

XLPE 전력케이블의 부분방전 검출을 위한 HPF 적용 시험

論 文
55C-4-1

HPF Application Test for PD Detection of XLPE Power Cable

李龍成[†] ·金正允^{*} ·梁種璟^{**} ·朴魯竣^{***} ·崔龍成[§] ·朴大熙^{§§}

(Yong-Sung Lee · Jung-Yoon Kim · Jong-Kyung Yang · Noh-Joon Park · Yong-Sung Choi · Dae-Hee Park)

Abstract - In this paper, we developed HPF (high pass filter) consists of lumped LC components to decrease the noises that are detected in PD (partial discharge) measuring test, and adapted it to field test. We tested it under laboratory circumstances like the fields, and measured the phase change properties of detected signal in UHF sensor with Lemke Probe and oscilloscope (TDS-3054, Tektronix). As a result, we obtained available data showing the decrease of noises in the experiments with the developed HPF from the joint box of 22.9kV distribution line. The result can be adapted to prevent the degeneration of the XLPE power cable, and to observe and diagnosis the underground power transmission cable at the ultra-high voltage.

Key Words : Partial Discharge, PD, PRPDA, UHF Sensor, Lumped LC, HPF

1. 서 론

전력산업 구조개편 이후 발표된 제1차 전력수급 기본계획안(2002.7)에 따르면 전력수요는 매년 평균 3.3% 증가하여 2015년에는 최대 수요가 67,745[MW]에 달할 것으로 전망되고 있다. 이러한 전력수요 증가로 발전 설비와 송배전망의 확충이 요구되고 도시의 팽창과 더불어 송배전 선로를 도심 가로질러 시공해야 하는 필요성도 대두되고 있으며 지중 선로의 결합진단 기술 또한 활발히 연구되고 있다[1].

XLPE 케이블의 절연체 열화 메커니즘을 분석하면, 절연체 내부의 이물질, 보이드 및 크랙 등에 의해 형성된 고전계에 의해 부분방전(partial discharge; PD)이 발생되어 전기 트리가 개시된다. 절연체 내부의 전기트리의 분포가 증가하여 결국에는 절연 파괴가 발생되는데, 부분방전 검출법은 이때 발생하는 방전현상, 즉 고주파 방전전류 및 전위변화 등으로 인한 전기적인 현상을 신호로 검출하는 방법이다.

일반적으로 잡음은 전원전류에 의한 노이즈, 주위환경에 존재하는 노이즈, 선로의 단말부에서 발생된 코로나 노이즈의 유입 등이 있으며 우리가 측정하고자 하는 부분방전 신호는 위 잡음들과 함께 발생한다. 따라서 미소한 부분방전 신호를 측정함에 있어서 노이즈 저감 대책은 매우 중요하다[2].

따라서 본 논문에서는 부분방전 진단중에 검출되는 신호 외의 노이즈를 감소하기 위한 LC 공진형 HPF(High Pass Filter)를 제작하여 PD 검출에 적용한다. 부분방전 신호와 노이즈의 주파수 범위를 확인하기 위해 스펙트럼 아날라이저를 사용하여 주파수분석을 하고 네트워크 아날라이저를 사용하여 제작된 필터의 삽입손실과 반사손실 특성을 확인한다. 또한 현장 선로와 동일하게 제작된 케이블에 모의 결합을 주어 부분방전 검출을 시험하고 실제로 현장에서 지중 배전선로의 노이즈 제거 효과를 확인하며 오실로스코프(TDS3034, Tektronix)와 ICM 프로그램을 통하여 방전크기와 방전회수를 누적 저장하는 PD사의 PRPD 분석법을 사용하여 제작된 30MHz HPF의 적용 전과 적용 후를 비교 분석한다[3].

2. HPF 제작 및 특성시험

그림 1은 노이즈를 제거하기 위한 부분방전 측정용 필터 설계 및 실험 흐름도이며, 본 실험을 진행하기에 앞서 전력 케이블에서 발생하는 노이즈의 주파수 특성을 조사한 후 필터의 제작 및 시험을 수행하였다[4-6].

