배전선로 고장예지를 위한 애자의 고장징후 특성에 관한 연구

°신정훈* · 김태원* · 박성택* · 김창종**
*한국전력공사 전력연구원 · ** 수원대

A Feasibility Study on the Characterization of Incipient Insulator Failure for Distribution Fault Prediction

Jeong Hoon Shin* · Tae Won Kim* · Seong Taek Park* · Chang Jong Kim**
*Korea Electric Power Research Institute(KEPRI), **Suwon University

Abstract - A feasibility study on the characterization of incipient insulator failure for distribution fault prediction is presented. In this study, real distribution data was collected and analyzed to isolate incipient failure signatures or parameters which were expected to show distinct behaviors before and after failure incident. Several signal analysis methods were applied to isolate the parameters and a new strategy of analysis, the event-date concept, was also applied to find a relationship between non-harmonic and high frequency signal activities and imminent insulator failures.

Keywords: Failure prediction, incipient fault, insulator, data analysis, predictive maintenance

1. 서 론

배전계통 설비의 고장은 신뢰성있는 전력공급에 직,간접적으로 영향을 주게되며 어떤 경우 영구정전의 원인이 되기도 한다. 그러므로, 계통의 신뢰성 유지를 위해서는 배전계통 설비의 고장을 사전에 예측하여 보전하는 예지보전 기법 및 시스템의 개발이 매우 중요하다고 할 수 있다.

최근, 전력회사에서는 고장징후를 검출하고 고장설비의 위치를 찾아내는 실시간 온라인 접근방법에 대하여 상당한 관심을 가지고 있다. 만약, 한 설비가 고장의 원인이라면 그 설비에 대한 교체나 수리가 이루어지거나 다른 적절한 유지보수가 행해져야만 한다[1].

어떤 배전설비가 열화되기 시작하면 계통내에 간헐적인 고장징후가 수 일에서 수 달동안 계속 지속되므로 배전계통의 고신뢰성을 유지하기 위해서는 배전선로를 모니터링하고 설비의 절연파괴 또는 정전에 이르기 전에 고장의 지문을 구분, 구별하는 것이 필수적이라 할 수 있다[2]. 즉, 고장예지의 기본은 건전한 상태에서 열화되기 까지의 점진적 경로를 모니터링하고 열화의 원인을 검출하는 것이다.

본 논문에서는 설비들이 고장으로 진전하고 있는 중이며 이 설비들이 건전상태를 표시하는 특정한 지문을 나타낼 것이라는 가정하에, 실지 배전선로의 신호를 취득하고 분석하였다. 또한, 이 연구는 배전선로의 종합적인 고장예지 시스템을 위한 중장기적 연구중의 첫 번째 연구로써, 설비 고장발생전 고장의 임박함을 예견하기 위해 고장의 상태를 나타내는 다양한 변수들을 조사, 분석하여 고장예지의 실적용가능성을 판단하는 것에 중점을 둔 연구이다. 본 연구에서 배전설비 전체에 대한 고장예측 변수는 아니지만, 고주파(High-frequency)성분과 비정규고조파(Non-harmonic)성분의 변화성(매일 지속적으로 증가)이, 애자고장이 임박했음을 알려주는 하나의 고장예측 변수가 될 수 있다는 가능성을 발견하였다.

2. 배전선로 데이터의 취득

고장징후 검출 변수의 개발을 위해서는 고장발생 가능성이 높고 특수한 부하환경 및 주변여건의 특수성이 배제된 표본선로를 선정하여 양질의 데이터를 취득, 분석하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 신뢰성 있는 자료(한전, 계통운용처, '94, '95년 계전기 보호동작 분석 보고서)와 수차례의 현장방문 조사를 토대로 전체 보호계전기 동작건수 및 전력설비 불량으로 인한 계전기 동작건수를 우선적으로 검토하고 데이터 취득기기의 설치, 데이터의 전송, 효과적인 설비관리등을 고려하여 고장발생 빈도가 높은 선로를 보유한 2개 변전소(공주, 오산S/S) 4개 D/L(유구#2, 태봉, 모의, 향남)을 선정하였다. 본 논문에서는 공주변전소에서의 데이터를 중심으로 기술하였다.

