

데이터 취득 시스템을 이용한 전력케이블의 부분방전 검출과 통계량 계산

Partial Discharge Detection and Statistic Value Calculation of Power Cable Using Data Acquisition System

조 경 순*
(Kyung-Soon Cho)

요 약

최근 들어 우리나라에서는 설치의 간편성과 높은 신뢰도를 가진 전력케이블의 사용이 증가하고 있다. 전력 케이블은 출고 전에 IEEE std. 404-1993 시험을 거쳐 안정성을 확인하고 있지만 포설시 발생하는 접속부 내부의 결함으로 인하여 많은 문제가 발생하고 있다. 특히 불순물 혼입 또는 공극 발생시 고장율은 증가하게 된다. 부분방전 검출은 포설 후 전력케이블의 상태를 관측할 수 있는 유용한 방법이다. 본 연구에서는 부분방전 특성을 평가하고자 케이블 접속재인 EPR과 케이블 절연체인 XPLE 사이에 인공 결함을 발생시킨 후 데이터 취득 시스템을 이용하여 Φ -q-n 특성을 검출하였으며, 부분방전의 정량적 해석을 위해 필요한 통계량인 최대방전전하량(q_{max}), 평균방전 발생 펄스 수(\bar{n}), 평균 방전전하량(\bar{q}), \bar{n} 의 언밸런스 비와 \bar{q} 의 언밸런스 비를 계산하였다.

ABSTRACTS

Recently power cable used generally in Korea, because installation is very simple and it has high stability. It confirms to the requirements of IEEE std. 404-1993 by factory testing, but many problems of insulated cable systems are caused by internal defects of the joint part which have to be mounted onsite. Especially, fault rates are arise from impurities or voids. A suitable solution for a monitoring of power cable during the after-laying test and service is partial discharge detection. The artificial defects between cable joint(EPR) and insulator(XLPE) interface are considered in this research to investigating the partial discharge characteristics. Φ -q-n properties were detected using data acquisition system and Maximum charge(q_{max}), repetition rate(\bar{n}), average charge(\bar{q}), Unbalance rate of \bar{n} and \bar{q} are calculated in order to analysis partial discharge properties quantitatively from this statistic value.

* 정회원 : 서일대학 컴퓨터 응용시스템 전공 전임강사

논문접수 : 2002. 10. 14.

심사완료 : 2002. 12. 24.

1. 서론

절연체 내부에 결함이 존재할 경우 인가전압의 매 주기마다 부분방전이 발생하게 되며, 방전 펄스에 의해 국부적인 열화와 함께 절연체의 성능을 저하시켜 수명을 단축시키게 된다. 지중케이블은 사고가 발생했을 경우 고장구간 검출과 복구에 시간이 걸리며 사회경제적으로 커다란 영향을 미친다. 이와 같은 이유로 전력케이블에 있어서 부분방전시험은 전수검사 항목으로 규정되어져 출하되는 제품이 부분방전을 유발하는 결함이 없다는 것을 시험을 통해 검증되도록 되어있다. 그러나 전력케이블의 사고유형은 제품 제조시 발생하는 결함요소에 의한 것뿐 아니라 포설 및 운전 중에 발생하는 결함에 의한 경우도 있다. 이중 제품요인은 내전압시험과 동시에 실시하는 부분방전 시험으로 검증되어 출하되지만, 포설과 운전 중에 추가적으로 발생하는 결함에 대해서는 그 관리 방법이 표준화 되어있지 않다. 이 경우 현장에서 접속작업 종료 후 절연성능 검증의 방법으로서 부분방전측정은 결함검출과 신뢰성평가를 통한 절연진단법으로 유효한 수단이 된다.

최근에 세계적으로 초고압시스템에 대한 준공시험시 지속적인 부분방전 시험으로 운전 초기의 열 거동 및 계면에 도포한 오일의 건조에 의해서 일어날 수 있는 새로운 결함요인을 검증하려는 노력이 계속되고 있다. 특히 접속함 계면에 대한 포설직후, 장단기적인 결함요소의 발생에 대한 집중적인 연구가 CIGRE Joint Task Force 15/21에서 진행되어 결함의 종류를 구별하고 장기적인 운전 중에 추가적으로 발생할 수 있는 결함요인을 구분하고 있다.

