피뢰기 열화진단에 있어 전원 고조파의 영향과 보정에 관한 연구

論 文
54C-11-4

A Study on the Influence of Harmonics in Power System Voltage on Arrester Diagnostics and its Compensation

金 一 權* · 宋 在 鏞* · 韓 柱 燮** · 吉 暻 碩† · 柳 吉 洙*** · 趙 漢 九§
(Il-Kwon Kim · Jae-Yong Song · Ju-Seop Han · Gyung-Suk Kil · Keel-Soo Rhyu · Han-Goo Cho)

Abstract - This paper dealt with the influence of harmonic voltages on arrester diagnostics and its compensation method by using a designed PSpice arrester model. A pure sinusoidal voltage and its 3rd harmonic voltage were applied to the model, and the leakage current components were analyzed. The simulation results have shown 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. In this paper, an approximated 5th order polynomial formula by the Least-Square-Technique was derived, and correction factors which compensate the error caused by the 3rd harmonic voltage were calculated.

Key Words : ZnO Arrester, Leakage Current, Deterioration, Harmonics, Diagnostic Techniques, Power System Voltage

1. 서 론

산화아연(ZnO)형 갭리스 피뢰기는 정상운전전압에서도 접지측으로 미소한 누설전류가 흐르며 열화진전에 따라 누설전류가 증가하기 때문에 이를 열화진단의 지표로 이용한다[1-3]. 또한 최근에는 피뢰기의 비선형 저항 특성에 기인하는 전체 누설전류의 제 3조파 성분과 피뢰기 열화상태의 관계를 규명하여 진단 시스템의 구성을 단순화시키는 기술이 연구되고 있다[4-7]. 그러나 피뢰기에 인가된 전원에 고조파 성분이 포함되면 열화와 무관한 누설전류의 증가 또는 감소가 나타나며, 이 때문에 피뢰기 상태를 정확히 진단하기가 어렵다[8].

따라서 전원에 포함된 고조파의 영향을 분석하고 이에 대한 누설전류와의 상관관계를 보정계수로 산출한다면 보다 정확한 피뢰기 열화진단이 가능할 것이다.

본 논문에서는 피뢰기를 통하여 흐르는 누설전류를 열화지표로 이용하는 진단기술에 있어 전원에 포함된 제 3조파 성분의 크기와 위상에 따른 누설전류의 변화를 분석하고 이에 대한 보정방법을 제시하였다.

2. 전원 고조파와 피뢰기 누설전류

ZnO 피뢰기의 전기적 등가회로는 ZnO 입자사이의 정전용량과 입계층간에 형성된 쇼트키(schottky) 장벽의 변화에 의하여 생기는 비선형 저항으로 구성된다[2]. 비선형 저항을 통하여 흐르는 저항분 누설전류는 열화가 진전됨에 따라 ZnO 입계면의 전위장벽이 감소되어 지속적으로 증가하는 경향을 나타내므로 열화진단의 중요한 척도가 된다.

피뢰기에 60 Hz 순수 정현파 교류전압을 인가하면, 용량분 누설전류 i_c와 저항분 누설전류 i_r의 합으로 표현되는 전체 누설전류 i_t가 흐르게 된다. 이 때 용량분 누설전류 i_c는 기본 주파수 성분만 존재하지만, 저항분 누설전류 i_r은 비선형 저항 특성에 의하여 기본 주파수 이외에 다수의 기수 고조파 성분이 존재한다. 이 중에 제 3조파 성분은 다른 고조파에 비하여 크기가 가장 우세하므로 열화를 진단하는 중요한 요소가 되며, 본 논문에서는 전원에 포함된 다양한 고조파 성분 중에 제 3조파 성분에 대한 영향에 관하여 연구를 수행하였다.

피뢰기에 인가되는 교류전압이 n차 고조파 성분인 v_n을 포함하고 있다면 인가전압 v_t는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, n은 3, 5, …, ϕ_n은 n차 고조파 전압의 위상이다. 이 때 전체 누설전류 i_t는

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

가 되고, 용량분 누설전류 i_c는 기본파와 고조파 성분으로 나눌 수 있으며, 이는 식 (3)과 같다.