2-1. 데이터 취득 시스템의 구성

고장징후 검출을 위한 입력신호인 선로의 전압, 전류데이터를 손실없이 취득하기 위하여 VHS 비디오 테잎을 이용한 고속 아날로그 레코더 Racal V-Store 16의 주파수 모듈을 사용하였다. 그림 1은 선로와 레코더간의 연결상황을 알려주는 인터페이스(Interface) 도이다. 전압, 전류 입력신호는 1차적으로 변전소의 표준 CT 및 PT를 사용하여 22.9kV 전압과 전류신호를 120V, 5A 레벨로 변환하였다. 이들 신호는 다시 레코더 입력을 위하여 광대역 펄스변류기(Wide-band Current Transformer) 및 특수 변압기(120V/1V)를 거치게 된다. 본 연구는 부하전류 레벨에 비하여 매우 작은 크기를 가지는 고장징후 전류를 검출하고자 하며 이 전류는 매우 높은 고주파 성분을 포함할 것이라 예상되기 때문에 입력 신호전단에 필터링 회로를 거친 채널을 추가하였다. 이 필터링 회로는 먼저 우월한 60Hz주파수 성분을 제거하고(Notched-out) 약 2KHz 이상의 고주파 통과필터를 이용하여 신호를 분리한다. 분리된 신호의 크기는 매우 미약하므로 이 신호를 다시 약 60dB (x 1000)정도로 증폭시켰다. 그림 1의 컨트롤 인터페이스에서 1일 2회 각 회당 1분의 간격으로 입력신호를 레코더에 자동저장하도록 하였으며 첫 번째 간격은 5:00~5:01(오전부)이고 두 번째는 17:00~17:01(오후부)이 되도록 셋팅하였다. 이 시각의 선택은 건조하고 깨끗한 애자보다 습하고 오염된 애자의 전기적 강도가 훨씬 낮다는 사실에 근거하였다[3]. 저장시간중 첫 번째 시각은 애자가 완전히 습해져 있는 이슬점상태이고 두 번째는 다소 건조한 조건에서의 상태를 보기위함이다. 그러나

각 구간의 저장시간 선택은 최적시간이라 볼 수 없고 단지 1차연구에서 최적으로 선정한 것이다. 저장시간의 제한은 저장해상도와 레코더 저장속도사이의 관계에 있다. 이는 고해상도를 선택할수록 저장속도가 더 빨라지고 속도가 빠르면 테잎은 매우 짧은 시간 동안의 데이터만 저장하게 된다. 본 연구에서는 VHS 한 테잎당 10일 동안의 신호를 저장하도록 고해상도로 설정하였다.

