

차폐분리에 의한 전력케이블 및 접속함의 부분방전 위치 검출

論 文
49C-3-8

PD Localization by Metal Sheath Interruption Methods for Power Cable and Accessories

李昌榮* · 辛頭星* · 金忠植** · 金東郁*** · 朴完基***

(Chang-Young Lee · Doo-Sung Shin · Choong-Sik Kim · Dong-Wook Kim · Wan-Ki Park)

Abstract - It is very important not only to detect PD signal but also to locate PD source in power cable line including its accessories.

In this paper, the PD localization technique using interruption of metal sheath of cable or accessory is described. By interruption of metal sheath, the polarity of PD pulse to be measured on each part can be compared. With this technique, the exact location of PD in the accessory which has some defects can be found. Although the 'Soft' interruption method, that is, cable sheath is divided by semi-conductive layer with the resistance of higher than $1\text{ k}\Omega$, was used instead of 'Hard' interruption method, it is also possible to detect exact location of PD. This technique is considered to be very effective for detecting PD localization in the type test of cable and accessories.

Key Words : Partial Discharge, EHV Cable, Accessory, Sheath interruption, Localization

1. 서 론

대용량 송전을 위한 XLPE 절연 지중 전력케이블의 개발 방향은 점차 Compact화, 초고압화 되어가는 추세이며, 이와 더불어 전력케이블용 접속함 또한 현장에서 직접 절연체를 가교시켜 접속하는 TMJ(Tape moulded Joint) 방식에서 시공성이 우수하고 품질관리가 용이한 조립형 접속함인 PJB(Pre-fabricated Joint)나 고무일체형 접속함인 PMJ(Pre-moulded Joint)방식으로 개발이 되어지고 있다. 이러한 케이블 및 접속함은 보다 우수한 품질이 요구되기 때문에, 제품의 성능 및 사용수명에 대한 충분한 평가를 위하여 IEC 등의 국제 시험 사양에 따라 각종 내전압 시험 및 장기 과통전 시험을 실시하고, 또한 케이블의 제조과정이나 접속함의 조립 중에 발생할 수 있는 여러가지의 결함을 검출하기 위해 부분방전 시험을 하게 된다.

각종 내전압 시험이나 장기 과통전 시험이 제품의 설계에 대한 타당성을 검증하기 위한 시험이라면, 부분방전 시험은 제품의 품질을 향상시키기 위한 시험으로써, 부분방전의 크기 뿐 아니라 정확한 발생 위치, 그리고 그 결함의 원인을 확인하기 위해서 반드시 필요하다고 할 수 있다. 그러나 케이블 및 접속함에 대한 부분방전 시험을 할 경우 전압을 인가하기 위해 시험용 단말이 추가적으로 설치되며, 특히 전력

케이블과 접속함에 대한 개발 시험 사양인 IEC 840에 따라서 전기적 평가를 할 경우, 중간 접속함 뿐 아니라 기중 중단 및 가스중 중단 접속함 등 다수의 접속함이 케이블과 함께 조립된 상태로 시험되는 경우가 많다. 이러한 선로에 있어서 부분방전이 발생할 경우, 부분방전이 발생하는 정확한 위치를 찾는 것은 더욱 어렵게 된다. [1,4]

전력케이블 선로의 잘 알려진 부분방전 위치 검출 방법으로는, 케이블을 따라 진행하는 부분방전 신호를 두 지점에서 측정하여 그 시간차를 구해 위치를 계산하는 방법과 초음파 센서를 부착하는 방법 등이 있다. 하지만 시간차 이용 측정법은 신호의 감쇄 특성으로 인해 두 신호의 비교에 어려움이 있으며, 초음파 센서에 의한 방식은 100pC 이하의 낮은 방전 크기일 경우 위치검출이 불가능한 면이 있다. [2,3]