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

† 교신저자, 正會員 : 韓國海洋大學校 電氣電子工學部 副敎授 · 工博
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr
* 正 會 員 : 韓國海洋大學校 電氣電子工學部 博士課程
** 正 會 員 : 韓國海洋大學校 産業技術硏究所 硏究員 · 工博
*** 正 會 員 : 韓國海洋大學校 IT工學部 敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 韓國電氣硏究員 責任硏究員 · 工博
接受日字 : 2005年 6月 15日
最終完了 : 2005年 9月 27日

여기서, i_{cn}은 n차 고조파 성분이다. 저항분 누설전류 i_r은 3차를 초과한 고조파 성분을 무시한다면, 기본파 성분 이외에 피뢰기 소자 자체의 비선형 저항 특성에 의한 누설전류 성분과 인가전원의 고조파 성분에 의한 제 3조파 누설전류 성분으로 나눌 수 있으며, 이는 식 (4)와 같다.

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

여기서, i_{r3}는 피뢰기의 비선형 저항특성에 의한, i_{r3}'은 전원의 고조파 성분에 의한 저항분 누설전류의 제 3조파 성분이다. 식 (4)에서와 같이 전원에 고조파 성분이 포함되면 그 크기에 따라 누설전류의 측정값이 달라지며, 이는 피뢰기의 열화상태와는 무관한 누설전류의 증가와 감소의 요인이 된다. 따라서 전원에 포함된 고조파 성분의 크기 및 위상에 대하여 측정된 누설전류의 값을 보정할 필요가 있다.

본 논문에서는 누설전류를 열화진단의 지표로 이용하는 기술에 있어 전원에 포함된 제 3조파 성분의 크기 및 위상의 변화가 측정값에 미치는 영향을 분석하고, 이에 대한 보정계수를 산출하기 위하여 정격 6 kV, 5 kA의 배전용 피뢰기 PSpice 모델 식 (5)를 적용하였다[9-11].

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

여기서 a_0, a_1, a_2, a_3는 각 전류영역에서의 비선형 계수를 나타낸다.

식 (5)를 바탕으로 순수 정현파 전압에 제 3조파 전압을 중첩시키고 제 3조파 전압의 함유율 및 위상을 변화시키면서 각각의 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 때의 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 변화를 분석하였다.

그림 1은 피뢰기에 60 Hz 정현파 교류전압을 인가했을 때의 인가전압과 누설전류 파형을 나타낸 것이며, 각각의 전류값은 보정계수를 산출하기위한 기준으로 사용하였다.