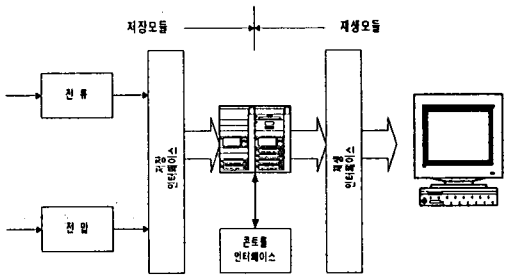


그림 1. 데이터 취득 시스템의 구성도

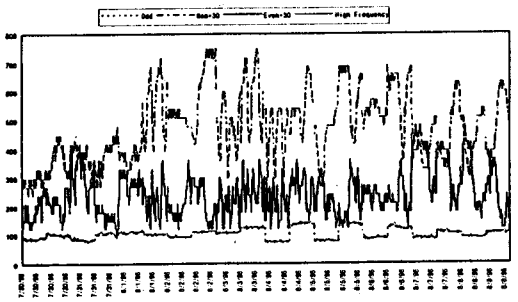
2-2. 데이터 재생과 변환

그림 1의 재생 인터페이스는 다기능 입출력 보오드인 NI(National Instrument)의 MIO-16-E2를 사용하였으며 LabWindows/CVI 소프트웨어가 내장된 데이터 취득 컴퓨터를 이용하여 VHS 테잎으로부터 아날로그 신호를 재생하고, 분석을 위하여 디지타이징하였다. 각 1분동안의 데이터중 처음 10초 동안의 데이터는 테잎 시작시의 과도기간이므로 나머지 50초동안의 데이터를 3840Hz의 샘플링 속도로 샘플링하여 디지타이즈 된 변수로 변환하였다. 이 데이터를 이용하여 상전류 A,B,C와 중성전류의 각 1초 데이터에 대하여 파고율(Crest Factor)을 계산하고 60Hz를 제외한 30Hz에서 1920Hz 사이에서, 퓨리에 변환을 이용하여 주파수변수를 추출하였다. 그러나, 중성전류는 3상전류의 실시간 합이므로 한 상의 어떤 변화는 중성전류에 반드시 반영되게 된다. 그러므로, 본 논문에는 중성전류에 한해서만 분석을 논하기로 한다.

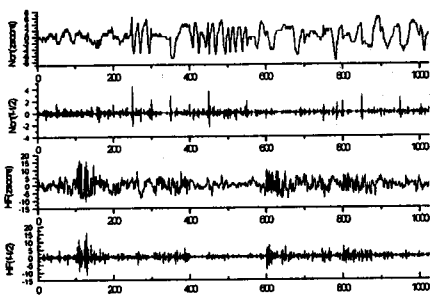
3. 저장데이터의 분석

3-1. 파라메타 분석

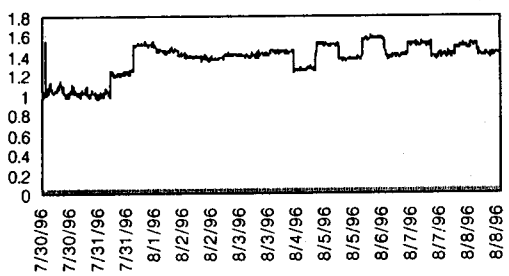
연구기간 동안 전체 20여 차례의 고장이 보고되었고 대부분의 고장은 애자의 파손에 기인하였으므로 애자고장의 예측을 위한 분석에 중점을 두었다. 고장발생 직전과 직후에 변화하는 특정 변수나 특징을 추출하기 위하여 몇가지 변수를 분석하였다. 이 변수들은 다음과 같다. 주파수성분 변수(우수, 기수, 비정규고조파)와 시간영역 변수(파고율(Crest Factor)), Daubechi 웨이브렛을 이용한 웨이브렛 변환등이 바로 그것이다[4]. 그림 2는 96년 7월 30일에서 8월 8일 동안에 저장되었던 데이터에 대하여 위 변수들을 적용, 그 특징을 나타내었으며 그림 2의 x축과 같이 하루는 두 번씩 표시되어 각 날의 오전, 오후 데이터를 연쇄적으로 나타내게 하였다. 애자 파손에 의한 고장이 8월2일과 4일에 보고되었으며 이 고장일은 그림 (b)에서 처럼 포인트 수로 나타나며 x축의 200과 400 포인트가 바로 고장발생 포인트이다. 또한, 그림 2(b)에서 상위의 두 그래프는 각각 비정규고조파 성분과 [f, f/2]레벨, 또는 주파수 밴드에서의 1 스케일(Scale)에 대한 웨이브렛 변환 결과이며[5] 하위의 두 그래프는 고주파성분과 이의 웨이브렛 변환 결과를 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 사고발생 전후 변수의 양상 :
(a) 고조파성분 (b) 웨이브렛 변환 (c) 파고율(Crest Factor)

3-2. 고 찰

그림 2에서와 같이 웨이브렛 변환이나 비정규 고조파성분과 같은 변수들은 애자고장 전 날에 매우 활동적으로 변화하였으며 고장직후 바로 교체된 것으로 보인다. 다른 기간의 데이터에서는 이와 유사한 결과가 나타나지 않았으며 애자사고에 대한 징후조건에 대해 어떠한 특징적 변수도 추출할 수가 없었다. 그러므로 다음절에서 새로운 개념 즉, 이벤트-일(Event-Date) 개념을 도입, 적용하기로 한다.