따라서 이와 같이 다수의 접속함이 포함된 선로에서의 부분방전 위치를 보다 간단하고 정확하게 검출하기 위한 방법으로서, 본 논문에서는 전력 케이블과 같이 하나의 피시품에 대해 차폐를 전기적으로 분리할 수 있는 점을 이용하여 각 구간에서 측정되는 부분방전 신호의 극성 비교에 의한 위치 검출 기법을 활용하였다. 또한 방전 신호의 극성 비교를 위한 차폐분리 조건을 확인하고, 결함이 있는 접속함이 포함된 모의 시험선로를 구성하여 여러 가지 방법으로 차폐 분리한 후 극성 비교 시험을 실시하였다.

2. 극성 비교에 의한 부분방전 검출 원리

일반적으로 잘 알려진 전기적 부분방전의 측정 방법은 결합 콘덴서 측에 검출 임피던스를 설치하거나 또는 시료측에 검출 임피던스를 설치하여 시료와 결합 콘덴서를 통해

* 正 會 員 : LG電線(株) 電力研究所 主任研究員

** 正 會 員 : LG電線(株) 電力研究所 先任研究員

*** 正 會 員 : LG電線(株) 電力研究所 責任研究員

接受日字 : 1999年 7月 30日

最終完了 : 2000年 2月 25日

호르는 부분방전 전류 펄스를 측정하는 것으로, 이때 검출 임피던스의 설치 위치에 따라 측정되는 전류 펄스의 극성이 다르게 나타난다. [2,5]

전력케이블의 금속차폐층을 전기적으로 분리한 후, 각 구간에 대해 동일한 측정임피던스(Z_1, Z_2)를 설치하면 그림 1과 같이 증가화 할 수 있다. 이 때 두 구간 중 어느 한쪽에서 부분방전이 발생하면 다른 한쪽은 결합 콘덴서의 역할을 하게 된다. 만약 분리된 각 구간의 케이블 커패시턴스가 같다면, 각 측정 임피던스에서 측정되는 부분방전은 동일한 크기를 가지며 극성은 서로 반대로 되게 된다. 또한 각 구간의 커패시턴스가 다르면 각 임피던스에 검출되는 방전신호의 크기도 다르고 신호의 극성은 역시 반대가 된다. 이러한 극성 비교를 이용한 위치 검출법은 분리되는 구간을 짧게 할수록 발생위치의 정확도를 크게 할 수 있다.

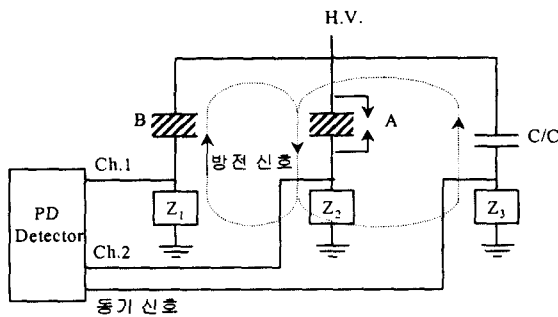


그림 1 차폐분리에 의한 부분방전 측정 회로
Fig. 1 Circuit diagram by Sheath Interruption

3. 차폐의 전기적인 분리 방법

접속함이 포함된 케이블 선로에 대한 차폐의 전기적인 분리방법은 크게 'Hard' 분리방식과 'Soft' 분리방식이 있다. 'Hard' 분리방식은 그림 2 (a)와 같이 분리되는 차폐 구간 사이에 절연층만 존재하여 두 구간사이의 저항이 무한대로서 분리되는 방식이며, 이 방식에 의한 분리는 주로 절연접속함의 절연통을 사이에 두고 양 구간으로 분리할 경우에 해당된다.