이에 의하면 케이블 포설시 접속부에서 발생하는 결함은 금속이물, 반도전 이물, 공극잔존, 수분 침투, 조립치수 오차 등이 있으며, 운전 중에는 고무부품의 계면 압력 저하, 오일의 건조, 접속부위 변형, 열팽창 계수의 차이 등에 의한 결함 등이 발생하게 된다. 전력용 케이블의 절연진단에서는 부분방전의 발생을 검출하는 기술과 검출된 부분방전의 패턴으로 열화판정을 하는 것이 중요하다.

열화판정시 종래는 최대 방전전하량, 방전발생빈도라는 간단한 통계량만에 의존한 판정을 시행해 왔으나 부분방전은 매우 짧은 간격으로 대량발생하기 때문에, 그 통계적인 성질을 해석하기 위해서는 막

대한 데이터를 필요로 한다. 최근 컴퓨터를 이용한 데이터 처리기술을 부분방전 측정에 적용함에 따라 부분방전신호의 고속처리가 가능하게 되었다. 그 결과 측정시간 내에 발생한 전체 펄스에 관해서 임의의 통계량을 산출할 수 있게 되었으며 보다 정확한 부분방전의 발생 및 열화의 판정이 가능하게 되었으나 국내에서는 적용이 미미한 실정이다.

본 연구에서는 케이블의 접속시 발생할 수 있는 결함과 운전 초기에 발생할 수 있는 결함을 모델링한 후 인위적인 결함을 발생시키고 고전압을 인가한 후 부분방전 검출을 위해 구현한 데이터 취득 시스템을 이용하여 전력케이블 부분방전의 검출과 통계량을 산출하여 결함의 종류에 따른 부분방전 특성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 측정 방법

[그림 1]에 실험장치의 블록 다이어그램을 나타내었다. 전원에서 인가된 교류전압은 슬라이더스를 거쳐 변압기의 1차측에 입력된다. 2차측 출력전압은 저항($R_k=5M\Omega$)을 통해서 콘덴서 C_k 와 전극에 인가되어 부분방전을 발생시킨다. 부분방전을 RC검출회로, 하이패스필터, 앰프를 통해 데이터 취득 시스템에 입력된다. 한편 부분방전의 위상정보를 얻기 위해 슬라이더스의 2차측에서 제로크로스신호를 빼내 데이터 취득 시스템에 입력하였다.

이 두 가지 신호가 컴퓨터에 입력됨에 따라 Φ -q-n 특성(Φ :위상, q:전하량, n:발생빈도) 등의 각종 통계량을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 펄스 폭이 수ns에 불과한 부분방전 파형을 컴퓨터계측시스템으로 입력 가능하게 하기 위해 펄스의 폭을 약 $1\mu s$ 로 펄스를 정형할 필요가 있었다. 따라서 펄스정형을 하고, 부분방전 전하량만을 입력하기 위해 RC병렬인 검출임피던스를 이용하였다. 또한 부분방전 신호를 검출할 때 검출임피던스만을 이용하면 전원 60Hz의 주파수 성분의 신호가 중첩되므로 하이패스필터를 이용하여 60Hz의 주파수성분을 제거하였다. 부분방전신호 펄스는 매우 작으므로 증폭기를 사용하여 수~수십mV의 방전신호를 150mV~5V의 범위로 증폭하였다. 이 신호는 A/D변환기에 의해 $\pm 5V$ 사이에서 12비트(4096분할)의 디지털 신호인 AMP(Amplitude of PD

