

누설전류측정에 의한 피뢰기 열화진단에 있어 전원고조파의 영향

論 文

52C-1-7

Influence of Harmonics in Power System Voltage on Arrester Deterioration Diagnostics by Leakage Current Measurement

吉 曠 碩* · 韓 柱 燮** · 朱 玠 魯***

(Gyung-Suk Kil · Ju-Seop Han · Mun-No Ju)

Abstract - Arresters are deteriorated by overvoltages or impulse currents, and the resistive leakage current of arresters increases as the deterioration of the arrester progresses, showing an increase in the 3rd harmonic component of the leakage current. In this reason, arrester diagnostic techniques based on the 3rd harmonic leakage current as a reference parameter of deterioration are widely used. The technique, however, includes an error due to the harmonics of power system voltage. Therefore, the influence of the harmonics on arrester diagnostics should be considered.

In this paper, we designed a PSpice ZnO arrester model to simulate the influence of the voltage harmonics described above. A pure sinusoidal voltage and its the 3rd harmonic voltage were applied to the model, and the leakage current components were analyzed.

From the simulation results, it is confirmed that the peak value of resistive leakage current depends not only on the phase of the 3rd harmonic voltage but also on the magnitude of it. Consequently, the errors caused by the harmonic voltage could be minimized by correcting the magnitude of leakage current upon analyzing the harmonics.

Key Words : arrester, leakage current, deterioration, harmonics, diagnostic techniques, ZnO arrester model, power system voltage

1. 서 론

전력계통에서 내·외부 과전압에 의해 선로 및 중전기기의 절연이 위협받고 있으며, 이에 대해 경제적, 기술적으로 가장 효과적인 대책은 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연(ZnO)형 피뢰기를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하는 것이다. 그러나 피뢰기도 제조사의 결함이나 설치 환경에 따른 흡습, 이상전압에 대해 반복되는 보호동작으로 열화가 진전된다. 열화된 피뢰기가 전력계통에 그대로 설치되어 있으면 정상운전전압에서 누설전류에 의해 피뢰기 소자가 과열되거나, 열폭주에 도달하여 피뢰기의 단락으로 인한 지락사고로 진전하여 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킨다. 따라서 피뢰기의 열화정도를 상시 관측하여 열화된 피뢰기를 사전에 계통으로부터 제거함으로써, 피뢰기에 의한 사고를 예방하여 중전기기의 성능을 유지하고 동작 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

현재까지 연구 또는 상용화된 피뢰기 열화진단기술에는 피뢰기의 제한전압, 공칭방전전류, 손실전력, 누설전류, 정전용량 등을 측정하는 것이 있다. 그 중에서도 피뢰기의 전누

설전류나 제 3조파 누설전류성분을 진단 파라미터로 사용하는 방법은 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기를 온라인 상태에서 열화진단이 가능하므로 가장 널리 이용되고 있다^{[1]~[3]}. 그러나 누설전류를 기준으로 열화를 진단하는 방법은 전누설전류의 최대값이나 실효값, 또는 전누설전류의 제 3조파 성분의 최대값을 측정하여 분석하기 때문에 전원선에 포함된 고조파의 크기와 위상에 따라 피뢰기의 열화와는 무관하게 누설전류의 크기가 변하게 된다. 따라서 본 논문에서는 전누설전류 또는 전누설전류의 제 3조파 누설전류를 피뢰기의 열화지표로 이용하는 진단기술에 있어 전원선에 포함된 제 3조파 성분의 크기와 위상에 따른 누설전류성분의 영향을 분석·고찰하였다.

2. 누설전류에 의한 피뢰기 열화진단기술

그림 1에 산화아연형 갭리스 피뢰기의 전기적 등가회로를 나타내었다^[4]. I_c 와 I_r 는 각각 용량분 누설전류와 전누설전류를 나타내며, I_r 은 ZnO 소자의 입계층간에 형성된 쇼트키(Schottky) 장벽의 변화에 의한 저항분 누설전류로 그 값이 변화하는 것을 나타낸다.