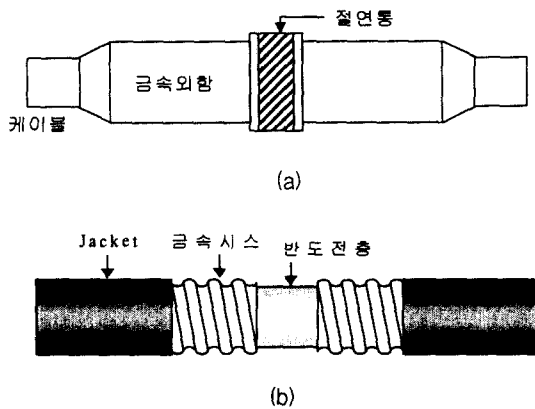


그림 2 차폐 분리 방식 (a) 'Hard' 분리 (b) 'Soft' 분리
Fig. 2 Typical Sheath interruption Methods
(a) 'Hard' interruption (b) 'Soft' interruption

한편, 'Soft' 분리방식은 그림 2 (b)와 같이 전력케이블에 있어서 금속 시스층을 제거하더라도 케이블 외부 반도체층이 여전히 존재하여 두 구간 사이에는 어느 정도의 저항값을 가지고 분리되는 것을 말한다.

'Soft' 분리방식에 있어서 외부 반도체층은 상용주파전압에 대해서는 금속 시스와 같이 차폐로서 작용하지만, 분리된 구간사이의 반도체층이 어느 정도의 저항값을 가지게 되면 부분방전과 같은 고주파 신호에 대해서는 높은 임피던스로 작용하기 때문에 극성 비교를 위한 차폐 분리가 가능하게 된다. 시험선로에 대해 이러한 두가지의 차폐분리 방식을 적절히 적용함으로써 원하는 측정 구간으로 분리할 수 있다. [2]

4. 모의 시험선로의 구성 및 실험 방법

본 실험을 위하여 구성된 선로는 154 kV 급으로 다수의 접속함이 있는 시험선로를 모의하기 위해, 약 5m의 케이블을 사이에 두고 그림 3과 같이 CV 케이블용 조립형 접속함(PJB)과 가스중 종단 접속함(EB-G)을 조립하였다. 또한 조립형 접속함 쪽의 케이블 한 편에는 시험전압의 인가를 위해 과전용 단말을 조립하였다. 시험 선로에 대해서 'Hard' 방식의 차폐분리가 가능하도록 하기 위하여 조립형 접속함은 절연통이 포함된 절연접속함으로 하였으며 그 구조는 그림 4와 같다.

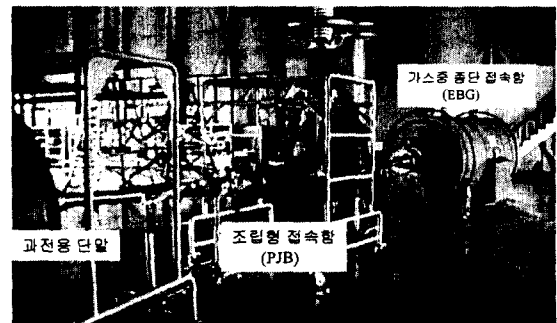


그림 3 모의 시험 선로의 구성
Fig. 3 The experimental setup of cable and joints

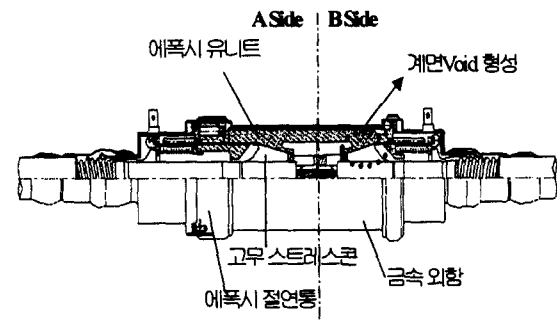


그림 4 조립형 절연 접속함(PJB)의 구조
Fig. 4 Schematic structure of Pre-fabricated Joint (PJB)

이상과 같이 준비된 시험 선로의 건전성을 평가하기 위하여 IEC840 사양에 따른 초기 부분방전을 측정된 결과, 규정 인가전압 131kV에서 부분방전이 발생하지 않음을 확인하였다.

