

Properties and Classification of Patterns of Air Discharges

朴永局* · 李光雨** · 張東旭** · 姜聲華[§] · 鄭廣浩** · 金完洙** · 李用熙** · 林基祚***
 (Young-Guk Park · Kwang-Woo Lee · Dong-Uk Jang · Seong-Hwa Kang · Kwang-Ho Jeong ·
 Wan-Su Kim · Yong-Hee Lee · Kee-Joe Lim)

Abstract - Partial discharges(PD) in air insulated electric power apparatus often lead to deterioration of solid insulation by electron bombardments and electrochemical reaction. The PD caused to reduce the life time of power apparatus and to increase power losses. Thus understanding and classification of PD patterns in air are very important to discern sources of PD. In this paper, PD in air by using statistical methods was investigated. We classified air discharges, corona, surface discharges and cavity discharges by Kohonen network. For classification of PD patterns, we used statistical operators and parameters such as skewness(S+, S-), kurtosis(K+, K-), mean phase(AP+, AP-), cross-correlation factor(CC) and asymmetry derived from the mean pulse-height phase distribution ($H_{q_{max}}(\psi)$), the max pulse-height phase distribution ($H_{q_{max}}(\psi)$), the pulse count phase distribution ($H_n(\psi)$) and the pulse height vs. repetition rate ($H_o(n)$).

Key Words : Partial discharges, Distribution pattern, Classification of patterns

1. 서 론

부분방전은 발생원에 따라 특성이 달라지기 때문에 전력 시스템에서 발생한 부분방전을 측정하여, 부분방전 발생원에 따른 부분방전의 패턴을 분류함으로써, 전력시스템의 결함과 열화를 검출할 수 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다 [1-3]. 또한, 근래에는 부분방전의 특성분석과 패턴분류에 신경회로망을 도입하게 되어 부분방전의 패턴분류 및 방전 발생원의 식별이 상당히 진보하였으며, 현재도 많은 연구가 행해지고 있다[4-6]. 그러나, 부분방전은 외부 노이즈에 민감하고, 전력시스템의 운전환경 즉, 부하전류나 주위온도 등에 민감하기 때문에 현재까지의 연구결과 만으로는 절연시스템의 결함이나, 열화 등을 검출하는 것이 불충분하다[7,8].

따라서 본 연구에서는 인공결합에서 발생한 부분방전을 측정하고 데이터를 통계적으로 처리하여 부분방전 발생원에 따른 부분방전의 특성을 고찰하고, Kohonen network를 이용하여 부분방전의 패턴을 분류하였다.

부분방전은 동일한 실험조건에서도 그 패턴이 상당히 변화하며, 이 경향은 특히 짧은 시간동안에 발생한 부분방전 데이터에서 크게 나타나므로 본 연구에서는 300 cycle 동안

발생된 부분방전을 측정하여 통계적으로 처리하였다. 부분방전의 패턴분류에는 부분방전의 3차원 패턴인 위상(ψ)-크기(q)-빈도수(n) 분포의 데이터 자체를 사용하는 방법[8,9]과, ψ - q - n 분포로부터 펄스의 발생 위상각에 따른 펄스의 평균 크기 분포 ($H_{q_{max}}(\psi)$), 위상각에 따른 펄스의 최대 크기 분포 ($H_{q_{max}}(\psi)$), 위상각에 따른 펄스의 발생 빈도수 분포 ($H_n(\psi)$), 펄스의 크기-발생 빈도수 ($H_o(n)$)와 같은 여러 가지 분포패턴을 도출하여 이들의 특성량으로부터 부분방전의 패턴을 인식하여 분류하는 방법이 있다[7,8].

ψ - q - n 데이터는 부분방전 펄스의 종합적이고 복잡한 특성을 나타내지만, 패턴분류를 위해서는 상당히 방대한 데이터를 처리하여야 하는 단점과 데이터의 복잡성으로 인하여 방전원에 따라서는 패턴분류가 되지 않는 경우가 발생하는 한계점이 있다. 따라서 본 논문에서는 ψ - q - n 분포로부터 특성화된 여러 가지 분포패턴을 추출하여 이들의 통계적 파라미터를 사용하여 패턴을 분류하였다.

