The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 18, No. 6, pp.181-186, Dec. 31, 2018. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.6.181
JIIBC 2018-6-24

운전 중 고전력 케이블의 절연저항 데이터의 취득과 통계적 처리 방법

Data Acquisition and Statistical Processing of Insulation Resistance for High-Power Cables in Operation

박성희*, 엄기홍**

Sung-Hee Park*, Kee-Hong Um**

요 약 산업화의 추세에 따라 수요가 급증하고 있는 고전력을 생산하기 위하여 시설장비 및 부하의 대용량화가 수반되고 있다. 전기설비의 규모는 점차 복잡해 지고, 대규모화 됨으로써 고도 정보화 사회로의 발전에 크게 기여하고 있다. 그러나, 발전 설비에서 불의의 사고가 발생하여 전기의 생산이 중단된다면, 전기에 의존하여 작동 중인 수 많은 장비가 지장을 받게 되고, 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 초래하게 된다. 사고가 발생한 발전설비를 복구하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되어 국가 산업 활동에 막대한 경제적 피해를 끼치게 된다. 사고를 미연에 방지하기 위하여 케이블의 동작 상태를 정기적으로 감시 확인하여야 한다. 우리는 사고가 가장 빈번하게 발생하는 접속부에 대해 안정적인 사용을 위한 진단의 정확성과 신뢰성을 향상시키기 위한 연구를 하였다. 이 논문에서 데이터 취득을 하고, 통계적 처리를 하기 위한 방법을 제시한다.

Abstract With progress in industrialization, facilities for generating, delivering, and receiving high levels of electric power are in great demand. The scale of electric power equipment is increasing in both size and complexity. This has contributed to the development of our modern, high-tech and information-based society. However, if the generation of electric power is suspended due to unexpected accidents at power facilities or power stations, a range of equipment the operations of which are dependent on electric power can be damaged, causing substantial socioeconomic losses in an industrial society. A great deal of time and money would be expended to repair damaged facilities at a power station, causing enormous economic loss. In order to detect the deterioration processes of power cables, and to prevent the destruction of power cables, the operation status of power cables should be monitored on a regular basis. We studied the method in order to improve accuracy and reliability for diagnosising the junction where accident occurs frequently. We present the method of data acquisition and statistical processing.

Key Words : XLPE, On-Line Cable Monitoring System, Standard deviation, Normal distribution, kurtosis.

Ⅰ. 서 론

최근의 국내 전력수급 비상상황과 더불어 안정적 전력 확보를 위하여 기존 화석연료를 사용하는 화력발전소에 대한 중요성이 더해 가고 있다. 특히, 현재 국민 1인당 전력소모량이 연간 8,092 kWh 수준으로 1980년 대비 9배

*정회원, 원광대학교 ICT 융합 그린에너지 연구원(주저자)
**정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자)
접수일자: 2018년 9월 24일, 수정완료: 2018년 11월 4일
게재확정일자: 2018년 12월 7일

Received: 24 September, 2018 / Revised: 4 November, 2018 / Accepted: 7 December, 2018
*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr
Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

증가하였으며, 예측보다 높은 전력수요로 수급여건이 악화되고 있다[1]. 발전소가 전기를 생산하고 고전압 전력을 공급하기 위하여 유일하게 채택 사용하고 있는 가교 폴리에틸렌 (XLPE, cross linking-polyethylene) 절연 케이블(CV cable 라고도 함)은 국내 여러 곳에서 약 40년 전에 포설되어 지금까지 사용되어 오고 있다. 설치 환경 및 사용 조건에 따라서 다르겠지만, 설치 후 운전 상태에 있는 CV cable 은 6~8년의 기간이 경과하면 정상적인 동작을 저해하는 열화 상태가 나타나기 시작하고, 상태가 더 나쁘게 진행되는 경우, 절연파괴(dielectric breakdown) 현상으로 인한 정전 및 화재 사고가 발생한다는 많은 사례 보고가 있다. 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 시공 불량이나 기타의 열악한 주변 환경으로 인한 악조건 상태에 노출되어 있는 경우, 그 전의 시점에서도 사고가 발생할 수가 있다[2,3].