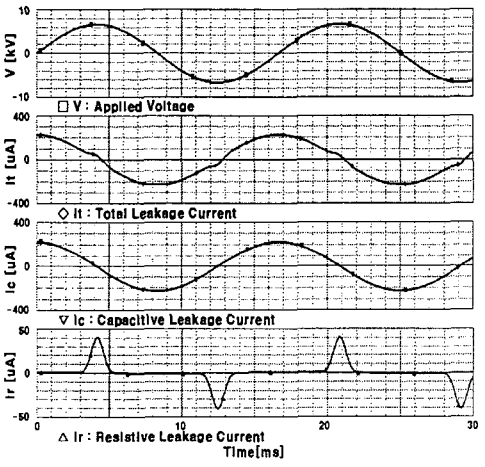


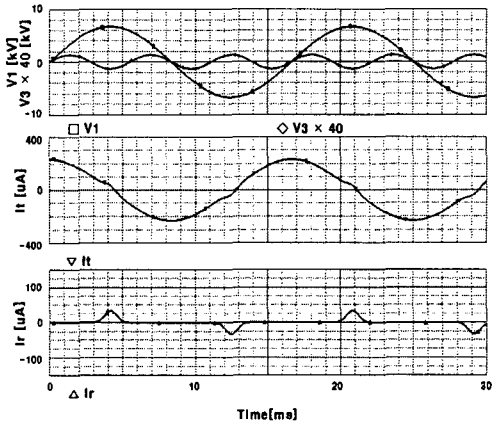
그림 1 인가전압과 누설전류 파형

Fig. 1 Typical waveforms of the applied voltage and the leakage current

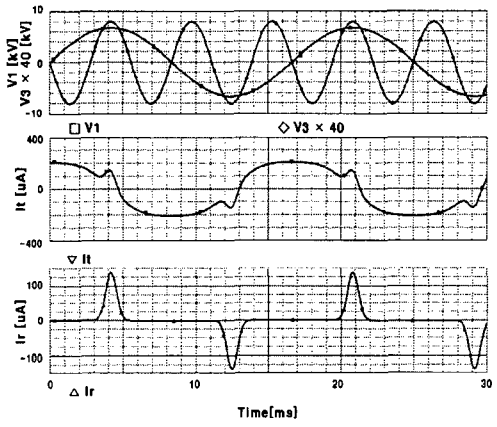
3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

국내 전력 공급에 있어 전원 고조파 함유율에 대한 기준은 66 kV 이하 배전선로의 경우 3 % 이내로 규정하고 있으며 각 고조파 성분에 대한 기준은 규정되어 있지 않다[12]. 또한 60 Hz 교류전원에 중첩되는 제 3조파 전압의 위상에 대하여 전체 누설전류 및 저항분 누설전류 크기의 변화는 180 ° 를 기준으로 대칭이 되므로 제 3조파의 함유율 및 위상의 범위는 3 % 이내, 180 ° 이하로 각각 설정하였다.

본 연구에서는 설계한 배전용 피뢰기의 PSpice 모델을 이용하여 60 Hz 정현파 교류전압에 제 3조파 전압을 중첩시킨 전원을 피뢰기에 인가하는 시뮬레이션을 수행하였으며, 기본파 전압에 대한 제 3조파 전압의 함유율을 0 ~ 3 %로, 위상을 0 ~ 180 ° 로 증가시키면서, 고조파 성분에 대한 누설전류의 변화를 분석하였다.



(a) (0.5 %, 0 °)



(b) (3 %, 180 °)

그림 2 제 3조파 전압의 크기와 위상에 따른 파형의 예

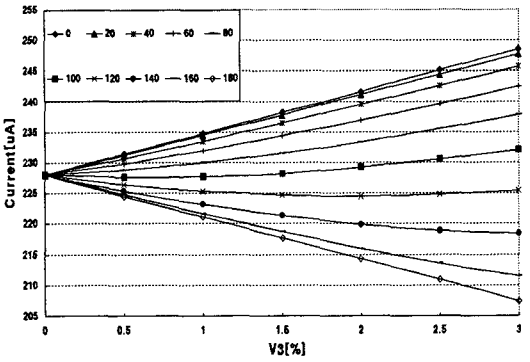
Fig. 2 Example waveforms to the magnitude and the phase of 3rd harmonic voltage

그림 2는 제 3조파 전압을 포함한 전원에 대한 누설전류 파형의 예이며, 저항분 누설전류의 최대값이 가장 작을 때와 클 때를 (a), (b)로 나누어 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과

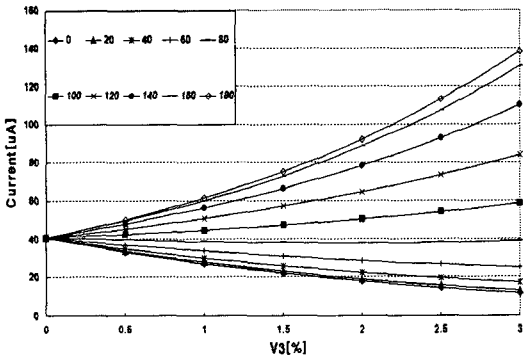
로부터, 그림 1의 순수 정현파 전압을 피뢰기에 인가했을 때와는 달리 전체 누설전류와 저항분 누설전류 최대값의 현저한 변화를 확인하였다.

3.1 전원 고조파의 영향 분석

그림 3은 제 3조파 전압의 함유율에 대한 누설전류의 변화를 각 위상별로 나타낸 것이다. 위상이 0 ° 인 경우, 전체 누설전류의 최대값은 제 3조파 전압의 함유율이 0 ~ 3 %로 변함에 따라 점차 증가하였으며, 이와 반대로 저항분 누설전류의 최대값은 감소하였다. 함유율 3 %의 경우, 순수 정현파 전압을 인가했을 때에 비해 전체 누설전류와 저항분 누설전류는 108.99 %, 28.31 %로, 위상이 180 ° 인 경우에는 각각 90.96 %, 340.26 %로 저항분 누설전류의 변화를 나타내었다.