4. 분석기법의 수정 : Event-Date 개념 도입

4-1. 변수추출의 문제점

전형적인 배전선로에는 수많은 애자가 존재한다. 이런 애자

들은 서로 다른 열화상태를 가지고 존재하고 있으며 시간적으로도 변화하는 주기를 가지며 사용되고 있다. 선로상에는 고장징후의 어떤 단계에 있는 애자들이 수십개 존재할 것이며 단지 몇 개의 애자만이 어떤 시점에 도달하였을 때 절연파괴 또는 지락사고로 진전될 것이다. 그러므로, 특정사고를 찾아내어 그 원인을 수리보수 한 후에도 고장이 진전중인 애자들이 선로내에 여전히 내재하게 되어 대부분의 특성들이 고장발생 후에도 계속 나타나게 된다. 이런 복잡한 문제를 해결하기 위해 데이터의 이벤트를 인식하는 것에 근거한 새로운 분석기법을 제시한다. 1분씩 샘플된 데이터에 대하여 그 크기에서 변화성이 큰 특징을 보이면 이러한 특징을 보인 날짜를 이벤트 데이트(Event date)라 정의한다. 이런 변화성을 구하기 위하여 먼저, 특정 성분 크기의 측정치에서 평균치를 뺀 값이 Zero-crossing되는 수를 카운트하고 만약, 어떤 날의 샘플데이터의 카운트 수가 기준치를 넘는다면 이 날을 이벤트 날(Event date) 이라 정의한다. 본 논문에서는 이 새로운 분석기법을 비정규고조파 성분과 고주파성분에 적용하고 데이터를 두 개의 그룹으로 나누어 이벤트-데이트 분석을 수행하였다 오전부('am' portion)와 오후부('pm' portion)의 1분간 데이터 각각에 대해 zero-crossing 카운트를 계산하고 아래와 같은 공식으로 이벤트-데이트 백분율(Event-date percentage)을 계산한다.

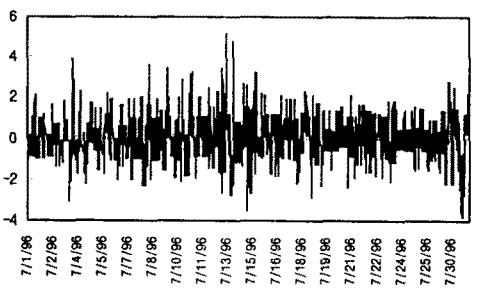
$$E_n[\%] = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{n} \times 100$$

$E_n[\%]$: 이벤트-데이트 백분율, n : 날수
S_i : 날짜상태 즉, i 날이 '이벤트' 날이면 S_i = 1, 그렇지 않으면 S_i = 0

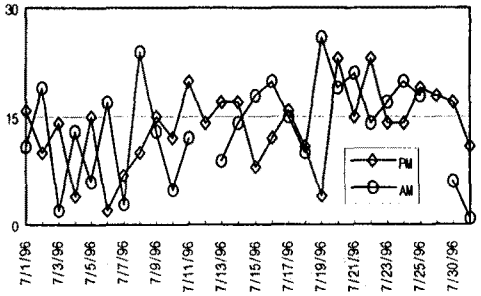
이벤트-데이트 백분율이 그전의 애자고장에서 다음의 애자고장으로 어떻게 변화하는지를 알기위하여 한 번의 고장일이 나타나면 바로 이벤트-데이트 백분율을 0으로 초기화시킨다. 초기화한 다음 다시 첫 번째날(i=1)로부터 이벤트-데이트 백분율 계산을 재개한다. 그 다음 각 n일의 $E_n[\%]$를 도시하면 이벤트일과 애자고장일 사이의 관계를 가시적으로 알 수 있게 된다.

비정규고조파 데이터(Non-harmonic data)

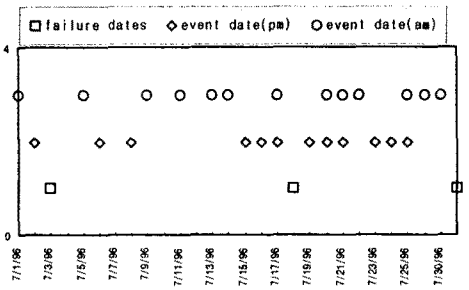
1996년 7월에 저장된 데이터의 비정규고조파 성분에 대하여 이벤트-데이트를 계산하였다. 그림 3은 데이터의 영평균(zero mean) 즉, 평균치를 0으로 본 값과 오전, 오후데이터에 대한 zero-crossing 카운트, 이벤트 일과 사고일의 표시, 그리고 이벤트 데이터율을 나타내었다.