활선상태 진단을 위한 기존 연구들에서는 절연체에서 발생하는 누설전류와 절연저항을 이용하여 진단을 수행하였다. 그러나 사용 현장에서의 활선상태 진단은 불필요한 신호의 유입이나 노이즈로 인한 정확도를 저하시키는 원인으로 인해 문제점을 안고 있다. 따라서 노이즈를 효과적으로 제거하기 위한 필터의 연구와 그로부터 얻어진 신호를 효과적으로 진단하기 위한 알고리즘과 다양한 측정 센서들에 대한 연구가 진행되어 왔다[4].

본 논문에서는 연구 결과를 이용하여 발전소 현장에서 운용 중인 케이블에 적용하여 데이터를 추출하여 분석하기 방법을 제시한다. 활선 상태 진단에서 효과적인 진단 인자를 누설전류와 절연저항으로 정의하고, 측정시스템으로서 활선케이블 감시시스템 (On-Line Cable Monitoring System) 시스템을 사용하였다[5].

이로부터 추출된 데이터에 대한 신뢰성을 어떤 형태로 해석할 지를 제시한다.

II. 데이터 취득과 통계 처리

유의한 데이터에 대한 통계적인 처리는 데이터의 신뢰성을 향상시켜 줄 수 있다. 케이블 내의 절연저하로 인해 발생되는 누설전류는 지속적이고 꾸준하게 나타나는 것이 아닌 간헐적이거나 때론 그 크기가 매우 불안정하게 나타날 수도 있다. 따라서 누설전류의 크기 만으로 절연 상태를 파악하는 것은 쉽지 않다[6].

이런 경우 통계적인 처리 방법 중 표준편차를 이용하거나 유의한 신호들의 형상에 대한 통계적인 분석법이 유용하게 적용될 수 있다. 본 논문에서는 기본적으로는 신호의 변화가 심한 누설전류에 대해 표준편차를 적용하였다. 하지만 부하와 연결되는 종단 접속재의 경우 측정위치와 신호원간의 원거리로 인한 신호 감쇄로 표준편차 적용으로도 검출이 되지 않았다. 특별히 종단 접속재의 결함 검출을 위해 검출 신호의 파형이 노이즈 신호의 파형과 다름을 인지하고 이로부터 취득된 여러 신호의 첨도를 이용해 진단을 수행하였고 그 결과를 정리하였다. 활선케이블 감시시스템에서 사용한 진단 인자는 직류 누설전류의 80회 평균에 대한 표준편차(standard deviation)와 첨도 (kurtosis)이다[7].

표 1은 표준편차의 통계적 처리 (statistical processing)에 의한 직류 누설전류 측정데이터로 부터 구할 수 있는 진단요소 (diagnostic factors)를 나타낸다.

표 1. 절연저항 측정을 위한 회로 시스템의 구성
Table 1. Diagnostic factors & statistical processing

Diagnostic Factor	DC Signal Voltage	Number of Data in One Measurement	활선케이블 감시시스템 Display
Standard Deviation 1 & Kurtosis 1	None	80	Insulation Resistance / Standard Deviation/ Kurtosis
Standard Deviation 2 & Kurtosis 2	Overlap	80	Insulation Resistance / Standard Deviation/ Kurtosis
Standard Deviation 3 & Kurtosis 3	None	80	Insulation Resistance / Standard Deviation/ Kurtosis

각각의 데이터는 대상 케이블과 접속재를 진단하기 위한 알고리즘의 구성을 위해 매우 중요한 정보이며, 이를 통해 결함이 있는 접속재의 종류를 판별해 낼 수 있다. 진단을 위해서는 이미 설정된 임계값을 기준으로 표준편차와 첨도의 크기와 각 인자간의 조합으로 알고리즘을 구성한다. 이로부터 어떤 접속부에서 결함으로 인한 부분방전이 발생되었는지를 파악하게 되고 진단의 정확도를 향상시킬 수 있다.

III. 표준편차와 첨도

1. 표준편차 (Standard Deviation)