패턴분류에 사용한 통계적 파라미터는 분포의 왜도(skewness, S+, S-), 첨예도(kurtosis, K+, K-), 평균 위상각(AP+, AP-)과 분포의 비대칭도(asymmetry), 상관계수(cross-correlation factor) 등이다[3,8].

2. 실 험

2.1 전극형태

본 실험에서는 절연시스템에서 발생할 수 있는 전형적인 방전발생원과 유사하도록 전극의 형태를 고려하였으며, 실험에 사용된 전극형태를 그림 1에 나타내었다.

* 準 會 員 : 忠 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 準 會 員 : 忠 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

*** 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 工 學 部 教 授 · 工 博

[§] 正 會 員 : 忠 清 大 學 產 業 安 全 科 助 教 授 · 工 博

接受日字 : 1999年 8月 26日

最終完了 : 1999年 12月 9日

그림 1(a)는 불평등 전계의 가장 대표적인 일레인 침-평판 전극이며, 침전극은 아킹 테스트용 전극을 사용하였고, 전극간 거리는 4 cm로 하였다. 그림 1(b)는 고분자 절연재료의 표면에서 발생하는 연면방전 실험용 전극시스템으로 고분자 절연재료는 저밀도 폴리에틸렌을 사용하였으며, 두께는 4 mm이다. 그림 1(c)는 공극방전 실험용 전극으로 고전위 전극을 침전극으로 사용하였으며, 접지측 전극은 평판전극에 저밀도 폴리에틸렌을 부착시켰다. 저밀도 폴리에틸렌의 두께는 2 mm, 저밀도 폴리에틸렌과 침전극간의 간격은 1 mm로 하였다.

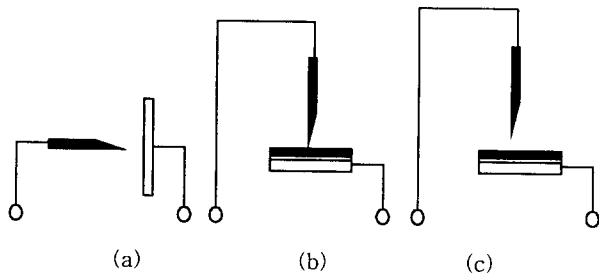


그림 1 전극형태

(a) 코로나방전, (b) 연면방전, (c) 공극방전

Fig. 1 Electrode Structures

(a) Corona discharges, (b) Surface discharges
(c) Cavity discharges

2.2 실험방법

방전의 형태에 따라 부분방전의 개시전압이 다르고, 인가전압에 따라서 부분방전의 방전전하량이나 발생빈도수가 변화하므로 각각의 방전형태에 따른 부분방전 개시전압을 기준으로 하여 부분방전 개시전압의 1.3배의 전압을 인가하여 부분방전의 특성을 검토하였다. 또한 부분방전은 전압인가 시간에 의해서도 변화하는 양이므로, 부분방전의 안정화시간으로 20분간 유지시킨 후, 5분 간격으로 데이터를 측정하였다.