본 연구에서 건전성이 확인된 시험 선로에 부분방전을 발생시키기 위해 조립형 접속함의 B측 스트레스콘과 에폭시 애관 계면의 밀착력을 변화시켜 계면에서의 보이드를 형성시켰다. 이러한 인공 결함을 생성시킨 시험 선로에 대하여 다시 부분방전을 측정된 결과, 87kV의 인가전압에서 약 500~600pC의 부분방전이 발생됨을 확인하였다.

절연접속함의 절연통에 의한 'Hard' 분리방식과 더불어, 케이블 반도체층에 의한 'Soft' 분리방식을 적용하기 위해, 'Soft' 분리방식이 가능한 반도체층의 최소 저항값을 설정할 필요가 있다. 이를 위해 시험 선로와 동일한 케이블에 그림 5와 같은 측정 회로를 구성하고 저항값의 변화에 따른 캘리브레이션 신호의 극성을 조사하였다.

전체 시험 선로에서 검출되는 방전 신호의 극성을 확인하기 위해 결함 콘덴서에서 검출되는 신호와 극성을 비교하였고 또한 각 구간별로 차폐를 분리하여 검출되는 신호의 극성을 비교하였다.

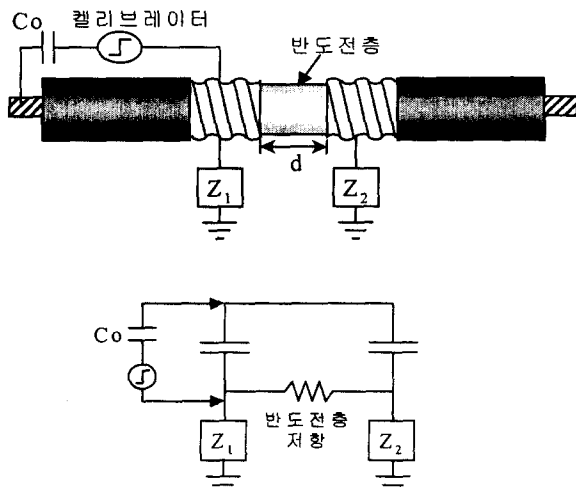
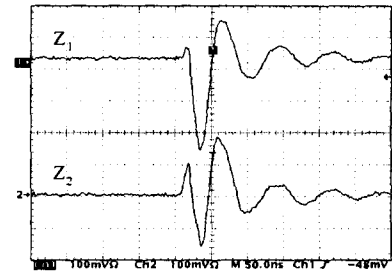


그림 5 'Soft'분리의 저항 변화에 따른 극성 변화 시험 회로
Fig. 5 Circuit diagram for polarity investigation as resistance in 'Soft' interruption

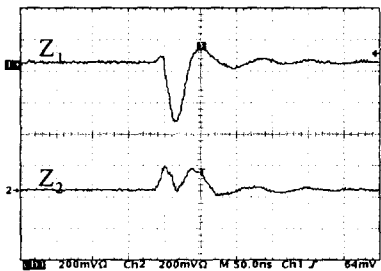
5. 실험 결과 및 고찰

그림 6은 'Soft' 분리구간 사이의 반도체층 저항값의 변화에 따라서 각 임피던스에서 검출된 신호를 나타내고 있다. 분리된 구간 사이의 반도체층 저항값은 제거되는 케이블 금속차폐의 거리 d를 조정하여 변화를 주었고, 5pC의 캘리브레이션 신호를 주입하여 측정하였다. 실험결과, 약 300Ω 이하의 저항값에서는 동일한 극성의 신호가 측정되었으며 이것은 'Soft' 분리 방식으로 할 경우 300Ω 이하의 저항값에서는 분리가 되지 않음을 알 수 있었다. 그러나 저항값을 증가시키면 그림 6의 (b)에서와 같이 Z₂로부터 검출되는 신호