(a) 전체 누설전류



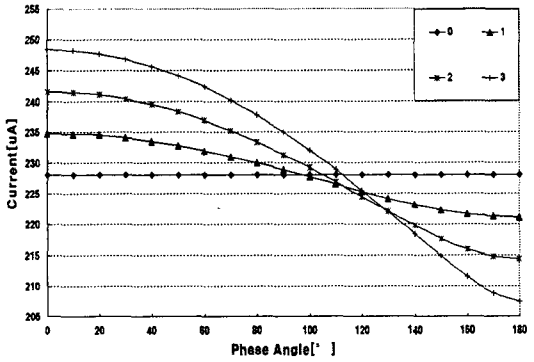
(b) 저항분 누설전류

그림 3 제 3조파 전압의 크기에 따른 누설전류의 변화

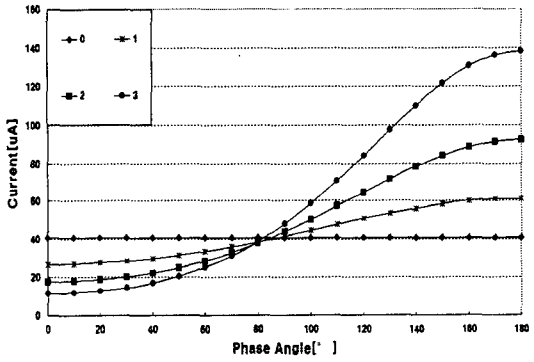
Fig. 3 Variation of leakage current as a function of the magnitude of overlapped 3rd harmonic voltage

그림 4는 앞서 수행한 시뮬레이션 결과로부터 제 3조파 전압의 위상에 대한 누설전류의 변화를 각 함유율별로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전체 누설전류의 경우 위상이 0 ~ 180 ° 로 변함에 따라 점차 감소하였으며 반대로 저항분 누설전류는 증가하였다. 또한 변화폭은 함유율에 대하여 비례적으로 증가하였다.

이와 같이 피뢰기를 통하여 흐르는 누설전류는 순수 정현파 전압을 인가하였을 때와는 달리 전원에 포함된 고조파의 함유율 및 위상에 대하여 열화와 무관한 증가와 감소가 발생했다. 또한 제 3조파 전압의 위상이 0 ° 와 180 ° 부근에서 함유율이 증가할수록 누설전류의 변화폭이 크게 나타났다. 따라서 열화진단 기술에 있어 피뢰기의 열화상태를 변화된 누설전류의 값으로 진단하는 방법은 고조파 성분에 의해 쉽게 왜곡될 수 있으며, 전원에 포함된 고조파 성분을 함유율 및 위상에 대하여 분석하고 이에 대해 측정된 누설전류의 값을 보정할 필요가 있음을 확인하였다.



(a) 전체 누설전류



(b) 저항분 누설전류

그림 4 제 3조파 전압의 위상에 따른 누설전류의 변화

Fig. 4 Variation of leakage current as a function of the phase of overlapped 3rd harmonic voltage

3.2 전원 고조파에 대한 누설전류의 보정

그림 3, 4에 나타낸 시뮬레이션 결과로부터 순수 정현파 전압을 인가했을 때와 고조파가 함유된 전원을 인가했을 때의 누설전류 비율을 계산하면 고조파 영향에 대한 보정계수를 산출할 수 있다. 그러나 이는 시뮬레이션을 수행한 각 함유율과 위상에 대한 경우만을 나타내므로, 실제 다양하게 변화하는 전원의 고조파 성분에 대하여 능동적인 보정계수 산출 및 적용을 할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 전원에 포함된 다양한 고조파 성분에 대응하기 위해, 앞서 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 보정계수를 바탕으로 함유율과 위상에 대한 함수로 근사시켜 전원에 포함된 고조파 성분에 대하여 보정계수를 산출하는 방

법을 제안하였다. 보정계수는 고조파 전압의 함유율과 위상에 대하여 그림 3, 4와 동일한 비선형 곡선으로 나타나므로, 제안한 방법은 비선형 데이터에 대한 근사식의 오차를 최소화하기 위하여 최소 자승 근사법을 적용하였으며 근사식은 5차 다항식으로 계산하였다.