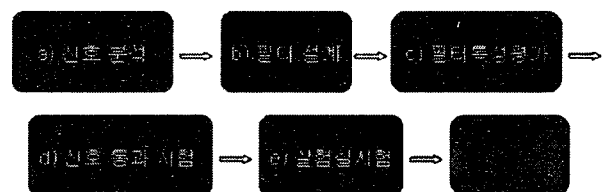


그림 1. PD 진단용 필터 설계 및 실험 흐름도
Fig. 1 Flowchart of filter design and experiment for diagnosis of PD

[†] 교신저자, 學生會員 : (주)엠피와이 研究員
E-mail : bellmini@wonkwang.ac.kr
^{*} 學生會員 : (주)엠피와이 先任研究員
^{**} 學生會員 : 圓光大 電子材料工學科 碩士課程
^{***} 正 會 員 : 圓光大 電氣電子및情報工學部 講義教授 · 工博
[§] 正 會 員 : 東新大 電氣電子및情報工學部 教授 · 工博
^{§§} 終身會員 : 圓光大 電氣電子및情報工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2005年 10月 25日
最終完了 : 2006年 3月 16日

필터는 고전압에 의한 주위의 전자계 영향을 차단하기 위해 금속 차폐함에 삽입되고 캘리브레이터(calibrator)를 사용한 모의 PD신호 통과 시험에 적용된다.

2.1 HPF 제작

XLPE 전력 케이블에서 검출되는 PD 신호에는 공중파와 접지를 통하여 유입되는 노이즈가 존재하는데 케이블의 접속부에서 발생하는 노이즈는 대부분 30[MHz] 이하에서 검출된다[7]. 따라서 본 논문에서는 30[MHz]를 차단주파수로 하는 HPF를 설계 및 제작하여 PD 신호 검출에 적용하였으며 또한 10[MHz], 20[MHz], 50[MHz], 65[MHz] 및 300[MHz]를 각각 차단주파수로 하는 HPF를 제작하여 PD 신호 검출에서 노이즈의 제거효과를 비교하였다.

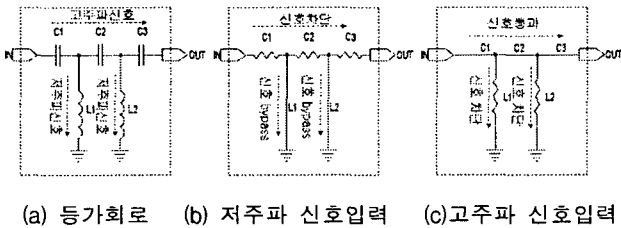


그림 2. LC HPF 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of LC HPF

HPF는 차단 주파수 이상의 신호만을 통과 시키지만 실제로 무한대의 높은 주파수를 통과 시킬 수 없고 특정 주파수 이상이 되면 통과된 신호의 손실이 증가한다. 그림 2(a)는 본 논문에서 적용한 LC 공진형 HPF의 등가회로를 나타낸 것이다. 설계에는 5차의 짐중소차형 Tchebyshev type을 적용하였다. 그림 2(b)는 입력된 신호가 차단주파수 이하일 때의 등가회로이고 capacitance C1, C2, C3는 임피던스로서 동작하며 입력 신호의 대부분이 감소된다. 그림 2(c)는 입력 신호가 차단주파수 이상일 때의 등가회로인데 입력신호는 출력단까지 그대로 통과한다[8, 9].

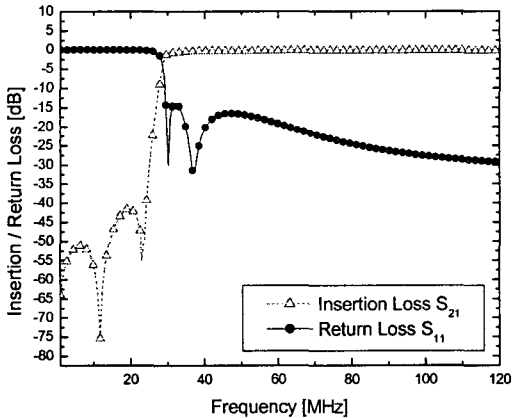


그림 3. 제작된 HPF의 주파수 특성
Fig. 3 Frequency Characteristics of the HPF

그림 3은 제작된 HPF 필터의 삽입손실 및 반사손실 특성을 측정한 것이며 cutoff frequency는 30[MHz]이고 edge level은 -3[dB]이다.