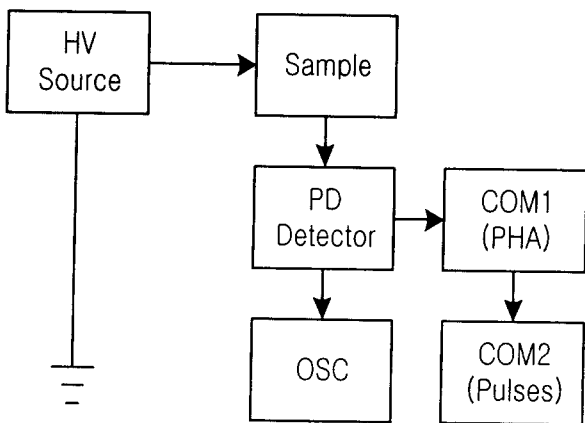


그림 2 실험장치의 블록도

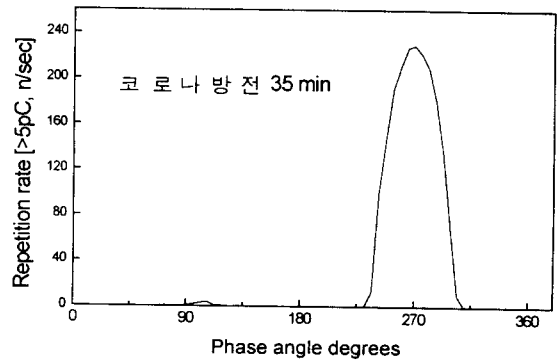
Fig. 2 Block diagram of experimental system

그림 2는 본 실험에 사용된 실험장치 블록도이다. 부분방전 펄스는 부분방전 검출기에서 계측하여 컴퓨터에서 모니터링되며, 부분방전 펄스를 필터를 거쳐 저장하여 IEC 270 규격에 따라 최대 방전전하량[pC], 발생위상각 및 발생 빈도수[n/s] 등으로 연산하여 부분방전 신호의 특성을 검토하였으며, 부분방전 펄스의 분포를 연산하고 이들로부터 통계적 연산자를 도출하였다. 동시에 부분방전 계측기의 신호는 오실로스코프에서 모니터링하여, 실시간 부분방전 펄스의 특성을 검토하였다.

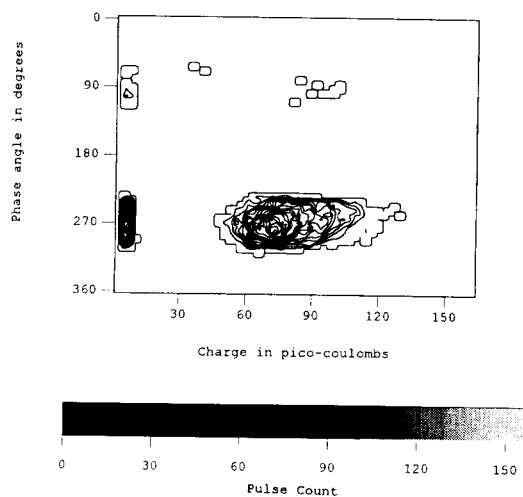
3. 실험 결과 및 고찰

기중에서 발생하는 부분방전을 발생원 별로 구별하여 특성을 분석하기 위해서, 각각의 방전원에서 발생하는 방전 펄스를 300 cycle 동안 측정하여 통계적으로 처리하여 방전 특성을 검토하였다.

그림 3은 기중의 침-평판 전극에서 발생한 코로나방전의 ψ -n 분포 및 ψ -q-n 분포특성의 일례를 나타낸 것이다.



(a) ψ -n 분포



(b) ψ -q-n 분포

그림 3 코로나방전의 ψ -n 및 ψ -q-n 분포

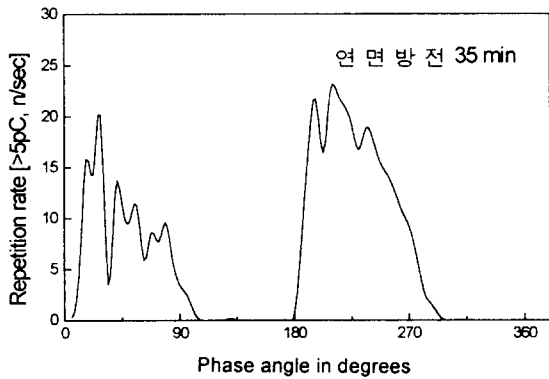
Fig. 3 ψ -n and ψ -q-n distributions of corona discharges

코로나방전의 형성은 주로 전자사태의 형성과 진전에 의하여 이루어지기 때문에 방전의 형태는 전극의 형태나 전극간 거리 등에 따라 변화하며, 따라서 방전전하량의 크기 및 발생 빈도수는 인가전압이나 전극의 형태 및 전극간 거리에 따라 달라진다. 그러나 일반적으로 코로나 방전은 초당 수천개의 방전이 발생하며, 방전전하량이 상대적으로 작게 나타난다. 또한, 방전펄스가 평판전극에 대한 침전극의 인가전압의 양의 주기 피크와 음의 주기 피크치 부근에서 주로 발생하며, 양의 주기에서는 방전의 크기가 불규칙하게 나타나지만, 음의 주기의 경우에는 크기가 비교적 비슷한 안정적인 방전이 다수 발생한다.