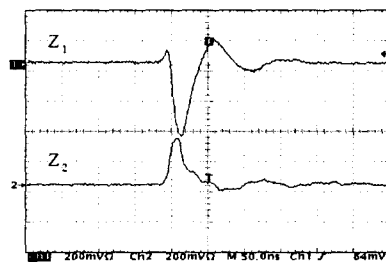
의 극성이 반전되기 시작하고 약 1kΩ의 저항에서 두 신호의 반전이 뚜렷이 측정되었다. 이 결과로서 'Soft'분리 방식의 차폐분리를 위해서는 반도체층 저항값이 최소 1kΩ 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

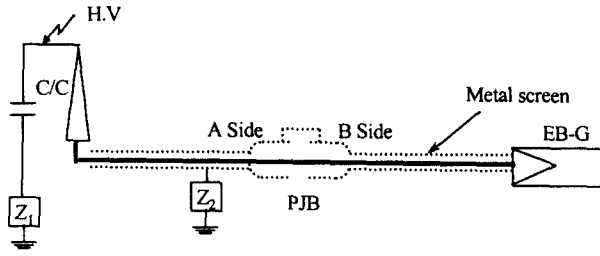
그림 6 'Soft'분리의 저항변화에 따른 검출 신호의 극성
(a) 300Ω미만 (b) 300~1kΩ (c) 1kΩ이상

Fig. 6 Polarity of each channel as resistance in 'Soft' interruption (a) less than 300Ω (b) 300~1kΩ (c) more than 1kΩ

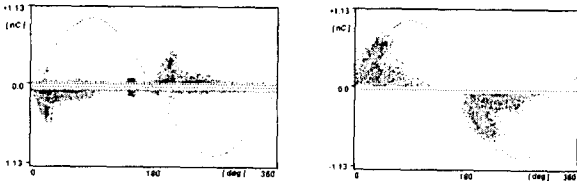
부분방전이 발생하는 구간에서 측정되는 신호의 극성을 확인하기 위하여, 그림 7(a)와 같이 선로 전체를 하나의 구간으로 하여 측정 임피던스(Z₂)를 설치하고 결함콘덴서에 설치된 측정 임피던스(Z₁)를 통해 검출되는 신호와의 극성을 비교하였다.

시험 결과, Z₁로 부터 측정된 신호는 그림 7(b)와 같이 인가전압에 대해 부극성이고, Z₂로부터 측정된 신호는 그림 7(c)와 같이 정극성으로서 서로 반대의 극성을 갖는 신호가 측정되었으며, 부분방전이 발생하는 구간에 설치된 측정 임

피던스에서 정극성의 방전신호가 나타남을 확인하였다.



(a)



(b)

(c)

그림 7 선로 전체에 대한 부분방전 신호의 극성

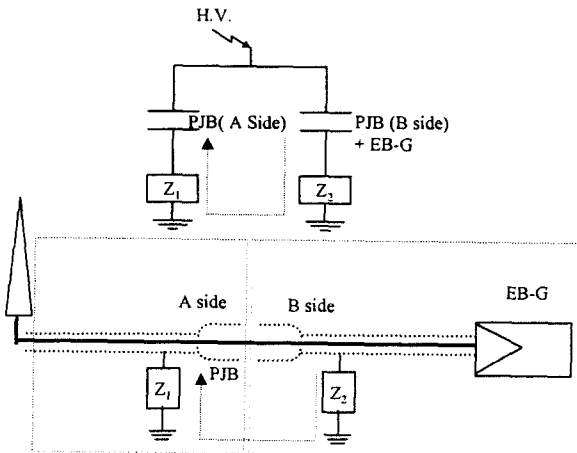
(a) 결선 (b) Z_1 : 부극성 (c) Z_2 : 정극성

Fig. 7 Polarity of PD signal to the whole object

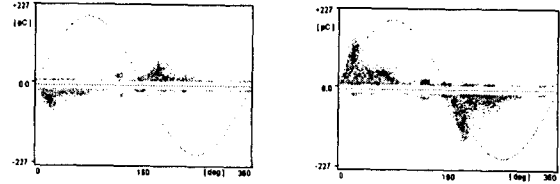
(a) Test configuration (b) Z_1 : Negative polarity