2.2 HPF 특성시험

그림 4는 설계 제작된 LC 필터의 특성을 시험하기 위한 구성도이다. 부분방전 측정 전에 측정기의 기준신호를 교정하기 위한 기준신호 주입방법으로 calibrator를 사용하여 필터를 통과하기 전과 통과 후의 신호 변화를 확인하였다.

그림 4(a)는 calibration 신호를 측정 장비 및 AMP에 직접 주입하여 주파수 및 신호의 크기를 검출하기 위한 구성도이며 그림 4(b)에서와 같이 센서를 사용하지 않은 상태에서 filter만 통과 후 검출된 신호와 비교 하였다. 그림 4(c)는 calibrator 센서와 UHF 센서를 결합하여 신호분석을 하기 위한 구성도이며 그림 4(d)와 같이 필터를 적용한 결과와 비교하였다[10].

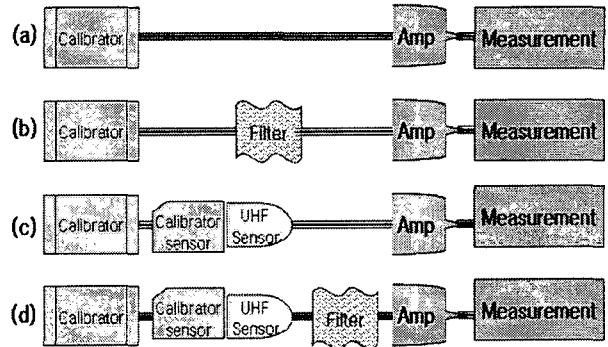


그림 4. calibrator를 이용한 Filter 특성 시험
Fig. 4 Test of filter characteristics using calibrator

그림 5는 30[MHz] HPF 필터를 통과한 calibration 신호의 스펙트럼 분석 결과이다. 여기에서는 27[MHz] 범위의 PD 신호도 제거되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 HPF가 -3[dB] edge level을 갖도록 설계되었으나 tuning을 통하여 삽입손실이 개선되었기 때문이며 필터를 통과함으로써 차단 주파수 이내의 부분방전신호도 제거된다.

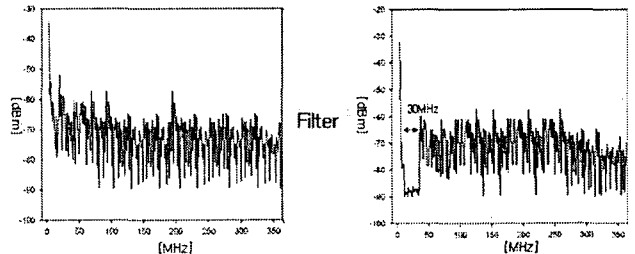


그림 5. calibration 신호의 스펙트럼 분석
Fig. 5 Spectrum analysis of a calibration signal

시험결과, 30[MHz] 이하의 노이즈 및 저주파 잡음신호들은 대략 20[dB]가 감소되는 반면에 차단주파수 이상에서는 필터를 적용하지 않았을 때와 비교하여 약 2[dB]의 감소량을 확인하였다.

표 1. 필터를 통과한 calibrator 신호의 변화

Table 1. Change of calibrator signal through filter

방전전하량 [pC]	차단주파수 [MHz]	앰프 이득 [dB]	최대검출신호 [V]
500	필터 미사용	0	6.00
500	10	0	5.90
500	20	0	5.80
500	30	0	5.50
500	50	0	0.25
500	65	0	0.13
500	300	0	0.00
10,000	300	3	0.10

각각의 주파수 대역에서 HPF를 적용 시험한 후에 얻은 부분방전 시험 결과를 표1에 정리하였다. Calibrator의 방전 전하량은 500[pC]로 하였으며 차단주파수가 300[MHz]인 HPF에서는 검출신호가 미약하여 방전 전하량을 1,000[pC]으로 늘렸으며 Amp의 증폭률도 2배로 하였다.