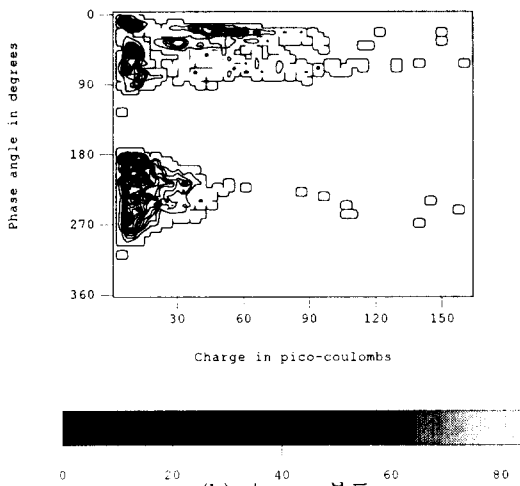
코로나방전의 평균 발생 위상각은 양의 주기에서는 약 $60 \sim 115^\circ$, 음의 주기에서는 약 $230 \sim 310^\circ$, 최대 방전전하량은 양의 주기에서는 약 105 pC , 음의 주기에서는 약 130 pC 로 나타났다.

그림 4는 연면방전의 ψ -n 분포 및 ψ -q-n 분포의 일례를 나타낸 것이다. 연면방전도 인가전압의 크기, 전극의 형태 및 전극간 거리에 따라서 방전의 형태가 달라지지만, 연면방전이 발생하는 절연재료의 특성에도 민감하게 변화한다.

본 실험에는 절연재료로써 저밀도 폴리에틸렌을 사용하여



(a) ψ -n 분포



(b) ψ -q-n 분포

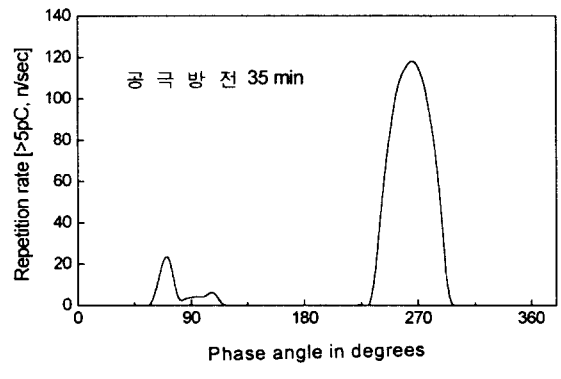
그림 4 연면방전의 ψ -n 및 ψ -q-n 분포
Fig. 4 ψ -n and ψ -q-n distribution of surface discharges

부분방전 특성을 검토한 결과 연면방전은 일반적으로 코로나방전보다 방전전하량이 상당히 크며, 방전전하량 크기 분포 또한, 상당히 넓게 분포하며, 연면방전의 발생위상각 분포의 폭도 코로나방전이나 공극방전에 비하여 넓게 분포한다. 그러나 방전의 발생 빈도수는 코로나방전이나 공극방전에 비하여 상당히 작게 나타난다.

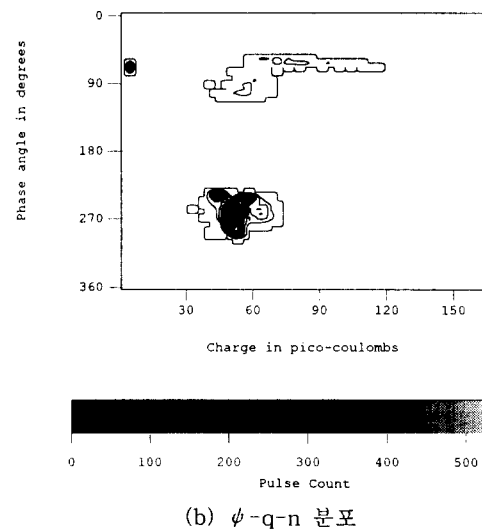
연면방전의 평균 발생 위상각은 양의주기에 $10 \sim 105^\circ$ 사이에 분포하며, 음의 주기에서는 위상에 약 $175 \sim 310^\circ$ 사이에 분포하며, 최대 방전전하량은 양의 주기에서 약 165 pC , 음의 주기에서는 약 155 pC 의 방전이 발생하였다.