(c) Z_2 : Positive polarity

모의 시험 선로를 'Hard' 방식으로 차폐분리를 했을 경우, 측정되는 방전의 극성을 확인하기 위하여, 그림 8(a)와 같이 PJB의 절연통을 기준으로 두 구간으로 분리를 하였다. 이 때 분리되는 구간은 PJB의 A Side와 인가단말, PJB의 B Side와 EB-G로 되며, 각 구간의 측정임피던스에서 검출되는 신호의 극성은 PJB A side와 인가단말 구간의 Z_1 에서는 부극성, PJB B side와 EB-G구간의 Z_2 에서는 정극성으로 측정되었다. 이것은 전체 선로에 대한 방전극성의 확인 시험과 동일한 결과로서, 부분방전이 발생하는 구간에서 측정되는 신호의 극성이 정극성으로 나타남을 확인 할 수 있었다



(a)



(b)

(c)

그림 8 'Hard' 분리에 의한 부분방전 신호의 극성 비교

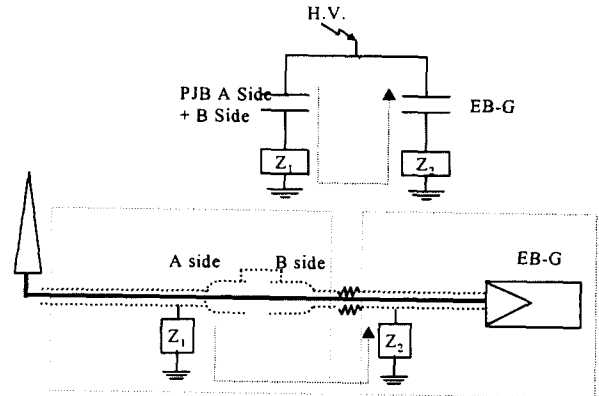
(a) 결선 및 등가회로 (b) Z_1 : 부극성 (c) Z_2 : 정극성

Fig. 8 Polarity of PD signal by 'Hard' interruption

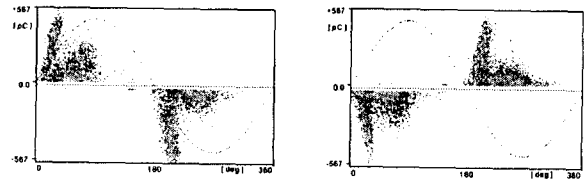
(a) Test configuration and equivalent circuit

(b) Z_1 : Negative polarity (c) Z_2 : Positive polarity

그림 9는 'Soft' 분리 방식에 의해 차폐 분리를 하였을 경우 각 구간에서 검출된 방전신호를 비교한 것이다. 그림 9(a)에서와 같이 PJB의 우측 케이블의 금속차폐를 일부 제거하여 PJB A side - B side 와 EB-G 구간으로 분리하였다. 분리된 구간 사이의 케이블 반도체층의 저항은 약 1.5 kΩ으로 하였다. 측정 결과 방전의 극성은 그림 9(b), 9(c)에 나타난 것처럼 Z_1 에서는 정극성, Z_2 에서는 부극성으로서 PJB A side + B side구간이 부분방전이 발생하는 구간임을 알 수 있었으며 'Soft' 분리방식에 의해서도 부분방전의 극성 비교가 가능함을 확인하였다.