고압 케이블 접속재의 단말 처리 방식의 경우 단말부의 케이블 절연체의 열화 및 결함으로 인한 절연저항(Insulation resistance. IR)이 저하되는 직류 누설전류의 경로가 형성되지 않더라도 부분방전(partial discharge)으로 인한 절연파괴에 이르는 사고가 빈번히 발생되고 있다. 이 경우에는 절연체의 절연저항이 높기 때문에 누설전류(leakage current) 측정장치에서 데이터의 평균값에 의한 절연열화 검증은 곤란하다. 하지만, 부분방전이 발생하면 측정되는 직류 누설전류의 변동이 심해지고 그로 인한 데이터간의 편차(deviation)가 증가되는 경향을 보인다[8]. 이런 현상을 이용해 접속부의 부분방전 열화를 검출해 낼 수 있다. 접속재 내의 절연이 안정하다면 일정시간의 주기 동안 측정된 절연저항과 누설전류의 데이터가 일정 범위안에서 분포를 하겠지만, 절연이 불량하다면 변화폭과 변화 주기가 매우 불안정하게 나타나게 된다. 이는 데이터의 평균으로부터 취득 가능한 통계인 표준편차(standard deviation)가 절연의 상태를 확인하는데 매우 효과적임을 나타낸다. 표준편차가 크다는 것은 측정데이터의 산포가 크다는 것을 의미한다. 그리고 편차 1, 2, 3 의 데이터가 크다는 것은 직류 누설 전류데이터가 단말 및 중간접속부의 결함부분에서 발생하는 부분방전에 의한 변동에 의한 것임을 의미하는 것이다.

2. 첨도

표준편차와 더불어 직류 누설전류의 첨도[尖度, kurtosis] 는 전원측과 부하측 접속부의 검출을 보다 정확하게 하는 데이터를 제공한다. 특히, 첨도의 도입은 부하측 접속부의 부분방전 발생시의 미소 전류를 검출하는데 보다 효과적이다. 발생된 부분방전 미소 신호의 감쇠가 되더라도 측정 신호에 대한 검출과 그로부터 도출된 첨도의 크기를 통해 종단 접속부의 결함과 열화를 진단하는 것이 가능하며, 이것이 본 연구에서 첨도를 적용한 배경이다. 첨도는 부분방전 신호의 변동과 크기에 기인하여 선정된 진단 인자(diagnostic factor)이다. 즉, 말단(terminal) 접속부에서 발생한 신호가 감쇠 되지 않고 일정 크기의 첨도를 유지하려면 직류누설전류의 크기가 상대적으로 크고, 빠르게 전파되어야 한다. 이것이 신호의 통계 수치인 첨도를 진단알고리즘에 적용하여 사용하는 이유이다[9].

IV. 측정 및 진단결과

실제 적용 현장에서 사용 중인 전력 케이블은 사고 시 파급효과가 크기 때문에 매우 정밀한 유지, 보수를 위한 관리가 필요하다. 이런 점을 감안하여 본 연구에서는 실험실에서의 모의 실험과 기술적 자료들을 통해 표준편차와 첨도의 가능성을 확인하였고, 이를 기존 활선케이블 감시시스템 시스템에 적용하여, 진단의 결과를 확인하였다. 활선케이블 감시시스템 시스템은 기존 적용 현장의 것을 표준편차와 첨도의 측정 및 계산이 가능하고 출력되도록 개선한 것을 사용하였다.

1. 표준편차의 초기 임계값 설정

그림 1은 평균 μ, 표준편차 σ인 데이터 군집의 정규분포(normal distribution) 함수를 나타낼 경우를 나타낸다. 평균으로 부터의 편차는 1σ, 2σ, 3σ 등으로 나누어 나타내었다. 평균 μ 를 기준으로

1σ 경우 확률 밀도가 69.8%
2σ 경우 확률 밀도가 95.4%
3σ 경우 확률 밀도가 99.7%

이다[10].

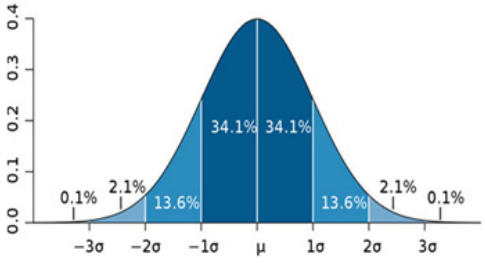

그림 1. 데이터 군집의 정규분포 확률밀도 함수
Fig. 1. Probability density function of normal distribution

활선케이블 감시시스템 시스템의 누설전류 측정 데이터는 누설전류치가 일정 범위 내에서 반복적으로 측정이 되는 경향이 있고, 특이 데이터가 나타나더라도 전체적으로 정규분포를 보이고 있다. 노이즈와 누설전류 신호를 구분하기 위해서 σ 의 적절한 선정을 해야만 한다. Σ