그림 5는 공극방전의 ψ -n 분포 및 ψ -q-n 분포의 일례를 나타낸 것이다. 공극방전은 공극에 존재하는 기체에서의 코로나방전과 공극을 구성하고 있는 절연재료 표면에서의 연면방전이 혼합된 방전특성을 나타내는 것으로 추정되었다. 최대 방전전하량은 코로나방전과 거의 유사하지만, 연면방전에 비하여 작게 나타나며, 방전의 발생 빈도수는 코로나 방전에 비하여 작고, 연면방전에 비하여 크게 나타난다.

공극방전의 평균 방전위상각은 양의주기에 $50 \sim 125^\circ$ 사이에 분포하며, 음의 주기에서는 약 $125 \sim 305^\circ$ 사이의 위상각에 분포하며, 최대 방전전하량은 양의주기에서 약 125 pC ,



(a) ψ -n 분포



(b) ψ -q-n 분포

그림 5 공극방전의 ψ -n 및 ψ -q-n 분포
Fig. 5 ψ -q and ψ -q-n distribution of cavity discharges

음의 주기에서는 약 80 pC의 방전이 발생하였다.

코로나방전, 연면방전, 공극방전의 형태를 비교 검토한 결과 각각의 방전에 따라서 방전전하량 및 방전 발생빈도수와 방전 발생 위상각이 상당히 다르므로 각각의 방전특성을 고려하면, 방전의 패턴을 분류할 수 있으며, 방전의 발생원을 식별할 수 있다.

특히, $H_{q_{max}}(\psi)$ 분포의 ψ -q-n 분포는 부분방전의 발생에 대한 많은 정보를 가지고 있기 때문에 부분방전의 패턴분류의 입력으로 사용되기도 한다. 그러나 부분방전의 최대 방전전하량, 발생빈도수, ψ -n 분포 및 ψ -q-n 분포 자체는 인가전압의 크기 및 전극의 형태에 따른 실험조건에 따라 민감하게 변화하는 양이기 때문에 실험조건이나 부분방전이 발생하는 주위조건이 심각하게 변화하면 일반적인 패턴분류가 정확하게 이루어질 수 없다.

따라서 부분방전의 특성을 분석하고 패턴분류를 행하려면 ψ -q 분포, ψ -n 분포, q-n 분포 등 가능한 모든 정보를 고려하여야 하며, 방전의 주위조건 등에 그다지 민감하지 않은 양들을 패턴분류의 파라미터로 사용하여야 한다.

본 연구에서 패턴분류에 사용한 입력 파라미터는 실험조건 등에 대하여 비교적 민감하지 않은 분포 특성량들을 사용하였으며, 이들을 도출하기 위한 수식은 식 (1)~(6)이며, 이들은 $H_{q_{max}}(\psi)$ 분포로부터 분포 특성량을 도출하기 위한 식으로써 다른 분포들도 이들 식과 크게 다르지 않다.