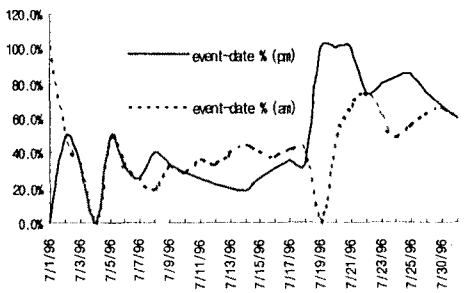
(a)



(b)



(c)



(d)

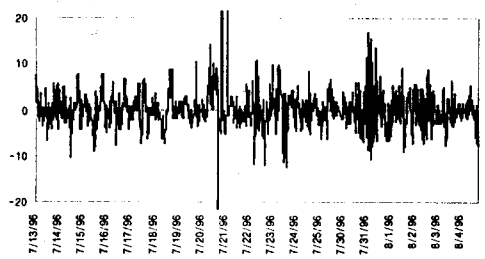
그림 3. 비정규 고조파 데이터에 대한 이벤트-데이트 분석 결과 :
(a) z-score값 (b) 오전, 오후부 데이터의 zero crossing 카운트 (c) 이벤트일과 사고일 (d) 이벤트-데이트율

고주파 데이터(High frequency data)

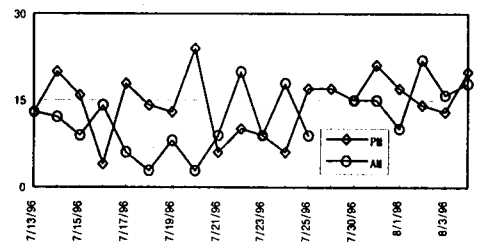
고주파 데이터에 대해서는 1996년 7월13일 부터 8월14일 사이의 데이터그룹에 대하여 이벤트 데이트를 계산하였다. 그림 4는 그림 3과 동일한 방법으로 고주파 데이터에 대하여 분석한 결과를 보여준다.

그림 3과 4에서와 같이 이벤트일과 사고일간에 어떤 연관관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 이벤트-데이트 백분율이 증가하면 고장발생이 임박하다는 것이다. 이 관계를 툴화 한다면 "이벤트데이트 백분율 $E_n[\%]$이 약 40%에 달하면 애자고장이 임박했음을 알리는 경고를 내보낼 수 가 있다"라고 말할 수 있다. 비록 이 툴이 실 적용시 고장예측 툴로 완전히 분리되

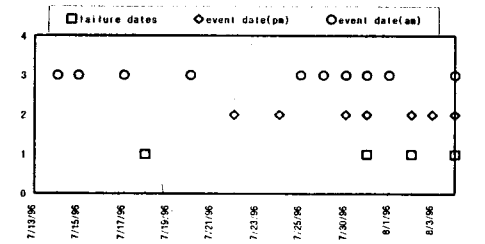
지는 않지만, 에자고장이 임박했음을 알리는 개략적인 간이률로 적용할 수가 있는 것이다. 예를 들면, 가정적인 룰로 " 이벤트를 포함한이벤트-데이트의 백분율이 계속적으로 증가한다면, 애자의 고장 가능성이 매우 크다"라고 할 수 있으며, 현재 이 룰은 매우 개략적이지만 추가적인 데이터의 수집과 분석을 통하여 더욱 더 구체화 될 수 있을 것이다.