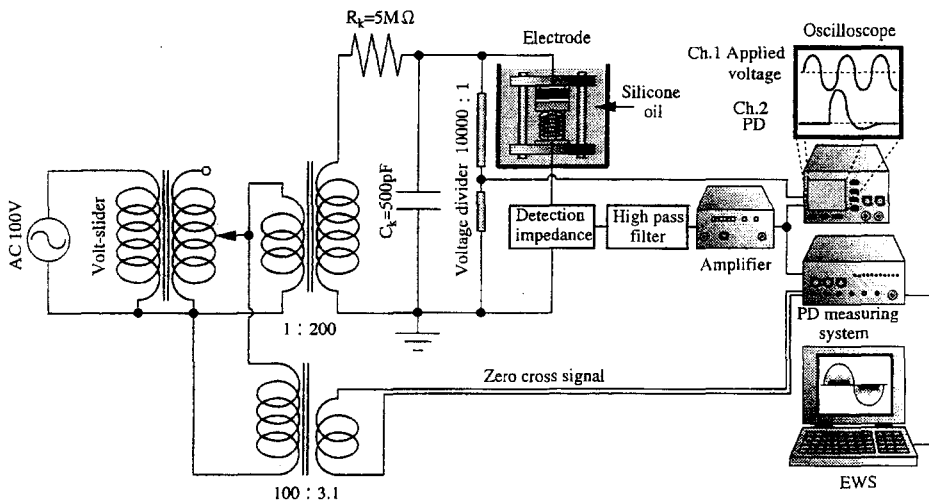
pulse)로 변화된다.

또한 슬라이더의 2차측으로부터 출력된 제로크로스신호는 제로크로스 검출회로에서 이 교류신호가 부전압에서 정전압으로 변화할 때 $1\mu s$ 의 방형파 펄스를 발생시킨다. 이 펄스를 counter 회로에 입력함에 따라 측정개시부터 사이클을 계산하는데, 이것을 방전펄스가 발생한 사이클 데이터 ZCC(Zero Cross Count:16bit)신호라고 한다. 또한 분주회로에 의해 1 사이클을 4096분할하여 부분방전펄스가 발생한 위상 데이터 PHA(Phase of PD pulse:12bit)신호를 발생시킨다. 이상과 같이 데이터 취득 시스템에 부분방전 신호와 측정 제어용의 제로크로스신호를 입력하면 세 개의 디지털 신호인 ZCC, AMP, 및 PHA신호로 변환되고, EWS (Engineering workstation)에서 동작 명령이 오면 버퍼 내에 기억된 데이터부터 순서대로 GPIB보드를 통해서 EWS의 주기억장치에 보낸 후에 하드디스크에 보존된다. 위상 정보와 부분방전 전하량 데이터는 Visual Basic으로 구현한 GUI(Graphic User Interface) 환경에서 Φ -q-n특성과 각종 통계량을 출력하게 된다.

본 연구에서는 전력케이블 접속부의 EPR과 XLPE 계면사이의 결합에 의해 발생하는 부분방전을 모델링하였다. 실험 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 XLPE시료는 전력케이블의 절연층을 1mm로 슬라이

스 하여 사용하였으며, EPR시료는 접속재 생산라인에서 1mm 두께로 프레스한 것을 사용하였다. 결합에 의한 부분방전특성을 확인하기 위하여 EPR과 XLPE 사이의 중앙부분에 인공 결합을 만들었으며, 일반적으로 케이블 내부에 존재하는 결합들은 절연체와 비교하여 아주 작은 크기의 것들이 존재하지만 본 연구에서는 이러한 결합들이 전기적 특성에 영향을 주는 경향을 분석할 목적이므로 결합의 크기를 가능한 크게 하였다.

