되는 공통모드전압의 저감에는 별 효과가 없는 것으로 나타났다.

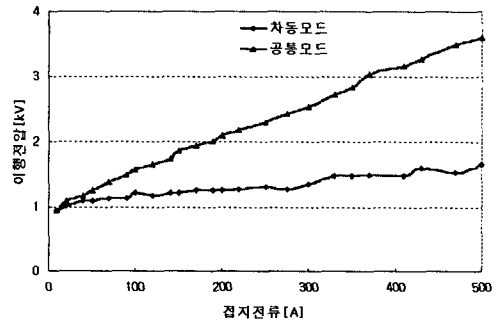


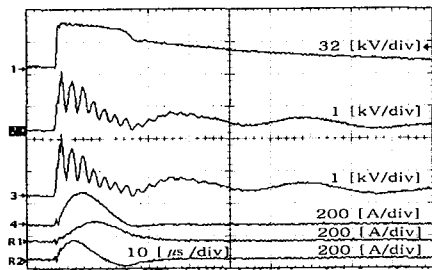
그림 7. 배전용 변압기에 피뢰기가 설치된 경우 2차측으로 이행되는 뇌서지전압의 특성
 Fig. 7. Characteristics of lightning surge voltage transferred to the secondary side of the distribution transformer with a surge arrester

전기설비기술기준 제 25조에는 저압 수용가 설비의 안전을 위해서 수용가의 인입구에 접지저항이 3 [Ω]이하인 구조체에 추가접지를 할 수 있도록 규정되어 있다. 수용가에 추가로 접지를 시설했을 경우 인가전압, 배전용 변압기 2차측으로 이행되는 공통모드전압과 차동모드전압, 전체전류 및 각 접지측에 흐르는 전류 파형의 예를 그림 8에 나타내었다.

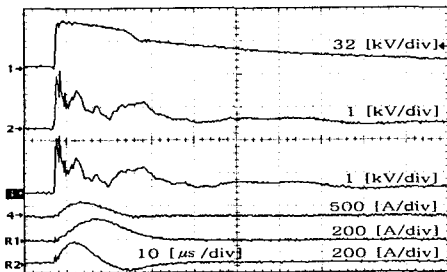
추가접지의 시설 여부에 따라 수용가측으로 이행되는 뇌서지전압의 특성은 다음과 같다. 배전용 변압기 2차측 수용가에 추가로 접지를 시설한 경우 합성 접지저항이 낮아지므로 공통모드로 이행되는 전압은 추가접지를 하지 않았을 경우보다 다소 낮게 나타났다. 또한 1차측으로부터 전파되는 뇌서지전압의 전파경로의 전기저항이 낮아져 진동의 감쇠가 적

배전용 변압기를 통하여 꺼입 전원으로 전파되는 뇌서지

으므로 공통모드전압과 차동모드전압의 파형은 추가접지를 하지 않은 경우보다 진동성분이 많이 포함되어 있으며 파미부의 감쇠도 적게 나타났다. 또한 변압기 접지도선에 흐르는 전류는 진동의 자태를 보이는 반면에 추가접지도선에 흐르는 전류 파형은 인입선(30 m)의 인덕턴스의 영향으로 완만하게 변동하는 양상을 보이고 있다. 변압기의 용량에 따라 변압기 자체의 회로정수가 다르므로 전압과 전류 파형만 약간 다를 뿐 전반적인 특성은 거의 비슷하게 나타났다.



(a) 10kVA 배전용 변압기



(b) 20kVA 배전용 변압기

- 1 : 인가전압 2 : 공통모드전압
- 3 : 차동모드전압 4 : 접지전류
- R1 : 추가접지전류 R2 : 배전용 변압기 접지전류

그림 8. 수용가 추가접지에 따른 이행서지전압 파형
Fig. 8. Waveforms of the transfer surge voltage associated with a custom service ground

4.2 뇌서지 전파에 대한 배전용 변압기의 파라미터

배전용 변압기 저압측(2차측)으로 이행되는 뇌서지 전압의 특성과 이에 대한 배전용 변압기의 내부

파라미터에 대한 정보를 얻기 위하여 이론적인 시뮬레이션을 수행하였다. 10[kVA] 변압기의 1차측에 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우 저압측으로 이행되는 전압의 특성을 Pspice 프로그램으로 분석하였다. 그림 9는 시뮬레이션을 위하여 프로그램 상에서 적용한 등가회로이다. a-b단자 좌측은 인가전압인 임펄스발생기의 등가회로이고, a-b단자 우측은 뇌서지 전파에 대한 변압기 권선의 회로정수이다. 이론적 시뮬레이션을 통하여 얻어진 인가전압과 배전용 변압기 저압측으로 이행되는 전압 파형을 나타내었다.