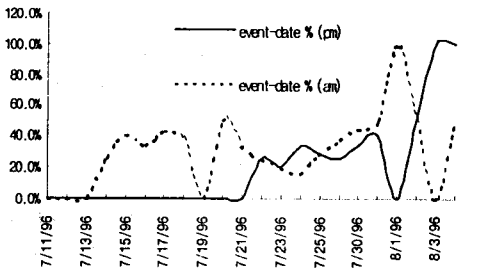
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 고주파 데이터에 대한 이벤트-데이트 분석결과 : (a) z-score값 (b) 오전, 오후부 데이터의 zero crossing 카운트 (c) 이벤트일과 사고일 (d) 이벤트-데이트율

4-2. 전체기간에 대한 이벤트-데이트 분석

앞 절의 분석에서 추출된 간이률이 일반적으로 전체데이터에 적용될 수 있는가를 검증하기 위해 이벤트-데이트 분석기법을 1996년 7월부터 1997년 2월까지 저장된 전체 데이터에 적용하였다. 저장기간중 96년 10월과 11월에는 필터링 회로의 문제로 인하여 고주파 성분의 데이터를 얻지 못하였다.

비정규고조파 데이터

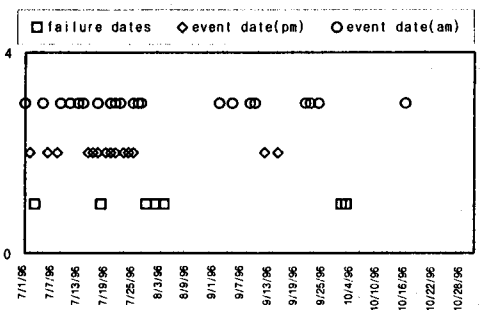
비정규 고조파 성분 데이터의 이벤트 일과 고장일, 이벤트-데이트 백분율를 그림 5의 (a), (b)에 나타내었다.

고주파 데이터

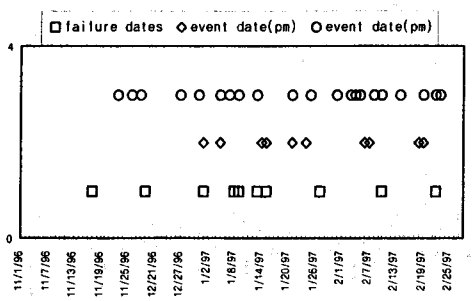
그림 6과 같이 고주파 성분의 데이터에 대해서도 동일한 방법으로 분석결과를 나타내었다.

그림 5와 그림 6의 결과로 부터 고장일을 포함한 이벤트 데이트 퍼센트가 높은 기간을 비교하여 보면 다음과 같은 유사한 간이률을 추출해 낼 수가 있다. "이벤트를 포함한 이벤트-데이트의 백분율이 지속적으로 증가하면 애자고장의 가능성이 매우 크다" 여기서, 고장예지를 위한 이벤트-데이트 백분율의 기준치(Threshold)는 대략 30~40%가 된다.

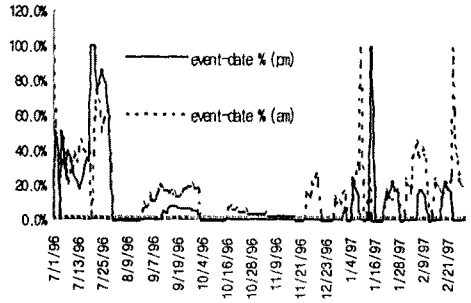
이와같이 이벤트-데이트 분석법은 반드시 고장징후 상태를 나타내는 특정한 하나의 특성을 나타내지 못하는 것은 아니고 "이벤트-데이트 백분율(Event-date percentage)"에 의해 구성된 이벤트를 포함한 날을 근거로 사고가 임박했음을 나타내는 개략적인 판단은 내릴 수가 있는 것이다.



(a)

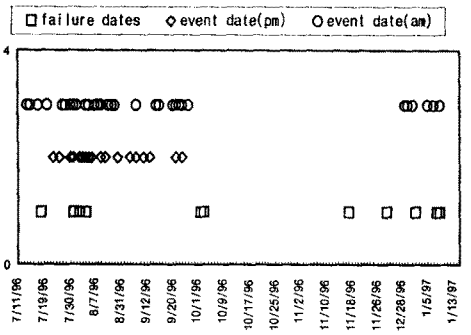


(b)