의 값이 너무 작게 설정되어 정규분포 그래프가 평균값 부근에 너무 좁게 형성될 경우 노이즈와 누설전류 신호가 모두 정상 누설 전류로 판별될 위험성이 있다. 반대로 너무 크게 선정이 되면 노이즈 조차도 누설전류 신호로 오판할 가능성이 있다. 따라서 활선케이블 감시시스템 시스템에서 표준편차 초기 임계값은 모의 실험을 통한 데이터 처리 과정과 통계적 이론에 의하여 σ 를 '5'로 선정하였다. 일반적인 정규분포에서 σ를 '5'로 선택한 경우 평균 $\mu \pm 5\sigma$ 의 영역내에서 확률밀도 함수는 68.3%가 된다. σ를 5 이상으로 로 선택할 경우는 확률적으로 2σ가 되어 사실상 위험성을 나타낼 만한 누설전류가 5%수준으로 매우 낮아져 진단을 하지 못하게 된다. 따라서 반복적인 실험과 경험을 토대로 표준편차의 초기 임계값은 1μ인 5 수준의 값을 선정하고 현장의 특성에 맞게 조금씩 변경하는 것이 적합하다.

2. 전원측 시단 접속부 데이터 측정 및 진단

전원측의 시단 접속부는 발생하는 부분방전 신호를 비교적 짧은 거리에서 취득이 가능하여 첨도를 제외한 표준편차만으로 진단이 가능하다.

그림 2는 활선케이블 감시시스템을 이용해 측정된 데이터와 시간에 따른 경향을 나타낸 그래프이다. 6개월간 누적된 누설전류의 표준편차 경향을 나타내고 있다.

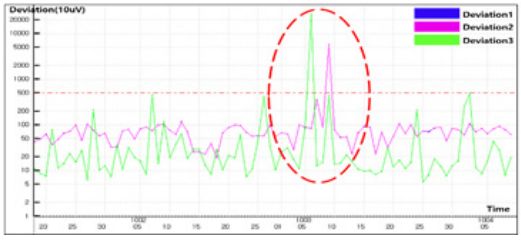

그림 2. 측정 기간 6개월 동안 누적된 누설전류
Fig. 2. Leakage current accumulated for the six months of measurement

그림 3은 케이블의 사고가 발생하기 전에 추출한 데이터의 표준편차로부터 특이현상이 인지된 결과, 케이블의 이상 발생확인할 수 있음을 나타낸다.

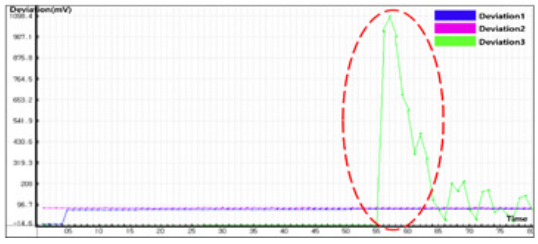

그림 3. 케이블의 사고가 발생하기 전
Fig. 3. Before the cable accident

그림 4는 케이블의 사고가 발생하기 전에 추출한 데이터의 표준편차로부터 특이현상이 인지된 결과, 케이블의 이상 발생확인할 수 있음을 나타낸다.

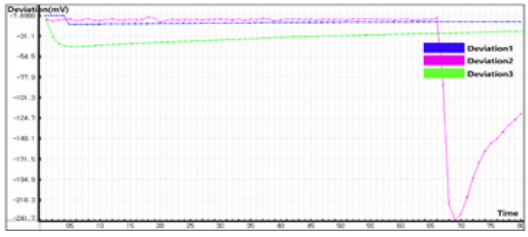

그림 4. 케이블의 사고가 발생하기 전
Fig. 4. Before the cable accident

그림 5는 일정시간 경과 후 같이 절연파괴가 발생하였음을 나타낸다. 이런 결과로부터 유추해 보면, 표준편차 이상 데이터의 발생이 접속부 부분방전 발생의 누설전류 변동에 기인한 것이며, 일정 값 이상이 될 경우 절연 파괴로 진전될 수 있음을 확인하는 결과로 의미가 있음을 확인할 수 있었다.