전극은 EPR과 XLPE 시트를 겹쳐 스프링(바넷정수:25mm/80kg)에 의해 일정한 면압을 주는 구조로 되어있다. 이때 압력은 $1kg/cm^2$ 과 $2kg/cm^2$ 으로 하여 실험하였는데 이는 조립형 직선접속의 경우 케이블의 직경에 따른 접속재의 내경만이 규정되어있기 때문에 계면의 정확한 압력을 알 수는 없지만 테이프조인트식으로 직선접속을 할 경우 실제케이블 접합부의 면압이 $2kg/cm^2$ 인 것과 사용에 따라 압력이 감소하는 것을 고려한 것이다. 또한 고전압을 인가하면 모델전극의 다른 부분에서 방전이 발생할 가능성이 있으므로 모델전극전체를 100cs의 실리컨유 안에 담가 실험하였다. 실험은 부분방전이 개시하기까지 전압을 상승시킨 후 600사이클동안의 방전 펄스를 측정하였으며, 1^{kv}_{rms} 씩 상승시키며 30^{kv}_{rms} 까지 반복하였다.



[그림 1] 실험회로

[Fig. 1] Experimental Circuit

3. 방전전하량의 교정과 Φ -q-n 검출

방전이 발생하고 있는 장소에서 정확한 방전전하량을 측정하는 것은 불가능하기 때문에 시편 중에서 부분방전의 발생이 예상되는 단자간에 교정회로를 접속하고, 이미 알려진 전하량을 주입하여 교정을 하여야한다.

시편전체의 캐패시턴스 C_a 라 한다. 여기서 시편 (C_a)중의 미소공극(C_b)이 방전하여, C_a 로부터 Q_a 의 전하를 잃어버렸다고 하면 C_a 의 양전극간에는 $\frac{Q_a}{C_a}$ 의 전압강하가 발생한다.

여기서 C_b 를 $C_b \ll C_a$ 로 하면 Q_a 는

$$Q_a = \frac{C_b C_m}{C_b + C_m} E_0 \cong C_b E_0 \text{로 되므로 전극간 전압}$$

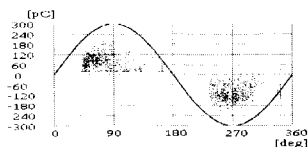
강하는 $\frac{Q_a}{C_a} = \frac{C_b E_0}{C_a}$ 로 나타낸다.

다음으로 파고 값 E의 직각과 전압을 C_0 (단 $C_0 \ll C_a$)라는 정전용량을 통해서 C_a 의 양단으로 인가할 때의 교정전하는 $Q_a = \frac{C_0 C_a}{C_0 + C_a} E \cong C_0 E$ 로 되므로 전극사이에 가해진 전압은 다음과 같이 된다.

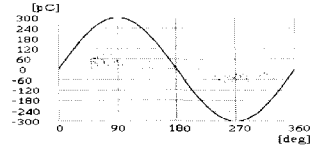
$$\frac{Q_a}{C_a} = \frac{C_0 E}{C_a}$$

따라서 C_0 라는 캐피시턴스를 통해서 E라는 직각 전압을 시편에 인가함으로써 인해 $C_0 E = Q_a$ 쿨롱의 표준전하를 C_a 에 주입한 것이 된다. 이 때 출력된 전압의 크기로 교정곡선을 그려, 전하교정계수(pC/V)를 구하고 실제 방전 파고치에 의해 방전전하량으로 변환한다. 컴퓨터 계측 시스템에서는 전하교정계수를 입력함으로써 자동적으로 방전전하량으로 변환하였다.

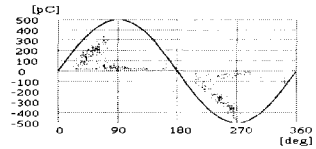
[그림 2], [그림 3], [그림 4]에 각종 결함에 의한 부분방전의 Φ -q-n 특성을 나타내었다.