(a)



(b)

(c)

그림 9 'Soft' 분리에 의한 부분방전 신호의 극성 비교

(a) 결선 및 등가회로 (b) Z_1 : 부극성 (c) Z_2 : 정극성

Fig. 9 Polarity of PD signal by 'Soft' interruption

(a) Test configuration and equivalent circuit

(b) Z_1 : Positive polarity (c) Z_2 : Negative polarity

위의 두 실험을 통해 알 수 있듯이, 시험선로에 부분방전이 발생할 경우 선로 전 구간에 대하여 측정된 신호의 극성과 결합 콘덴서로부터 측정된 신호의 극성을 확인한 후, 시험선로를 'Hard' 방식이나 'Soft' 방식으로 차폐 분리를 하여 각 구간의 방전 극성을 비교함으로써 부분방전이 발생하는 위치를 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

그림 10은 'Hard' 및 'Soft' 방식에 의해서 시험 선로를 세 구간으로 차폐를 분리하여 각 구간에서 측정되는 방전의 극성을 비교한 것이다. 부분방전이 발생하지 않는 PJB A side와 EB-G 측의 방전극성은 부극성을 나타내고 있고, PJB B side에서 측정된 방전 극성은 정극성으로서 'Hard' 및 'Soft' 분리방식을 동시에 적용할 경우에도 부분방전이 발생하는 구간과 발생하지 않은 구간과의 극성이 서로 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

이 실험에서 알 수 있듯이 시험선로를 세 구간 이상으로 분리한 후, 각 구간에서 측정되는 신호의 극성을 비교하여 극성이 나머지 구간과 반대로 측정되는 구간을 확인함으로써 부분방전의 위치 검출이 가능하다고 사료된다.

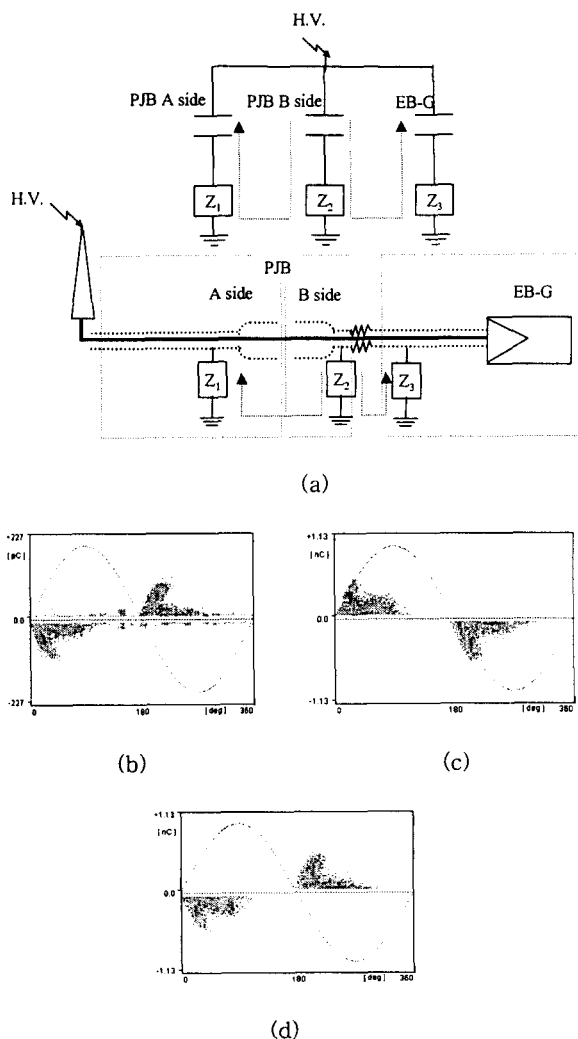


그림 10 "Hard" 및 "Soft" 방식에 의한 세구간 차폐 분리
(a) 결선 및 등가회로 (b) Z_1 : 부극성
(c) Z_2 : 정극성 (d) Z_3 : 부극성

Fig. 10 Three parts of sheath separation by 'Hard' and 'Soft' interruption
(a) Test configuration and equivalent circuit
(b) Z_1 : Negative polarity
(c) Z_2 : Positive polarity
(c) Z_3 : Negative polarity