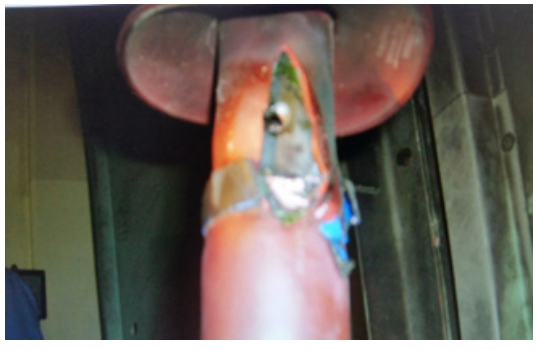

그림 5. 특이 현상 이후 절연파괴가 발생한 케이블
Fig. 5. Dielectric breakdown accident after unusual data measurement

V. 결 론

발전소의 모든 장비들은 안정상태에서 동작해야한다. 우리는 서부발전 ㈜에서 동작중인 6.9 kV 케이블 시스템의 접속부의 진단을 위한 장비 즉, 활선케이블 감시시스템을 국내 최초로 설치함 으로써 안전하고 신뢰성 있는 환경에서 운전할 수 있도록 일조하였다. 그 결과 절연 저하로 인한 열화 상태를 통계적인 처리 방법 중 표준 편차를 이용하여 분석하였다. 직류 누설전류 측정데이터로부터 구활 수 있는 진단요소 (diagnostic factors)를 이용하여 전원측의 시단 접속부의 데이터를 측정 및 진단하였다.

Acknowledgement

The authors wish to express their thanks to President Bo-Kyeong Kim(Osung Mega Power Co., Ltd.).

Without his help and guidance, this work would have been impossible to complete.

References

[1] J. S. Kim, K. H. Kim, J. S. Lee, “The Study on the Variable Orifice Spray of the Steam Power Plant Desuperheater,” Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society(JKAIS), Vol. 14, No. 1, pp. 63-68, 2013.

[2] K. H. Um,, K. W. Lee, “Nonchange of Grounding Current due to Equipment Measuring Insulation Resistance”, Journal of IIBC, vol. 14, no. 5, pp. 175-189, Jun., 2015.
DOI : http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.3.175

[3] V. Wallace “Investigation of Insulation Deterioration in 15 KV and 22 KV Polyethylene Cables Removed from Service”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-91 , Issue: 3 , May 1972), pp. 1023 - 1035
DOI : 10.1109/TPAS.1972.293454

[4] K. H. Um,, B. K. Kim, “Measurements of Load Current of XLPE Cables Installed at the Load Terminal of Turbine Generator in Operartion at Thermoelectric Power Station”, Journal of IIBC, vol. 17, no. 1, pp. 207-212, Feb. 28,, 2017.
DOI : http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.1.207

[5] K. H. Um,, B. K. Kim, “Development of System and Measured Results for Measuring Insulation Resistance of High-Power Cables in Operartion”, Journal of IIBC, vol. 16, no. 4, pp. 165-170, Aug. 31, 2016.
DOI : http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.165

[6] http://www.marcspages.co.uk/pq/3220.htm

[7] http://www.ohmpower.co.kr/kor/data/data_pd/dcablepd_index.html

[8] Testing Distribution Switchgear for Partial Discharge in the Laboratory and the Field Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 9-12 June 2008, Vancouver, BC, Canada
DOI: 10.1109/ELINSL.2008.4570260

[9] K. P. Balanda, H. L. MacGillivray"Kurtosis: A Critical Review". The American Statistician. 42 (2): 111 - 119. (1988).
DOI: 10.2307/2684482. JSTOR 2684482.

[10] A. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes (4th Edition). p. 148.

저자 소개

박 성 희(정회원)

학력

- BS: 충북대학교 전기공학과
- MS: 충북대학교 전기공학과
- Ph.D: 충북대학교 전기공학과

경력

- LS 전선
- 원광대학교 ICT 융합 그린에너지 연구원

<주관심분야 : 고전압 전기설비, 진단, 전기전자재료>

엄 기 홍(정회원)

학력

- BS: 한양대학교 전자공학과
- MS: Dept. of Electrical & Computer Engineering, Polytechnic Institute of Engineering, NYU (New York University), New York, USA
- Ph.D: Dept. of Electrical & Computer Engineering,
  New Jersey Institute of Technology (NJIT),
  New Jersey, USA

경력

- TA, RA, and Lecturer at NJIT (New Jersey, USA)
- Researcher at RS Microwave Company Inc.
  (New Jersey, USA)
- Researcher at Physics Department,
  Princeton University (New Jersey, USA)
- Adjunct Professor at NJIT (New Jersey, USA)
- 강남대, 상명대, 한양대 강사
- 현재 한세대학교 IT 학부 정교수

<주관심분야 : 안테나, 마이크로파, 전기전자재료>