피뢰기에 정현파 교류전압이 인가되면 그림 2와 같이 인가전압에 $\pi/2$ 앞선 큰 용량분 누설전류와 동상의 미소 저항분 누설전류가 흐르게 된다. 피뢰기는 상용주파수 교류과전압이나 뇌충격전류에 의하여 열화가 진전되며, 이 때 용량분

* 正 會 員 : 韓國海洋大 工大 電氣電子工學部 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 韓國海洋大 工大 電氣工學科 博士課程修了

*** 正 會 員 : 韓國海洋大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2002年 10月 2日

最終完了 : 2002年 11月 18日

누설전류는 열화진전에도 거의 변화가 없다. 그러나 저항분 누설전류는 피뢰기의 열화진전에 따라 지속적인 증가를 나타낸다. 이 저항분 누설전류의 변화가 전누설전류 중에서 제 3조파 누설전류의 크기를 증가시키게 된다. 결국 저항분 누설전류의 크기가 열화진전의 척도가 되는 것이며, 저항분 누설전류는 그림 1의 등가회로에 나타낸 것과 같이 직접 측정이 불가능하다.

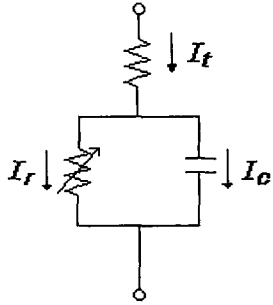


그림 1 ZnO 피뢰기의 전기적 등가회로
Fig. 1 Electrical equivalent circuit of ZnO Arresters

피뢰기의 열화진단을 위해서는 저항분 누설전류의 측정이 필수적이며, 전누설전류 중에서 저항분 누설전류를 분리하여 검출하는 방법은 자기소거법, 동기정류법^{[5]-[7]} 등이 이미 발표되어 있지만 정확도와 상용화에는 만족스럽지 못하다. 현재는 전술한 바와 같이 저항분 누설전류의 변화가 전누설전류 중에 포함된 제 3조파 누설전류성분의 변화로 나타나기 때문에 제 3조파 누설전류의 측정을 저항분 누설전류 측정에 대신하는 방법이 주류를 이루고 있다^[8].

그러나 인가전압이 순수한 정현파가 아닌 정현파에 제 3조파 또는 제 5조파 성분을 포함하면 이들 인가전압에 의해 피뢰기를 흐르는 저항분 누설전류와 용량분 누설전류의 크기도 변화할 것이므로 이에 따라 전누설전류도 달라지므로 누설전류 측정에 의한 열화진단에 오차를 가져올 것이다.

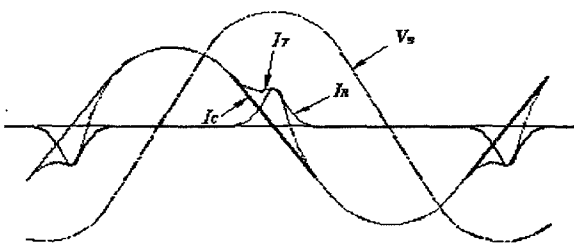


그림 2 인가전압과 누설전류파형 예
Fig. 2 Typical waveforms of applied voltage and leakage current components

3. 피뢰기 열화진단에 있어 전원고조파의 영향

피뢰기의 누설전류는 피뢰기 양단에 교류전압이 인가된 상태에서 흐르는 누설전류의 크기를 측정하는 것으로, 인가전압이 순수한 전원주파수(60[Hz])만 포함하고 있으면 제 2장에서 기술한 바와 같이 누설전류 측정에 의한 열화진단에

문제가 없지만, 피뢰기가 설치된 전력계통의 상용전원에는 다수의 고조파 성분이 포함되어 있기 마련이다. 그러므로 전원전압에 포함된 고조파 전압이 크게 되면 누설전류에 의한 열화진단에 영향을 주게 될 것이다.

피뢰기에 정현파 교류전압이 인가되면, 전누설전류 i_t 는 용량분 누설전류 i_c 와 저항분 누설전류 i_r 의 합으로 나타낼 수 있다. 열화진전에 따라 저항분 누설전류의 크기는 증가한다.

그러나 피뢰기에 인가되는 교류전압은 식(1)과 같이 고조파를 포함한다고 하면, 인가전압 v_t 는

$$v_t = \sqrt{2} v_1 \sin \omega t + \sqrt{2} v_n \sin (n\omega t + \phi) \text{ [V]} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, n 은 3, 5, ..., ϕ 는 위상차이다.