3. 부분방전 진단 및 결과고찰

3.1 실험실환경 시험

배전급에 주로 사용되고 있는 22.9[kV] XLPE 케이블의 부분방전 측정 시험을 위한 방법은 현장의 여러 요인으로 측정 시험의 제한을 받는다. 또한 부분방전 신호가 검출 되었을 때 신호의 위상을 확인하거나 인가전압의 크기를 검출 하기 위해서는 분압기를 사용하는 전압 위상의 직접 검출이 필요하다.

그러나 현장에 시공된 선로에서는 케이블의 인가전압을 가변 할 수 없을 뿐만 아니라 상용전원보다 높은 전원을 인가할 경우 선로에 시설된 주변의 기기에도 영향을 미치기 때문에 선로와 기기를 분리하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 현장 배전선로와 동일한 조건에서 50[kV] 내전압기를 사용하여 지중선로와 비슷한 환경을 구성한 모의 배전선로 환경을 그림 6과 같이 구성하였다. 이것은 케이블의 중간 접속함 내부의 모의 결함(계면방전결함)을 인위적으로 만든 것으로서 그림 7과 같이 HFCT 센서와 UHF 센서를 이용하여 검출된 PD 신호를 주파수별로 제작된 필터에 입력하였으며 필터를 통과한 신호는 다시 앰프를 거치게 된다.

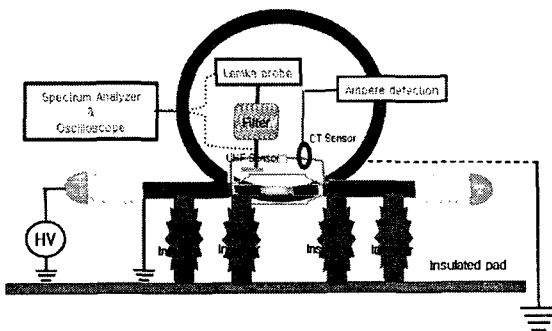
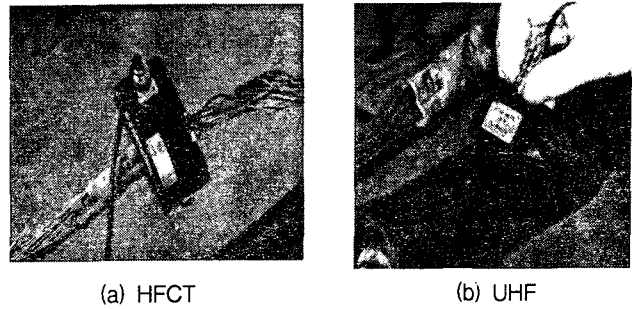


그림 6. 모의 실선로 시험

Fig. 6 Real line simulator for test



(a) HFCT

(b) UHF

그림 7. 부분방전 측정을 위한 센서결선

Fig. 7 Sensor connection for PD detection

그림 8은 모의 결함을 가진 배전 케이블의 부분방전 신호를 검출한 결과로 필터를 적용하기 전과 앰프를 통과한 증폭신호를 오실로스코프를 사용하여 보인 것이다. 사인과 위상은 분압기를 사용하여 직접 검출하였고, 신호의 위상이 0°~90°인 영역과 180°~270°인 영역에서 전형적인 PD신호가 발생되었음을 확인할 수 있다.

그림 8(a)는 필터가 없는 상태의 부분방전 신호이고 신호의 최대 진폭은 6[V]이었으며 그림 8(b)와 8(c)는 10[MHz]와 20[MHz] 필터를 사용한 경우이다.