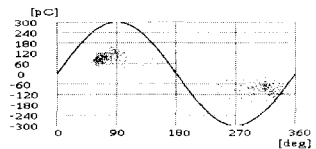
(a) 1kg/cm², 10kVrms



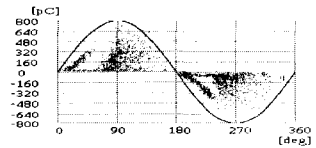
(b) 20kg/cm², 12kVrms



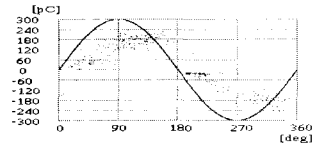
(c) 1kg/cm², 15kVrms



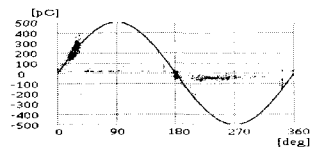
(d) 2kg/cm², 15kVrms



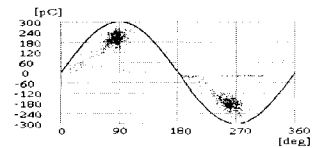
(e) 1kg/cm², 20kVrms



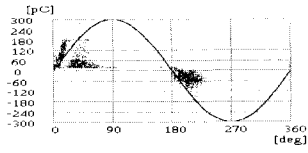
(f) 2kg/cm², 20kVrms



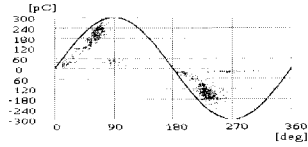
(g) 1kg/cm², 25kVrms



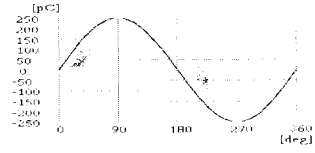
(h) 2kg/cm², 25kVrms



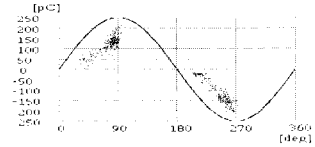
(i) 1kg/cm^2 , 30kVrms



(j) 2kg/cm^2 , 30kVrms

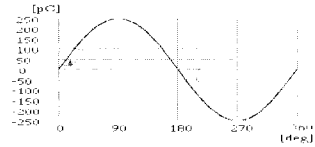


(e) 1kg/cm^2 , 20kVrms

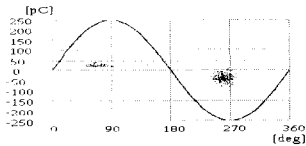


(f) 2kg/cm^2 , 20kVrms

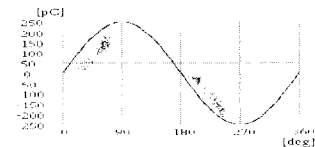
[그림 2] 보이드에 의한 부분방전의 Φ -q-n 특성
 [Fig. 2] Φ -q-n characteristics of partial discharge
 with void