이 때 전체 누설전류 i_t 는

$$i_t = i_c + i_r \text{ [\mu A]} \quad (2)$$

가 되고, 용량분 누설전류 i_c 는 기본파 전압과 고조파 전압성분에 의해

$$i_c = i_{c1} + i_{cn} \text{ [\mu A]} \quad (3)$$

이 된다. 저항분 누설전류 i_r 은 피뢰기 소자 자체의 비선형 저항특성에 의한 제 3조파 누설전류 성분과, 인가전압의 전원고조파 성분에 의한 제 3조파 누설전류 성분을 포함하게 된다^[9].

따라서 저항분 누설전류 i_r 은

$$i_r = i_{r1} + i_{r3} + i_{r3} \text{ [\mu A]} \quad (4)$$

로 되어 전원전압에 포함된 고조파 성분의 크기에 따라 측정값이 달라지게 된다.

본 논문에서는 누설전류의 열화진단기술에 있어 전원전압에 포함된 고조파 성분의 영향을 분석하기 위하여 정격 6 kV, 5 kA인 ZnO 소자의 비선형 저항특성을 가진 PSpice 모델 식 (5)를 설계하였다^[10,11].

여기에 전원전압으로 순수 정현파 및 기본파에 제 3조파 전압을 중첩시켜 전누설전류와 저항분 누설전류의 크기를 PSpice Tool에 의해 시뮬레이션을 수행하였다^[12].

$$\log(V_{var}) = a_0 + a_1 \log(i) + a_2 \exp \{-\log(i)\} + a_3 \exp \{\log(i)\} \quad (5)$$

여기서 a_0, a_1, a_2, a_3 는 각 전류영역에서의 비선형 계수를 나타낸다.

그림 3에는 본 연구의 시뮬레이션 회로를 나타내었다. 식 (5)의 피뢰기 모델에는 전원전압의 고조파 함유에 따른 저

항분 누설전류의 변화를 분석하기 위하여 커패시터 성분이 없는 비선형 저항특성만을 가지도록 설계하였다. 피뢰기 모델에 생략된 커패시터(C_p)는 그림 3의 회로에 나타난 바와 같이 피뢰기 모델과 병렬로 커패시터를 연결하였다. 그러므로 피뢰기 양단에 전원이 인가되면 피뢰기 모델에는 저항분 누설전류만이 흐르게 된다.

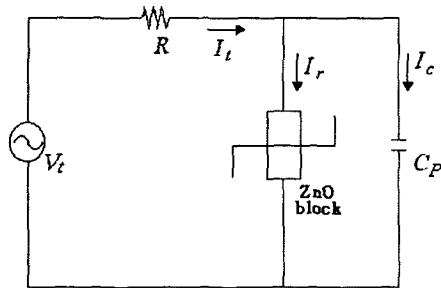


그림 3 시뮬레이션 회로도
Fig. 3 Circuit for the simulation

그림 4는 정상운전전압에서 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류 파형 및 저항분 누설전류의 고조파 분석결과를 나타낸 것이다.