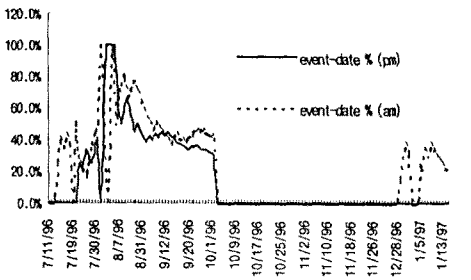


(c)

그림 5. 비정규고조파에 대한 이벤트-데이트 분석결과
(a) 이벤트일과 사고일 (b) 이벤트-데이트 백분율



(a)



(b)

그림 6. 고주파 데이터에 대한 이벤트-데이트 분석결과
(a) 이벤트일과 사고일 (b) 이벤트-데이트 백분율

5. 결 론

본 연구는 신뢰성있는 전력공급을 목적으로 배전선로 고장예지 시스템의 실적용 가능성 판단을 위하여 실계통 데이터의 취득과 분석을 행하였다. 애자사고 전후의 특성을 완전히 분리하기 위한 변수추출을 목적으로 다양한 데이터 분석방법과 기법을 적용하였다. 그러나 배전선로에서 고장지문을 나타내는 수 많은 애자들이 서로 다른 열화진전 상태를 내재하고 있으므로 인하여 고장정후 변수의 완전한 추출 및 분리는 이루지 못하였다. 그러나 이벤트-데이트 개념을 적용함으로써 비정규고조파와 고주파 성분 그리고 이들의 변화성을 이벤트-데이트 백분율로 나타냄으로써 배전선로에서 애자사고의 임박성을 나타낼 수 있었다. 물론, 현재의 형태로는 실지 적용할 수 있는 룰을 완전히 추출하지는 못하였지만 남은 연구기간과 차기 연구단계에서는 추출된 개략적인 간이룰(Rough rule)이 더욱 더 구체화 될것으로 예견된다.

6. 참고문헌

[1] K. L. Butler, "An Expert System Based Framework for an Incipient Failure Detection and Predictive Maintenance System", *Proc of 1996 Intelligent System Application to Power Systems Conference*, January 1996, pp.321-326.

[2] C. J. Kim, M. H. Yoo, "Distribution Failure Prediction and Diagnosis Technology," *Proceedings of KIEE*, Vol. 45, No. 5, May 1995.

[3] C. J. Kim et al, "A Study on the Distribution Incipient Failure Detection: Preliminary Results", *KIEE 97 Spring Conference*, May 1997, pp. 68-71.

[4] A. Bruce, D. Donoho, H. Gao, "Wavelet Analysis," *IEEE Spectrum*, pp. 26-35, October 1996.

[5] D. C. Robertson et al, "Wavelets and Electromagnetic Power System Transients," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no.2, pp. 1050-1056, April 1996.

[6] J. Sottile, J. L. Kohler, "Techniques for Improved Predictive Maintenance Testing of Industrial Power Systems," *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 25, no. 6, Nov/Dec 1989.

[7] H. Ohnishi et al., "Insulation Deterioration Monitoring System for Underground Power Distribution System," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 9, no.2, April 1994.

[8] T. S. Sidhu, M. S. Sachdev, "On-Line Identification of Magnetizing Inrush and Internal Faults in Three-Phase Transformers," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.7, no. 4, October 1992.

[9]"Hydro-Quebec's Smart Station system keeps 16 substations in sync", *Electrical World*, December 1993, pp. 90-92.

[10] News from EPRI Power Delivery Group, 1997.

[11] V-Store Instrumentation Recorder, Racal Recorders Limited, Southampton, England

[12] W. A. Chisholm et al., "The Cold-Fog Test", *IEEE PES Winter Meeting*, 96WM 099-2 PWRD.

[13] C. J. Kim, B. D. Russell, "Analysis of Distribution Disturbances and Arcing Faults using Crest Factor." *Electric Power Systems Research*, No. 35, 1995.

[14] S. E. Habib, M. Khalifa, "A New Monitor for Pollution on Power Line Insulators," *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt.C., No.2, March 1986.

[15] V. Demjaneko et al. "A Noninvasive Diagnostic Instrument for Power Circuit Breakers," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, 1992.