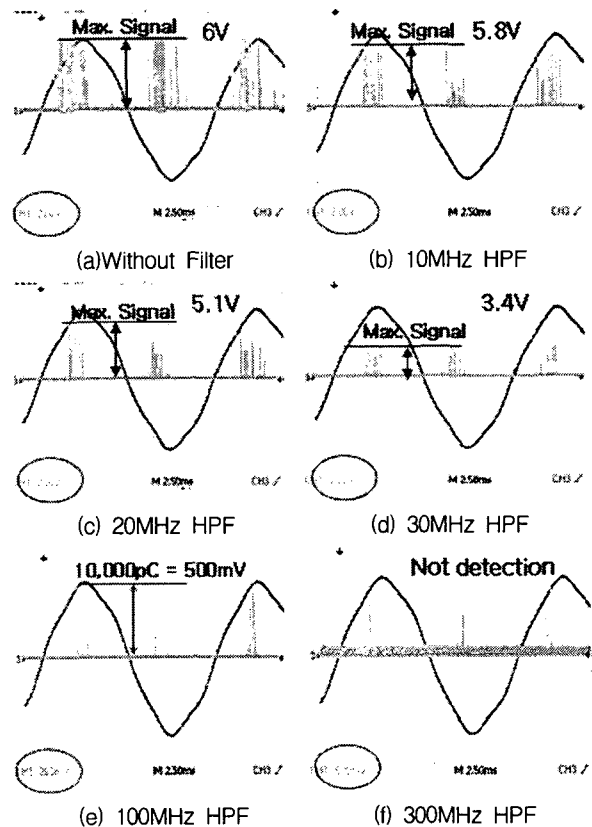


그림 8. 모의 실선로에서 필터별 PD 신호 검출(감쇠 및 방전회수 변화)

Fig. 8 Detection of PD signals for various filters on real line simulator

그림 8(d)에서는 신호의 크기가 40[%] 정도 감소하였으나 방전 패턴이나 위상이 동일하였고, 그림 8(e)는 방전신호가 급격히 떨어져서 10,000[pC]가 통과하였을 때 방전신호가 6[V]에서 500[mV]로 감소되는 것을 볼 수 있다. 그림 8(e)와 8(f)는 앰프의 이득을 2배 증폭한 후 측정된 결과로서 신호 및 방전 횟수가 급격히 감소하였다.

3.2 지중 배전선로 시험

그림 9와 10은 모의 결합을 가진 케이블의 부분방전 시험 결과를 바탕으로 현장에 적용한 시험이다. 시험대상 선로는 운전중 중단할 수 없는 활선 선로로서 300~600[A]의 부하전류가 흐르고 있는 선로로 R상, S상, T상을 측정하였으며 필터를 사용전과 후의 결과를 비교하였다.

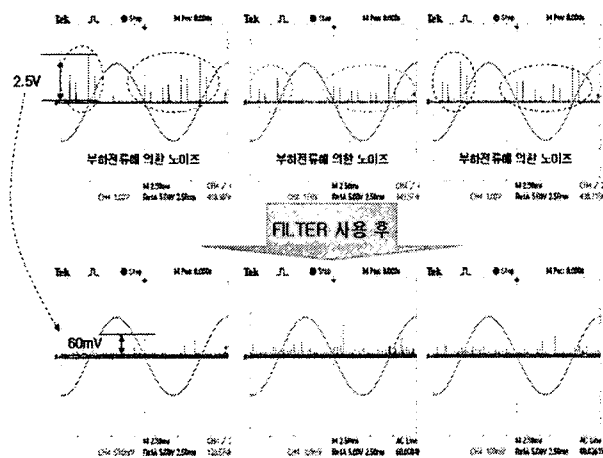


그림 9. 중단부의 지중 실선로 시험 (30[MHz] Filter)
Fig. 9 Underground real power line test for terminal (30[MHz] Filter)

그림 9는 선로의 중단부로 변압기의 인입선과 연결되는 지점에서의 측정결과이다. R상의 측정 결과를 보면 일정한 주기를 가지고 발생하는 PD 신호와 달리 필터 사용 전에는 현장의 부하전류에 의한 노이즈가 최대 2.5[V]까지 발생하였으나 필터를 사용 후에는 최대 60[mV]로 감소하는 것을 확인하였으며 S상, T상의 결과도 부하전류노이즈가 크게 검출되었으나 필터 사용 후에 감소하는 것을 확인할 수 있다.