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{j=1}^n \phi_j \cdot a_j}{\sum_{j=1}^n a_j} \quad (1)$$

$$q_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} q_{ji} \quad (2)$$

$$S_{\phi} = \frac{\sum_{j=1}^n (\phi_j - \bar{\phi})^3 a_j}{\left(\sum_{j=1}^n a_j \right) \cdot \sigma_{\phi}^3} \quad (3)$$

$$K_{\phi} = \frac{\sum_{j=1}^n (\phi_j - \bar{\phi})^4 a_j}{\left(\sum_{j=1}^n a_j \right) \cdot \sigma_{\phi}^4} \quad (4)$$

$$asy = \frac{\sum Q_{ja} / \sum n_{ja}}{\sum Q_{jb} / \sum n_{jb}} \quad (5)$$

$$cc = \frac{\sum(Q_{ja} \cdot Q_{jb}) - \sum Q_{ja} \cdot \sum Q_{jb}}{(\sum(Q_{ja} \cdot Q_{jb}) - \sum Q_{ja}^2) \cdot (\sum(Q_{ja} \cdot Q_{jb}) - \sum Q_{jb}^2)} \quad (6)$$

부분방전의 분포들로부터 도출한 분포파라미터 들은 규격화를 시켜 사용하였으며, 표 1은 부분방전의 방전원별 패턴분류에 사용한 입력 파라미터의 일례로서 코로나방전의 특성파라미터이다.

그림 6은 각각의 방전에 대한 분포파라미터를 입력으로 하여 Kohonen network로 패턴분류한 결과를 mapping한 것이다.

입력된 부분방전은 코로나방전 35개, 연면방전 35개, 공극방전 35의 패턴을 사용하였다. 그림에서 코로나방전은 1-35번, 연면방전은 36-70번, 공극방전은 71-105번으로 각각의 부분방전 원으로써 시편 1개에서 발생한 부분방전의 패턴을 뜻한다.

코로나 방전은 좌상단, 연면방전은 우하단, 공극방전은 좌하단에 mapping되었으며, 패턴분류가 비교적 명확하게 되었다.

표 1 코로나방전의 분포 파라미터

Table 1 Parameters of distribution on corona discharges

	분포			
	$H_q(n)$	$H_{q_{max}}(\psi)$	$H_n(\psi)$	$H_{q_{max}}(\psi)$
skewness, S+	-0.0482	-0.0001	-0.0978	0.0000
skewness, S-		0.0008	0.0506	0.0004
kurtosis, K+	0.0182	0.0000	0.0982	0.0000
kurtosis, K-		0.0002	0.0895	0.0001
asymmetry		0.2635		0.3001
cc		0.0626		0.0795
phase, AP+		0.1141	0.1201	0.1161
phase, AP-		0.0993	0.1018	0.0994

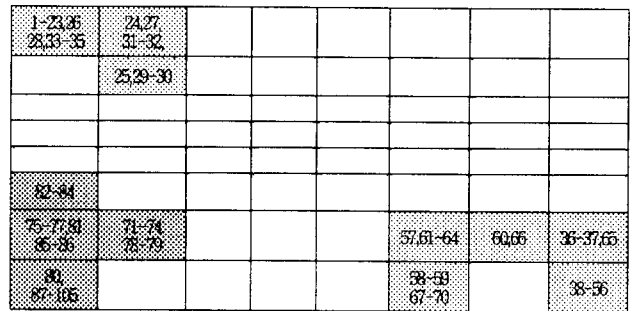


그림 6 Kohonen network에 의한 방전의 패턴분류

Fig. 6 Classification of discharge patterns by Kohonen network

4. 결 론

본 연구에서는 기중에서 발생하는 부분방전을 코로나방전, 연면방전, 공극방전으로 분류하여 부분방전 특성을 검토하고, Kohonen network으로 패턴분류하여, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기중방전은 다른 방전형태에 비하여 방전전하량이 작은 펄스가 상당히 많이 발생하며, 발생빈도수는 초당 수천개 이상 발생하였다. 방전이 가장 활발한 방전위상각은 인가전압의 양의 주기에서 60~115°, 음의 주기에서는 230~320°로 나타난다.
- 2) 연면방전의 발생빈도수는 기중방전에 비하여 상당히 작게 나타났으나 방전전하량은 상당히 크게 나타나고, 방전의 발생 위상각은 인가전압의 양의 주기에 10~105°, 음의 주기에 175~310°로 나타났다.
- 3) 공극방전은 방전전하량의 크기와 발생빈도수가 코로나방전과 연면방전의 중간으로 나타났으며, 방전위상각은 양의 주기에는 50~125°, 음의 주기에는 225~305°로 나타났다.
- 4) 각각의 부분방전을 Kohonen network로 패턴분류한 결과 각각의 부분방전에서 계측한 모든 데이터가 비교적 양호하게 패턴분류 되었으며 다양한 결합에 대한 연구가 더 진행되어야 하겠지만, 전력계통이나 전기기기에서 발생한 미지의 부분방전을 계측하여 패턴분류하면 결합이나 열화 등의 부분방전의 발생원을 식별할 수 있을 것으로 사료된다.