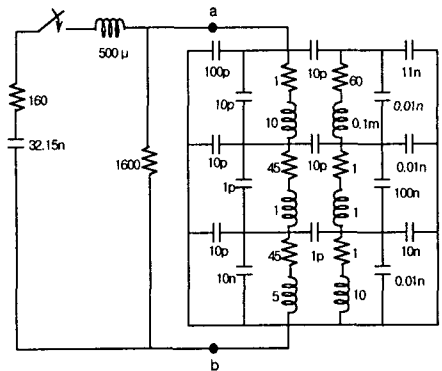
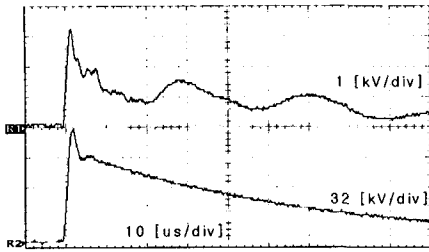


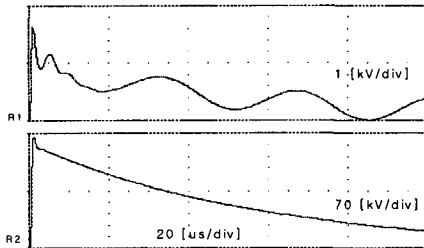
그림 9. 시뮬레이션을 위한 등가회로
Fig. 9. The equivalent circuit for simulation

배전용 변압기의 저압측으로 이행되는 전압의 실제 파형과 시뮬레이션 결과 파형을 그림 10에 나타내었으며, 이들 결과는 거의 흡사하였다.

배전용 변압기를 통해 저압측으로 전파되는 뇌서지 전압의 특성을 나타내는 주요 회로정수는, 1차 권선 사이의 표류정전용량, 각 권선과 접지 사이의 표류정전용량, 상호인덕턴스 그리고 1차, 2차권선의 저항이다[10]~[12]. 배전용 변압기 저압측으로 이행되는 전압의 크기는 주로 1차 권선과 2차 권선 사이의 표류정전용량에 의해 결정되었다. 또한 뇌임펄스 전압의 피크치 이후의 감쇠와 진동성분은 2차 권선의 저항, 2차 권선과 접지 사이의 표류정전용량에 의해 결정되었다. 저압측으로 이행된 뇌서지전압 파형의 파미부 진동성분의 진폭은 1차 권선의 저항에 의해 주로 결정되어지고 진동주파수는 1차 권선의 인덕턴스와 1차 권선과 접지사이의 표류정전용량에 의해 형성되었다.



(a) 실험에 의한 파형



(b) 시뮬레이션에 의한 파형

그림 10. 실험과 시뮬레이션을 통해 얻어진 이행전압 파형
Fig. 10. Waveforms of the transfer voltage obtained by experiment and simulation

5. 결 론

배전선에 직격되 또는 유도되에 의해서 입사한 뇌서지가 배전용 변압기를 경유하여 저압측으로 이행되는 양상과 특성에 대하여 실험적으로 검토하였다. 배전용 변압기의 내부 파라미터를 기초로 뇌서지의 전파메카니즘을 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

배전용 변압기의 1차측에 설치한 피뢰기와 수용가측 추가접지는 저압측으로 이행되는 뇌서지전압의 저감에는 거의 효과가 없는 것으로 나타났다. 또한 배전용 변압기를 통하여 저압측으로 이행된 뇌임펄스전압의 실측 파형과 시뮬레이션을 통하여 얻어진 결과는 거의 유사하였다. 배전용 변압기를 통한 뇌서지전압의 전파특성은 표류정전용량의 영향이 지배적이다.

References

[1] Alexander Piantini, Caius V. S. Malagodi, "Voltage surges transferred to the secondary of distribution transformers", High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEE, 1999.
[2] B. Richter, "Surge protective Devices for Low-Voltage

Power Distribution Systems,-The New IEC-Standard and First Experience with It", Proc. 23rd ICPL, Paper No.7C-1, pp.764~767, 1998.
[3] R. C. Dugan and S. D. Smith, "Low-Voltage-Side Current-Surge Phenomena in Single-Phase Distribution Transformer Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, pp.637~647, 1988.
[4] G. L. Goedde, R. C. Dugan and L. D. Rowe, "Full Scale Lightning Surge Tests of Distribution Transformers and Secondary Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp.1592~1598, 1992.
[5] Task Force Report, "Secondary(low-side) surge in distribution transformers", IEEE Trans., Vol. 7, No 2, April 1992.
[6] IEC 61643-12, "Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems- Part 12 : Selection and application principles", First edition, 2002-02, pp.113~117.
[7] IEC 61643-1, "Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-Part 1 : Performance requirements and testing methods", First edition, 1998-02, pp.3~37.
[8] IEC 60364-3, "Electrical installation of buildings-Part 3: Assessment of general characteristics", Second edition, 1993-03, pp.11~15.
[9] T. Kawamura and B. H. Lee, "Transient Impulse Breakdown of SF6 Gas in Inhomogeneous Electric Fields", Jpn. J. Phys. Vol.30, Pt. 1, No.8, pp.4898~4904, 1999.
[10] M. B. Marz, S. R. Mendis, "Protecting load devices from the effects of low-side surges". IEEE Trans., Vol. 29, No. 6, November/December 1993.
[11] R. B. Standler, "Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", John Wiley & Sons, Inc., First edition, New York, pp.3~33, 1989.
[12] C. K. Roy, J. R. Biswas, "Studies on impulse behaviour of a transformer winding with simulated faults by analogue modeling". IEEE Trans., Vol. 141, No. 5, September 1994.

◇ 저자소개 ◇

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기 컴퓨터공학부 교수. Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822, e-mail : bhlee@inha.ac.kr

이동문 (李東汶)

1958년 4월 20일생. 1987년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822, e-mail : lidm7@hanmail.net.

이수봉 (李守봉)

1979년 4월 13일생. 2002년 2월 경남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정. Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822, e-mail : g2021074@inhavision.inha.ac.kr.