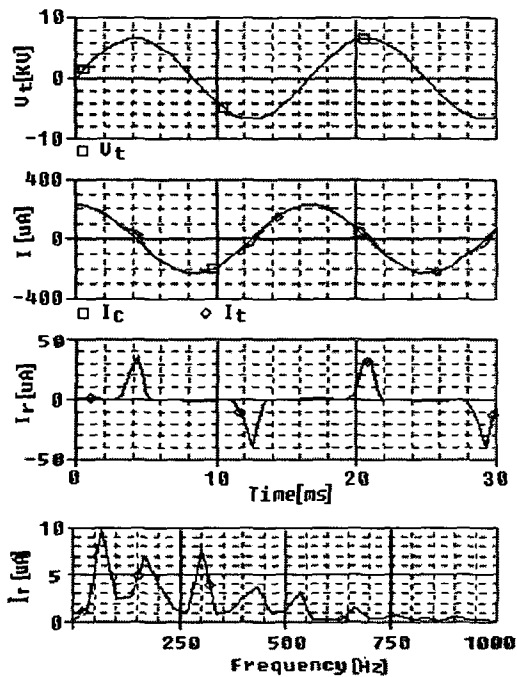


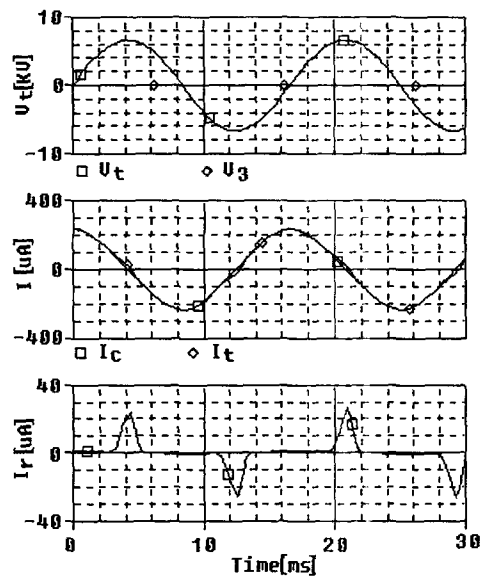
그림 4 인가전압과 누설전류 파형 (순수 정현파 인가)
Fig. 4 Typical waveforms of the applied voltage and leakage current components (applying a pure sinusoidal voltage)

전술한 바와 같이 피뢰기의 전누설전류는 인가전압에 90° 앞선 용량분 누설전류와 인가전압에 동상인 저항분 누설전류로 나타낼 수 있다. 또한 인가된 전원전압이 순수한 정현파라도 피뢰기 소자의 비선형 저항특성에 따라 저항분 누설전류에는 60[Hz]의 기본파 성분 이외에 제 3조파 이상의 누설전류 성분들이 존재하는 것을 알 수 있다.

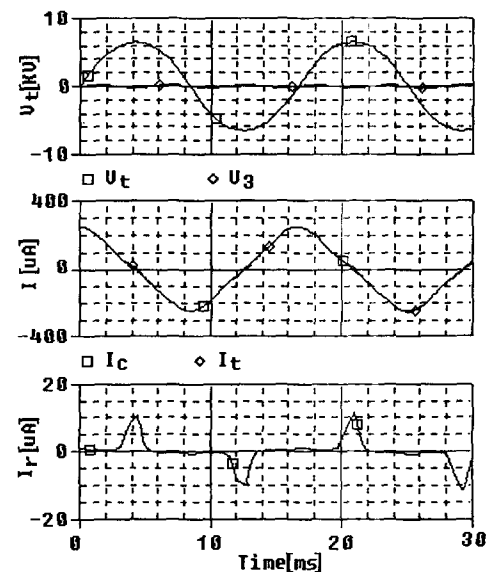
4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구의 시뮬레이션에서는 전원전압에 포함된 제 3조파 전압의 크기를 0.5[%], 1[%], 2[%], 3[%]로 증가시키면서, 또한 기본파 전압에 제 3조파 전압을 위상 0° 와 180°로 하였을 때, 누설전류의 변화를 분석하였다.

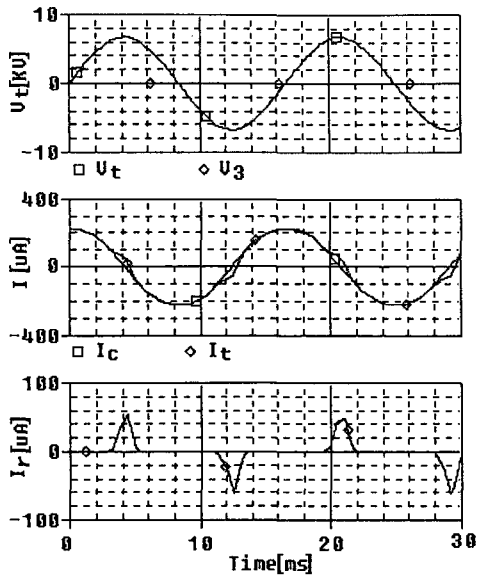
그림 5는 전원전압 v_t 에 포함된 제 3조파 v_3 의 크기를 기본파 v_1 의 위상 0° 및 180°에서 중첩시켰을 때, 누설전류의 변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과로부터 그림 4의 순수 정현파만 포함되어 있을 때와는 누설전류의 크기에 있어 다르게 나타남을 알 수 있다. 기본파 전압의 위상 0°에서 제 3조파 전압을 중첩시키면 인가전압의 90°에서는 제 3조파 전압성분의 중첩으로 최대값의 감소를 가져오게 된다.