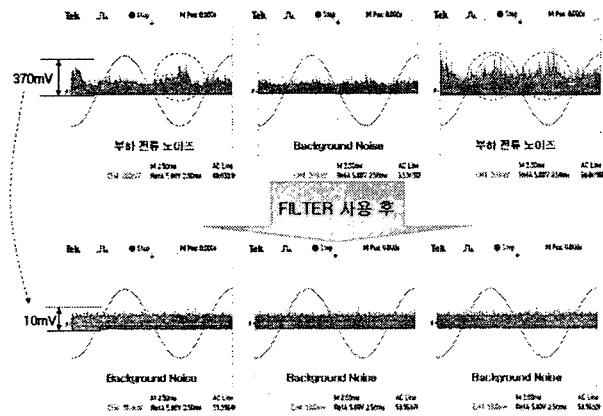


그림 10. 중간접속부의 지중 실선로 시험
Fig. 10 Underground real power line test for joint box

그림 10은 선로의 중간접속부에서의 측정결과인데, R상을 보면 필터 사용 전에는 현장의 부하전류에 의한 노이즈가 최대 600[mV]까지 발생하였으나 필터를 적용한 후에는 최대 10[mV] 이하로 감소된 것을 확인할 수 있다. S상에서는 평탄한 백그라운드 노이즈가 나타났으며 필터를 적용한 후에 평탄하게 감소하였다. T상에서는 R상과 같이 부하전류 노이즈가 크게 나타났으나 필터를 적용한 후에 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 PD사의 ICM장비를 사용하여 측정된 신호의 누적 패턴이다. Background 노이즈로 인하여 검출 신호 확인이 어려웠으나 필터를 적용한 후에 노이즈가 650[pC]에서 65[pC]으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

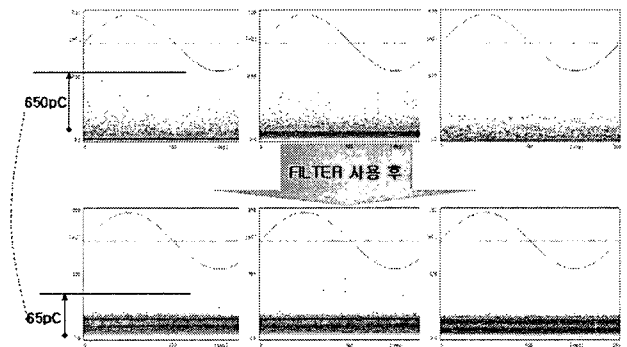


그림 11. PRPD 기법을 이용한 패턴 분석
Fig. 11 Pattern analysis using PRPD technique

4. 결 론

본 논문에서는 부분방전 진단 중에 검출되는 노이즈를 감소시키기 위한 LC 공진형 HPF를 제작하여 PD 검출에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 차단주파수가 각각 10[MHz], 20[MHz], 30[MHz], 50[MHz], 65[MHz] 그리고 300[MHz]인 HPF를 부분방전 진단에 적용한 결과 30[MHz] HPF의 경우에 가장 효과적으로 노이즈 성분을 제거할 수 있었으며 PD 신호 또한 가장 적게 감소하였고 그 값은 2[dB] 내외이었다.

둘째, 차단주파수가 30[MHz] 보다 큰 경우에는 대부분의 calibration 신호가 검출되지 못하였으며 그 크기는 0.1[V]~0.25[V]이었다.

셋째, 지중 배전선로에서 PRPD 분석 결과 HPF를 적용했을 경우에 Background 노이즈의 검출량이 650[pC]에서 65[pC]으로 감소되었다.