이상과 같은 실험의 결과, 차폐분리에 의한 구간별 신호 극성을 비교함으로써 부분방전의 발생위치의 검출이 가능하였으며, 특히 IEC 840에 따른 전기적 평가에 있어서 PJB, EB-G 및 기중중단접속함인 EB-A 등의 다수의 접속함 포함된 시험선로에 대해 실시한 결과에서도 부분방전의 위치를 정확히 검출할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 다수의 접속함이 조립된 선로에 있어서 부분방전의 발생 위치를 정확히 검출하기 위한 방법으로써, 시험선로의 차폐분리에 의한 방전 극성 비교법을 비교하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 부분방전이 발생할 경우 시험 선로 전체에 대해 측정된 방전 극성을 확인하고 시험선로의 각 구간별로 측정된 방전 극성과 비교하여 동일한 극성을 가지는 구간이 부분방전의 발생 지점임을 확인하였다.
- 2) 시험 선로를 여러 구간으로 분리하여 극성이 다르게 측정된 구간을 찾는 방법에 의해서도 위치 추정이 가능하였다.
- 3) 'Soft' 분리 방식에 의한 차폐분리를 할 경우, 반도체층의 저항이 최소 $1k\Omega$ 이상에서 방전의 극성판별이 가능하였으며, 전력케이블에 발생하는 부분방전의 위치 검출에도 적용이 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] IEC Pub.60840, Tests for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30kV($U_m=36kV$) up to 150kV($U_m=170kV$), pp. 41-43, 1999.
- [2] Dr F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworth & Co. Ltd, pp. 105-106, 1989.
- [3] P.H.F. Morshuis, Partial Discharge Mechanism, Delft University Press, pp.121-122, 1993.
- [4] J.C. Chan, "Partial Discharge - Part VIII : PD Testing of Solid Dielectric Cable", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 7, no. 5, pp. 12-14, Sep./Oct., 1991.
- [5] IEC Pub. 270, Partial discharge measurements, pp. 43-44, 1981.

저 자 소 개



이 창 영 (李 昌 榮)

1970년 12월 1일생. 1993년 2월 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 12월 ~ 현재 LG전선(주) 전력연구소 주임연구원
Tel : 0546-469-7626, Fax : 0546-469-7131
E-mail : cylee@cable.lg.co.kr



김 동 욱 (金 東 郁)

1961년 12월 11일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업(학사). 1992년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1999년 3월 일본 오오사카대학 전자공학과 졸업 (공학). 1983년 12월 ~ 현재 LG전선(주) 전력연구소 전력연구실장
Tel : 0546-469-7596, Fax : 0546-469-7131
E-mail : dwkim1@cable.lg.co.kr



신 두 성 (辛 頭 星)

1971년 1월 7일생. 1994년도 2월 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1996년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 박사과정 수료. 1998년 1월 ~ 현재 LG전선(주) 전력연구소 주임연구원
Tel : 0546-469-7623, Fax : 0546-469-7131
E-mail : shindoo@cable.lg.co.kr



박 완 기 (朴 完 基)

1957년 8월 21일생. 1980년 2월 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1989년 2월 Technical Univ. of Aachen 졸업(석사). 1994년 12월 Technical Univ. of Darmstadt 졸업 (공학). 1995년 ~ 현재 LG전선(주) 전력공장장
Tel : 0546-469-7615, Fax : 0546-469-7120
E-mail : wkpark@cable.lg.co.kr



김 충 식 (金 忠 植)

1963년 2월 24일생. 1988년 2월 한양대 전자통신공학과 졸업(학사). 1988년 1월 ~ 2000년 2월 LG전선(주) 전력연구소 선임연구원. 2000년 2월 ~ 현재 일본 나고야 대학 박사과정
E-mail : cskim@cable.lg.co.kr