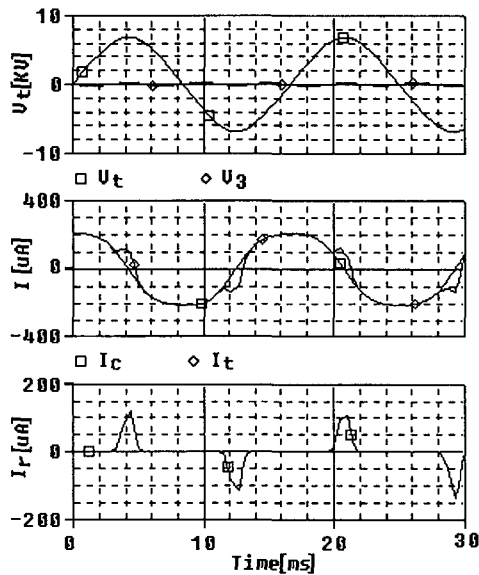
(a) (0°, 1 %)



(b) (0°, 3 %)



(c) (180°, 1 %)



(d) (180°, 3 %)

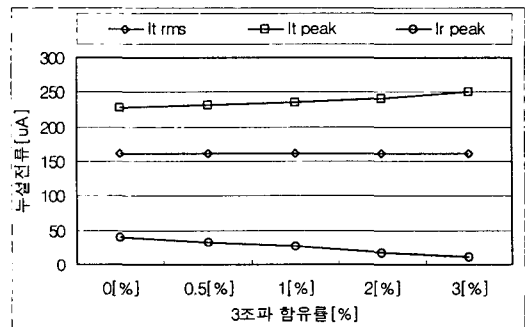
그림 5 인가전압과 누설전류 파형(제 3조파 전압중첩)
 Fig. 5 Typical waveforms of the applied voltage and leakage current components (overlapping the 3rd harmonic voltage)

그러나 이 경우의 전누설전류의 최대값은 제 3조파 전압 v_3 로 인하여 점차 증가하지만, 저항분 누설전류의 최대값은 인가전압 v_1 의 최대값의 감소로 인하여 증가하지 않고 오히려 감소하게 되는 결과를 나타내게 된다.

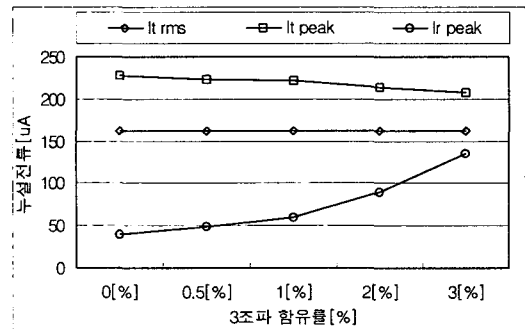
또한 기본파 전압의 위상 180°에서 제 3조파 전압을 중첩시킬 경우, 인가전압의 90°에서는 제 3조파 전압성분의 중첩으로 최대값의 증가를 가져오게 되므로, 위상 0°에서 제 3조파 전압을 중첩시킬 때에는 반대의 결과로 전누설전류의 최

대값은 점차 감소하고, 저항분 누설전류의 최대값은 증가하게 된다.

그림 6에는 기본파 전압에 제 3조파 전압의 크기를 증가시키면서 위상 0°와 180°에서 중첩시켰을 때 누설전류의 변화를 나타낸 것이다.



(a) 0°에서 제 3조파 전압 인가



(b) 180°에서 제 3조파 전압 인가

그림 6 누설전류의 변화

Fig. 6 Changes of the leakage current components

전술한 바와 같이 기본파 전압의 위상 0°에서 제 3조파 전압을 중첩시켰을 때, 제 3조파 전압의 증가에 따라 전누설전류의 최대값은 다소 증가함을 알 수 있다.