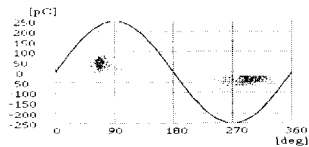
(g) 1kg/cm^2 , 25kVrms



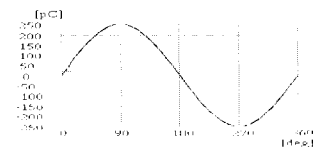
(a) 1kg/cm^2 , 10kVrms



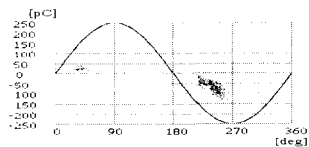
(h) 2kg/cm^2 , 25kVrms



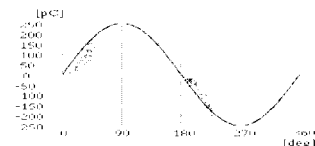
(b) 2kg/cm^2 , 10kVrms



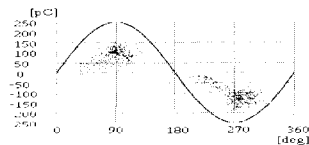
(i) 1kg/cm^2 , 30kVrms



(c) 1kg/cm^2 , 15kVrms

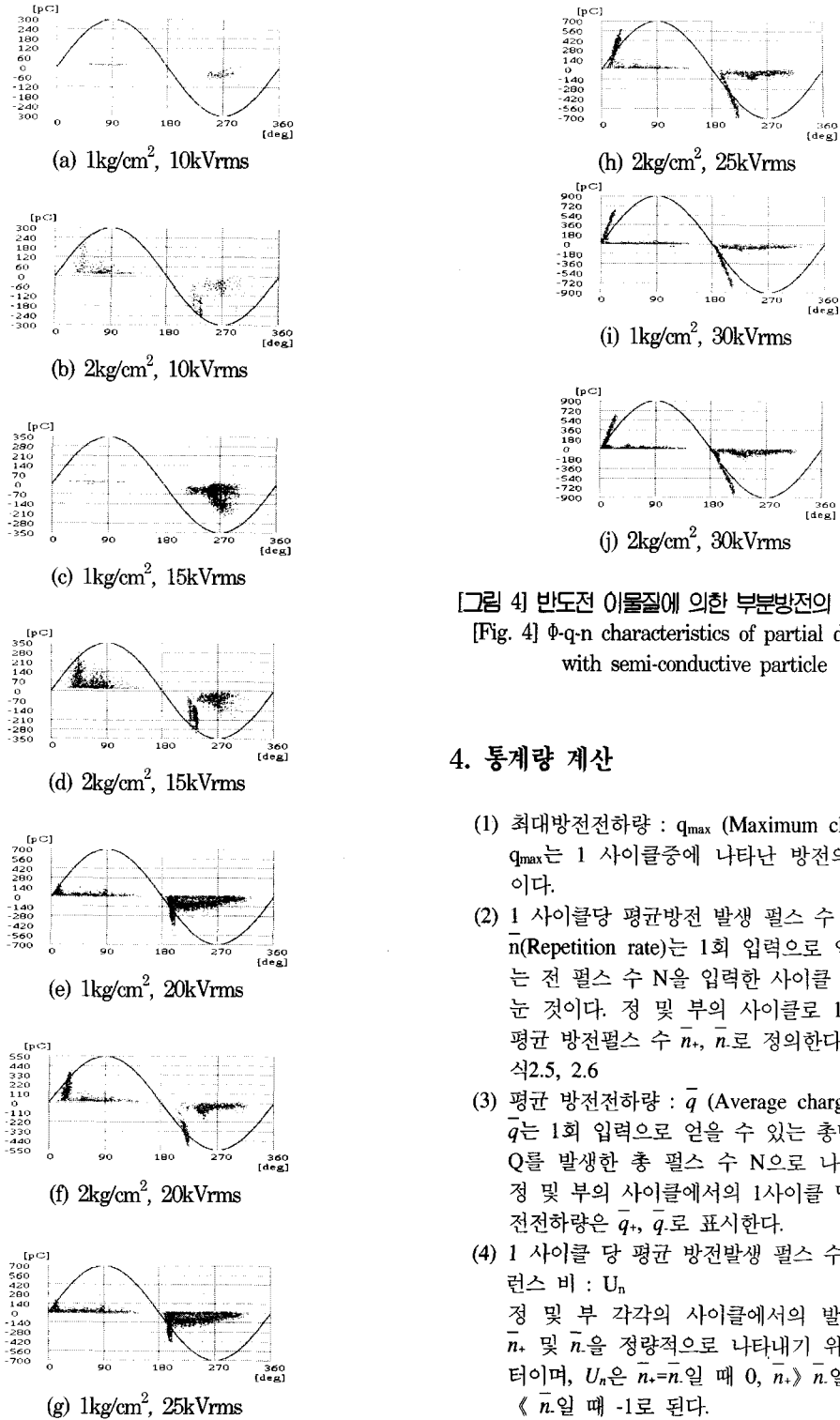


(j) 2kg/cm^2 , 30kVrms



(d) 2kg/cm^2 , 15kVrms

[그림 3] 구리 이물질에 의한 부분방전의 Φ -q-n 특성
 [Fig. 3] Φ -q-n characteristics of partial discharge
 with copper particle



[그림 4] 반도체 이물질에 의한 부분방전의 Φ -q-n 특성
 [Fig. 4] Φ -q-n characteristics of partial discharge with semi-conductive particle