앞서 시뮬레이션에 의해 얻어진 데이터로부터 최소 자승 근사법을 적용하여 보정계수 산출을 위한 수식은 식 (6)과 같다.

$$f(V_3)_{\phi_3} = a_{\phi_3} \cdot V_3^5 + b_{\phi_3} \cdot V_3^4 + c_{\phi_3} \cdot V_3^3 + d_{\phi_3} \cdot V_3^2 + e_{\phi_3} \cdot V_3 + 100 \quad (6)$$

여기서, V_3는 제 3조파 전압의 함유율 %이며, $a_{\phi_3} \sim e_{\phi_3}$는 임의의 위상 ϕ_3에 해당하는 계수이다.

제 3조파 전압에 대한 근사식의 오차를 확인하기 위하여 임의의 위상에서 제 3조파 전압의 함유율에 대해 식 (6)을 적용하여 계산한 누설전류의 값과 시뮬레이션을 수행한 누설전류의 값을 비교하였다. 표 1, 2는 이 때의 전체누설전류와 저항분 누설전류의 값을 나타낸 것이다. 표 1, 2에서와 같이 시뮬레이션 결과와 근사식을 적용한 누설전류의 차이가 0.1 μA 이내로 약 ± 0.5 % 의 정확도를 갖는다.

표 1 시뮬레이션과 근사식의 적용 결과 비교(전체 누설전류)

Table 1 Comparison of the simulation and the calculation results by the equation (6)(total leakage current)

(단위 : μA)

V_3 \ ϕ_3	36 °		72 °		108 °		144 °	
	Sim.	Cal..	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.
0.3 %	229.60	229.69	228.70	228.67	227.40	227.41	226.30	226.32
1.2 %	234.98	234.96	231.58	231.53	226.70	226.70	221.90	221.94
2.7 %	244.30	244.34	238.20	238.18	228.70	228.74	217.30	217.31

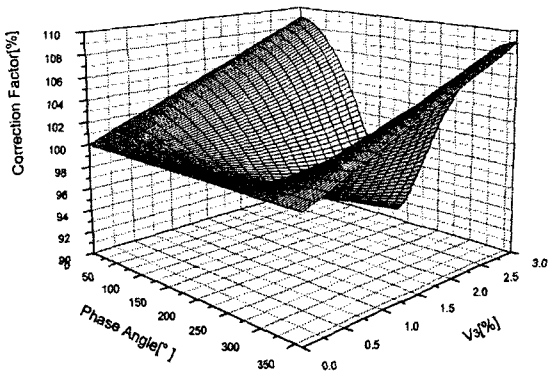
표 2 시뮬레이션과 근사식의 적용 결과 비교(저항분 누설전류)

Table 2 Comparison of the simulation and the calculation results by the equation (6)(resistive leakage current)

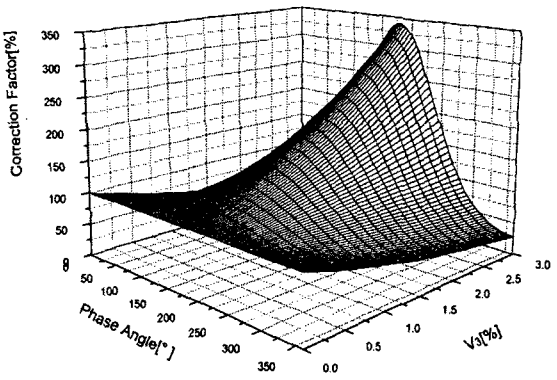
(단위 : μA)

V_3 \ ϕ_3	36 °		72 °		108 °		144 °	
	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.	Sim.	Cal.
0.3 %	36.77	36.77	39.15	39.17	42.28	42.25	44.97	44.93
1.2 %	27.40	27.40	35.71	35.73	48.44	48.47	61.17	61.15
2.7 %	17.25	17.24	32.74	32.75	64.13	64.14	103.40	103.33

그림 5는 제안한 근사식을 이용하여 제 3조파 전압의 함유율과 위상에 대한 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 보정계수를 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 이와 같은 데이터를 열화진단 시스템에 적용한다면 피뢰기에 고조파를 포함한 전원이 인가된 상태라도 정확한 누설전류 측정이 가능함은 물론 열화진단의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.