감 사 의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력 공학 공동연구소 주관으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호 : 97-중-06)

참 고 문 헌

- [1] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Temple Press, 1989.
- [2] P. V. Glahn and R. J. V. Brunt, "Continuous Recording and Stochastic Analysis of PD", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 590-601, 1995.
- [3] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided Recognition of Discharge Sources", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, pp. 82-92, 1992.
- [4] T. Hücker and H. G. Kranz, "Requirements of Automated PD Diagnosis Systems for Fault Identification in Noisy Condition", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 544-556, 1995.
- [5] G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. Mcdermid, "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Rotating Machines", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 567-577, 1995.
- [6] E. M. Lalitha and L. Satish, "Fractal Image Compression for Classification of PD Sources", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 5, No. 4, pp. 550-557, 1998.
- [7] C. Cachin and H. J. Wiesmann, "PD Recognition with Knowledge-based Preprocessing and Neural Networks", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 578-589, 1995.
- [8] H. G. Kranz, "Diagnosis of Partial Discharge Signals using Neural Networks and Minimum Distance Classification", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, pp. 1016-1024, 1992.
- [9] L. Satish and W. S. Zaengl, "Can Fractal Features be Used for Recognizing 3-d Partial Discharge Patterns?" IEEE, Trans., EI, Vol. 2 No. 3, pp. 352-359, 1995

저 자 소 개



박 영 국(朴 永 局)

1970년 9월 19일 생. 1996년 충북대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 0431-261-2424

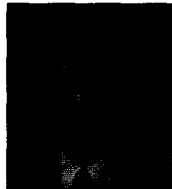
E-mail : ygpark@engine.chungbuk.ac.kr



정 광 호(鄭 廣 浩)

1948년 4월 21일 생. 1996년 한국방송통신대학 경영학과 졸업. 1999년 충북대 산업대학원 졸업(석사). 67~현재 한국전력공사 충북지사 제천지점 배전부장

Tel : 0443-644-0154



이 광 우(李 光 雨)

1972년 4월 16일 생. 1998년 충주대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 충북대 대학원 전기공학과 석사과정, 한국전력 충북지사 영동지점 근무중

Tel : 0431-261-2424

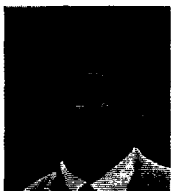


김 완 수(金 完 洙)

1972년 12월 27일 생. 1998년 충북대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 0431-261-2424,

E-mail : kingdum@hotmail.com



장 동 옥(張 東 旭)

1976년 1월 10일 생. 1998년 충북대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 0431-261-2424

E-mail : dujang@engine.chungbuk.ac.kr



이 용 희(李 用 熙)

1973년 5월 13일 생. 1999년 충북대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 0431-261-2424

E-mail : freeman_lee@engine.chungbuk.ac.kr



강 성 화(姜 聲 華)

1963년 2월 22일 생. 1987년 충북대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년-93년 생산기술연구원(KAITECH) 연구원. 1998.1- 99.1 미국 MIT 고전압연구실

Visiting Scientist, 1993년~현재 충청대학 산업안전과 조교수

Tel : 0431-230-2343

E-mail : shkang@ieec.org



임 기 조(林 基 祚)

1973년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1980년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 3월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1977년 2월 국방과학연구소. 1981년 3월~현재 충북대학교 공대 전기전자공학부 교수. 주관심분야 : 유전/

철연재료 및 초음파모터, 플라즈마 디스플레이

Tel : 0431-261-2424, Fax : 0431-261-2424

E-mail : kjlim@trut.chungbuk.ac.kr