4. 통계량 계산

- (1) 최대방전전하량 : q_{\max} (Maximum charge)
 q_{\max} 는 1 사이클중에 나타난 방전의 최대 값이다.
- (2) 1 사이클당 평균방전 발생 펄스 수 : \bar{n} (Repetition rate)는 1회 입력으로 얻을 수 있는 전 펄스 수 N 을 입력한 사이클 수 c_1 로 나눈 것이다. 정 및 부의 사이클로 1사이클 당 평균 방전펄스 수 \bar{n}_+ , \bar{n}_- 로 정의한다.
 식2.5, 2.6
- (3) 평균 방전전하량 : \bar{q} (Average charge)
 \bar{q} 는 1회 입력으로 얻을 수 있는 총방전전하량 Q 를 발생한 총 펄스 수 N 으로 나눈 것이다. 정 및 부의 사이클에서의 1사이클 당 평균 방전전하량은 \bar{q}_+ , \bar{q}_- 로 표시한다.
- (4) 1 사이클 당 평균 방전발생 펄스 수 \bar{n} 의 언밸런스 비 : U_n
 정 및 부 각각의 사이클에서의 발생펄스 수 \bar{n}_+ 및 \bar{n}_- 을 정량적으로 나타내기 위한 파라미터이며, U_n 은 $\bar{n}_+ = \bar{n}_-$ 일 때 0, $\bar{n}_+ \gg \bar{n}_-$ 일 때 1, $\bar{n}_+ \ll \bar{n}_-$ 일 때 -1로 된다.

(5) 평균방전전하량 \bar{q} 의 언밸런스 비 : U_q

정 및 부 각각의 사이클에서 발생펄스의 평균 방전전하량 \bar{q}_+ 및 \bar{q}_- 을 정량적으로 나타내기 위한 파라미터이다.

<표 1>, <표 2>, <표 3>에 각종 결함에 의한 부분방전의 통계량을 나타내었다.

<표 1> 보이드에 의한 부분방전 통계량(2.0kg/cm²)
 <Table 1> Statistic Value Calculation with void(2.0kg/cm²)

	10kV	15kV	20kV	25kV	30kV
q_{max+}	68.181	47.202	132.616	98.151	41.958
q_{max-}	-92.906	-145.353	-89.16	-63.686	-29.97
q_+	23.306	2.647	35.143	13.362	21.652
q_-	-37.573	-18.516	-38.322	-8.754	-1.729
n_+	0.454	1.682	0.439	0.421	0.116
n_-	0.496	2.325	0.159	0.064	0.022
U_q	-0.234	-0.75	-0.043	0.208	1.174
U_n	-0.044	-0.161	0.469	0.738	0.683

<표 2> 구리 이물질에 의한 부분방전 통계량(2.0kg/cm²)
 <Table 2> Statistic Value Calculation with copper particle(2.0kg/cm²)

	10kV	15kV	20kV	25kV	30kV
q_{max+}	91.254	121.253	25.184	56.471	31.249
q_{max-}	-61.716	-174.147	-35.144	-57.241	-34.215
q_+	34.145	15.47	61.154	48.534	62.14
q_-	-14.721	-17.141	-86.149	-23.426	-113.142
n_+	0.512	2.147	0.419	0.526	0.184
n_-	0.614	3.157	0.248	0.251	0.109
U_q	-0.218	-0.816	-0.327	0.237	0.746
U_n	-0.109	-0.54	0.340	0.351	0.247

<표 3> 반도체 이물질에 의한 부분방전 통계량(2.0kg/cm²)
 <Table 3> Statistic Value Calculation with semi-conductive particle(2.0kg/cm²)

	10kV	15kV	20kV	25kV	30kV
q_{max+}	32.711	681.607	207.249	61.127	18.157
q_{max-}	-32.148	-1297.157	-201.26	-51.179	-24.157
q_+	32.58	214.57	56.471	12.549	53.172
q_-	-29.146	-121.15	-24.571	-36.128	-35.172
n_+	0.621	0.931	0.284	0.318	0.312
n_-	0.427	0.628	0.314	0.209	0.218
U_q	-0.317	-0.513	-0.182	0.306	0.214
U_n	-0.212	-0.271	0.273	0.315	0.217