그러나 저항분 누설전류의 크기는 오히려 감소하는데, 이것은 저항분 누설전류가 인가전압에 동상으로 작용하기 때문에 기본파 전압 0°에서 제 3조파를 중첩시키면 인가전압의 최대값이 감소하기 때문이다. 그림 6(b)는 제 3조파를 기본파 전압 위상 180°에서 중첩시킨 것으로 위상 0°에서 중첩시켰을 때에는 반대의 경향이 나타나게 된다.

5. 결 론

피뢰기는 열화가 진전됨에 따라 저항분 누설전류의 증가를 나타내며, 저항분 누설전류의 변화가 전누설전류 중에 포함된 제 3조파 누설전류 성분의 변화로 나타나기 때문에 제 3조파 누설전류의 측정을 저항분 누설전류 측정에 대신하는 방법이 주류를 이루고 있다. 그러나 전원전압에 고조파 성분이 포함되면 피뢰기의 열화정도와 관계없이 누설전류의 변화가 발생하므로 누설전류의 변화를 열화지표로 하는 진단기술에서는 오차가 발생하게 된다.

본 연구의 실험결과에서도 전누설전류 및 저항분 누설전류는 피뢰기 열화와 관계없이 기본과 전압에 중첩되는 제 3 조파 전압의 크기와 위상에 따라 현저히 변화함을 확인할 수 있었다. 그러므로 누설전류 측정에 의한 열화진단시 전 원전압의 고조파 분석을 수행하여 측정된 누설전류의 크기를 보정하는 것에 의해 열화진단시 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구(관리번호 : 00-역-02)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] S. Shirakawa et al, "Maintenance of surge arrester by portable arrester leakage current detector", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No 3, pp. 998 ~1003, 1988.
- [2] J. Lundquist et al, "New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arrester in service", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1811~1822, 1990.
- [3] 길경석 외, "뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단 전문가 시스템", 대한전기학회 논문지 C, 4호, 제51권, pp. 152~157, 2000.
- [4] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 302~309, 1992.
- [5] 岡藤伸夫 外, "酸化亞鉛形避雷器の漏れ電流檢出方式の提案", 日本電氣學會電力・エネルギー部門大會, pp. 850 ~851, 1994.
- [6] 石辺信治, "酸化亞鉛形避雷器の劣化診斷テクニック", 電氣計算, Vol. 55, No. 3, pp. 56~60, 1987.
- [7] 石崎義弘 外, "避雷器の外部診斷技術", OHM, Vol. 74, No. 4, pp. 45~50, 1987.
- [8] 宇治田克 外, "酸化亞鉛形避雷器用漏れ電流檢出器", 三菱電機技報, Vol. 55, No. 3, pp. 228~231, 1981.
- [9] Hanxin Zhu, M.R.Raghuveer, "Influence of Harmonics in Power System Voltage on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics", Proceeding of 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena", pp.542~545, 1999.
- [10] 길경석 외, "가스류-브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델", 한국박용기관학회지, 2호, 제23권, pp. 150-158, 1999.
- [11] 길경석 외, "PSpice 시뮬레이션을 위한 바리스터의 모델링", 97 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술발표회 논문집, pp. 202~205, 1997.
- [12] MicroSim, The Design Center PSpice Version 7.1, MicroSim Corporation, 1996.

저 자 소개



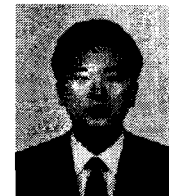
길 경 석 (吉 曠 碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996~현재 한국해양대학교 공과대학 전기전자공학부 부교수.
Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127
E-mail : kilgs@kmaritime.ac.kr



한 주 섭 (韓 柱 燮)

1972년 1월 13일생. 1997년 부경대학교 제어계측공학과 졸업. 1999년 한국해양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.
Tel : 051-410-4893, Fax : 051-403-1127
E-mail : jshan@kmaritime.ac.kr



주 문 노 (朱 玟 魯)

1968년 7월 7일생. 1994년 인하대 환경공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹 선임연구원. 2001년도 KERI 대상 수상.
Tel : 055-280-1324
E-mail: mnju@keri.re.kr