(a) 전체 누설전류



(b) 저항분 누설전류

그림 5 누설전류의 보정계수

Fig. 5 Correction factors of leakage currents

4. 결 론

본 논문에서는 피뢰기의 누설전류를 지표로 하는 진단기술에 있어 전원에 포함된 제 3조파 성분의 크기와 위상에 따른 누설전류의 변화를 분석하고, 이에 대한 보정계수 산출과 보정 기술을 도출하였다.

배전용 피뢰기의 PSpice 모델을 적용한 시뮬레이션 결과, 제 3조파 전압의 함유율에 대한 누설전류의 변화는 각 위상에 따라 증가 및 감소의 경향이 다르게 나타났으며, 제 3조파 전압의 위상에 대한 누설전류의 변화는 전체 누설전류의 경우 위상이 0 ~ 180 ° 로 변화함에 따라 점차 감소하였으며 반대로 저항분 누설전류는 증가하였다. 또한 제 3조파 전압의 위상이 0 ° 와 180 ° 부근과 함유율이 증가할수록 누설전류의 변화폭이 크게 나타났다. 즉, 피뢰기의 누설전류는 기본파 전압을 인가하였을 때와는 달리 전원전압에 포함된 고조파 전압의 크기 및 위상에 대하여 열화와 무관한 증

가와 감소가 나타남을 확인하였다.

본 연구에서는 다양하게 변화하는 전원의 고조파 성분에 대하여 능동적인 보정계수 산출 및 적용을 할 수 있도록 시뮬레이션 결과로부터 계산된 보정계수를 5차 다항식으로 근사하였다. 임의의 함유율 및 위상에 대한 시뮬레이션 결과와 보정계수 근사식을 이용한 누설전류의 값은 오차가 ± 0.5 % 이내였으며, 본 연구에서 제안한 보정계수 산출방법을 피뢰기 열화진단기술에 적용한다면 보다 정확한 진단이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-138)주관으로 수행된 과제임.

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, No3, 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", 대한 전기학회 논문지, 제51C권, 4호, pp.152-157, 2000.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 石崎義弘 外, "避雷器の外部診斷技術", OHM, Vol.74, No.4, pp.45-50, 1987.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 길경석 외, "가스튜-브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델", 한국박용기관학회지, 제23권, 2호, pp.150-158, 1999.

[10] 길경석 외, "PSpice시뮬레이션을 위한 바리스터의 모델링", 97 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술발표회 논문집, pp.202-205, 1997.

[11] MicroSim, The Design Center PSpice Version 7.1, MicroSim Corporation, 1996.

[12] 한국전력공사, "기본공급약관시행세칙", pp.11-12, 2005. 4.

저 자 소 개

김 일 권 (金 一 權)

1974년 1월 24일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : 051-410-4893

Fax : 051-403-1127

E-mail : hvkwon@shinbiro.com

송 재 용 (宋 在 鎔)

대한전기학회논문지C, 제54권 제8호 2005년 8월호 참조

한 주 섭 (韓 柱 燮)

대한전기학회논문지C, 제54권 제8호 2005년 8월호 참조

길 경 석 (吉 暻 碩)

대한전기학회논문지C, 제54권 제8호 2005년 8월호 참조

류 길 수 (柳 吉 洙)

1953년 5월 23일생. 1976년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1979년 동대학교 대학원 졸업(석사). 1986년 일본동경공업대학 대학원 졸업(석사). 1989년 동대학원 졸업(공박). 1982년~현재 한국해양대학교 IT 공학부 교수.

Tel : 051-410-4570

Fax : 051-404-3986

E-mail : rhyu@mail.hhu.ac.kr

조 한 구 (趙 漢 九)

1959년 4월 14일생. 1984년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 전기기기 기술사. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~현재 한국전기연구원 책임연구원 팀장.

Tel : 055-280-1670

Fax : 055-280-1673

E-mail : hgcho@keri.re.kr