5. 결론

현대사회에 있어 전력수요는 증가 일로를 걷고 있다. 이에 따라 보수가 용이하고 방재성능이 우수한 전력케이블이 배전에서 초고압에 이르기까지 널리 이용되고 있다. 그러나 케이블 내부 및 접합부에 결함이나 이물이 존재하면 부분방전이 발생하여 절연파괴에 이른다. 절연파괴가 발생하면 전력의 공급이 중단되며 사회생활에 중대한 영향을 미친다. 이 때문에 케이블에 있어 보전기술 향상이 요청되고 있다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서는 높은 정확도 절연진단법의 개발을 최종목적으로서 전력케이블의 접합부를 모의한 전극을 이용하여 부분방전특성을 실험하였으며 컴퓨터계측 시스템을 이용하여 통계량을 산출하고 검토하였다.

그 결과 결함의 종류에 따라 부분방전 ϕ -q-n 패턴 및 통계량이 다르다는 것을 알았다. 현재 시험 규격 중 부분방전과 관련된 규격에서는 시험전압과 허용되는 부분방전량만 규정되어 있고, 부분방전 발생량에 근거한 케이블의 절연파괴의 상관관계는 정립되지 않기 때문에 어느 수준이 치명적이고 또한 어떤 수준이 하는 안전하다고 단정지을 수 없다. 그러나 데이터 취득 시스템을 이용하여 신뢰성이 높은 부분방전 ϕ -q-n 검출 및 통계량 산출은 전력케이블의 패턴 해석과 수명 예측 연구를 위해 유용한 것으로 사료된다. 향후 각종 결함에 대한 펄스의 전류 파형 측정을 시도하고 절연파괴까지 부분방전특성의 시간특성을 측정하여 검토함으로써 전력케이블의 부분방전 메커니즘을 분명히 함과 동시에 정밀도가 높은 결함 위치, 종류 및 절연열화진단기법의 개발을 기대할 수 있다.

※ References

[1] F.H.Kreuger, Partial Discharge Dection in HV Equipment, Butterworths, London, 1989
 [2] R.J.Van Brunt, "Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona", IEEE Trans. DEIS, Vol 11, No.5. 1994
 [3] G.C.Crichton, P.W.Karisson and A.Pedersen, "Partial Discharges in Ellipsoidal and Spheroidal Vo-

ds", IEEE Trans. EI, Vol24, No.2. 1989

[4] F.H.Kreuger et al, "Classification of Partial Discharges", IEEE Trans. EI, Vol28, No.6. 1993
 [5] N.Hozumi, T.Okamoto and T.Imajo, "Discrimination of Partial Discharge Patterns Using Neural Networks", IEEE Trans. EI, Vol27, pp.550-556, 1992
 [6] E.Gulski, F.H.Kreuger, "Computer-aided Measurement of Partial Discharge in HV Equipment", IEEE Trans. EI, Vol28, No.6. 1993
 [7] Hans-Gerd Kranz, "Diagnosis of Partial Discharge Signals using Neural Networks and Distance Classification", IEEE Trans. EI, Vol28, No.6. 1993
 [8] Peter Morshuis, Partial Discharge Mechnism, Delft University Press, 1993
 [9] N. Hozumi et al, "Discrimination of Partial Discharge patterns", IEEE Trans. EI, Vol27, No.3. 1992
 [10] M.I.Qureshi, W.G.Chadband, "On the Relation between Current Pulses and Discharges", IEEE Trans. EI, Vol23, No.4. 1988

조 경 순



1991 광운대학교 공과대학 전기공학과 (공학사)
 1993 광운대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
 1998 광운대학교 대학원 전기공학과 (박사과정수료)
 1998~현재 :서일대학 컴퓨터응용시스템전공 전임강사
 관심분야 : 컴퓨터인터페이스, 열화진단 및 수명예측