따라서 본 논문에서 적용한 HPF를 부분방전 진단에 활용함으로써 고주파 센서의 검출감도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-274) 주관과 (주)엠펜의 지원에 의해서 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] 황갑철, "765[kV] 상업운전에 즈음한 사업추진 현황", 전기저널 Sep. 2002.
- [2] 김정태, 구자윤, "최근 전력케이블 시스템의 부분방전 진단 동향", 대한 전기학회 논문지, Vol. 52, No.12, pp. 42-48, 2003.
- [3] Choong-Sik Kim, Takeshi Kondo and Teruyoshi Mizutani, "Change in PD Pattern with Aging", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No.1, pp. 13-18, Feb. 2004.
- [4] 김정은, "22.9kV XLPE 케이블 PD 검출 시스템 개발연구", 한양대학교 석사 학위 논문, 2004.
- [5] 이진선, "HFPD 부분방전 검출을 이용한 XLPE 전력케이블 시스템 진단 기술 개발 연구", 한양대학교 박사 학위 논문, 2003.
- [6] 강동식, 선종호, 김위영, 이홍식, 박정후, "XLPE 케이블 절연체에서의 가지형 전기트리 성장에 따른 부분방전 위상 특성 연구", 전기학회논문지, Vol. 51, No.5, pp. 213-221, 2002.
- [7] G. Katsuta, et al., "Development of a method of partial discharge detection in extra-high voltage cross-linked polyethylene insulated cable lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, pp. 1068~1079, 1992.
- [8] Randall W. Rhea, "HF Filter Design and Computer Simulation", McGraw-Hill, pp. 171~214, 1998.
- [9] G. Matthaei, L. Young, Microwave Filter Impedance Mathing, "Networks, and Coupling Structure", Artech House, pp. 200~320, 2001.
- [10] 이용성, "22.9 kV XLPE 케이블 PD 검출용 필터 시험" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2277-2279, 2005.

저 자 소 개



이 용 성(李 龍 成)

1975년 9월 2일생. 2004년 원광대학교 전기·전자 및 정보공학부 졸업(학사). 2006년 동대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 (주)엠펙워 연구원.
 Tel : 031-437-0006, Fax : 031-437-0036
 E-mail : bellmini@wonkwang.ac.kr



김 정 운(金 正 允)

1976년 2월 28일생. 2002년 대전대학교 전기공학과 졸업(학사). 2004년 한양대학교 대학원 전자전기·제어계측공학과 졸업(석사). 2004년~현재 (주)엠펙워 선임연구원.
 Tel : 031-437-0006, Fax : 031-437-0036
 E-mail : jungyoon@ihanyang.ac.kr



양 종 경(梁 種 璟)

1980년 1월 13일생. 2001년 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 제어계측 졸업. 2006년 현재 원광대학교 전자재료공학과 석사과정
 Tel : 063-850-6349, Fax : 063-857-6890
 E-mail : duck2214@wonkwang.ac.kr



박 노 준(朴 魯 竣)

1968년 5월 21일생. 1993년 원광대학교 전자공학과 졸업(학사). 1995년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전자공학과 졸업(공박). 1995년 8월~현재 원광대학교 전기·전자 및 정보공학부 강의교수 및 전기융합기술연구센터 행정실장
 Tel : 063-850-7023, Fax : 063-850-7022
 E-mail : njpark@wonkwang.ac.kr



최 용 성(崔 龍 成)

1967년 11월 14일생. 1991년 동아대학교 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년~2001년 JAIST Post-Doc.. 2001년~2003년 Osaka Univ. Post-Doc.. 2002년~2005년 원광대학교 교수. 2006년~현재 동신대학교 전기공학과 교수
 Tel : 061-330-3204, Fax : 061-330-3204
 E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr



박 대 희(朴 大 熙)

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 오사카대학교 대학원 졸업(공박). 1979년~1991년 LG전선연구소 선임연구원. 1999년~2000년 미국 미시시피 주립대학교 교환교수. 1991년~현재 원광대학교 전기·전자 및 정보공학부 교수. 2004년~현재 원광대학교 전기융합기술 연구센터장.
 Tel : 063-850-6349, Fax : 063-857-6890
 E-mail : parkdh@wonkwang.ac.kr