

배전선로 고장징후 예지 시스템 개발에 관한 연구(I)

신정훈^o 김태원 박성택
한국전력공사 전력연구원

A Study for the Prediction Method of Fault Symptoms on Distribution Feeders(I)

Jeong Hoon Shin^o Tae Won Kim Seong Taek Park
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - This paper presents the result of a feasibility study for the prediction method of fault symptoms on 22.9kV distribution line. In this paper, real distribution data was collected and analyzed to isolate failure signatures or parameters which were distinct behaviors before and after failure incident. A new strategy of analysis-based(event-date concept) prediction algorithm for the distribution insulators and a developed model system were also discussed.

1. 서 론

사회 전반에 걸친 첨단기술의 개발로 전기에너지 사용은 계속 증가하고 있으며 이에 따라 전력기기 및 송배전선로도 대형화되어 단 한번의 사고가 미치는 영향은 실로 막대할 수 밖에 없다. 따라서, 국가 경제적으로 중요도가 높은 공공시설이나 또는 부하밀집지역의 전력설비에 그 재해 가능성을 미리 감지하여 고장징후를 발견하고 사전 예방 보수를 통하여 사고를 막을 수 있는 기술을 개발하는 것이 시급성 이전에 설비운영의 최선의 방책이다. 특히, 전력의 소비자인 수용가(고객)와 직접 연결된 배전선로의 경우 점차 선로 공장의 증대와 더불어 설치된 기기가 다양복잡화되고 있으므로 고장횟수 및 정전시간의 증가뿐 아니라 고장시에 미치는 영향은 상대적으로 더욱 증가되고 있는 실정이다. 그러므로, 배전선로의 신뢰성 확보를 위해서는 선로에서 일어나는 제반 현상 즉, 정상적 기기 동작, 선로에서의 고장징후 현상, 그리고 고장에 이르는 과정을 진단하여 선로에 있어서의 재해를 방지하고 고장을 조기에 발견하여 배전선로에 대한 예방보전 조치가 취해지도록 해야 한다. 그러므로, 전력계통에 연결된 각종 설비 기자재 및 보호기기의 동작과 고장특성, 그리고 선로에서 일어나는 고장 직전의 현상을 사람의 지문을 채취하고 대조하듯 그 특징을 분류하고, 그 분류한 바에 따라 전기 공급계통의 상황을 정확히 진단하여 이를 바탕으로 고장 가능성을 예측하고 또한 그것이 고장으로 진전할 경우 고장을 사전에 검출하는 종합적인 사전 보전적 시스템을 개발하는 것이 필요하다. 따라서, 배전선로의 고장징후 예지시스템은 선로에서 일어날 수 있는 이러한 대형재해를 선로의 상태에 따라 미리 예측하여 보전하도록 하는 시스템으로, 점차 광역화, 복잡화되고 있는 전력계통의 사고 및 설비고장을 예방하는데 큰 효과가 기대되기 때문에 본 연구에서 이 시스템의 실 적용 가능성을 확인하고 1차 모형시스템을 개발하여 실용화를 위한 기반기술을 구축하고자 한다.

2. 본 론

2.1 데이터 취득 시스템의 구성

고장징후 검출을 위한 입력신호인 선로의 전압, 전류 데이터를 손실없이 취득하기 위하여 디지털 데이터 취득 장치와 병렬로 VHS 비디오 테이프를 이용한 고속 아날로그

레코더 Racal V-Store 16의 주파수 모듈을 사용하였다. 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 필스변류기(Wide-band Current Transformer) 및 특수 변압기(120V/1V)를 거쳐게 된다. 본 연구는 부하전류 레벨에 비하여 매우 작은 크기를 가지는 고장징후 전류를 검출하고자 하므로 이 전류는 매우 높은 고주파성분을 포함할 것이라 예상되기 때문에 입력 신호전단에 필터링 회로를 거친 채널을 추가하였다. 이 필터링 회로는 먼저 우월한 60Hz 주파수 성분을 제거하고(Notched-out) 약 1KHz 이상의 고주파 통과필터를 이용하여 신호를 분리한다. 분리된 신호의 크기는 매우 미약하므로 이 신호를 다시 약 60dB (x 1000)정도로 증폭시켰다. 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. 저장시간중 첫 번째 시각은 애자가 완전히 숙해져 있는 이슬점상태이고 두 번째는 다소 건조한 조건에서의 상태를 보기 위함이다.

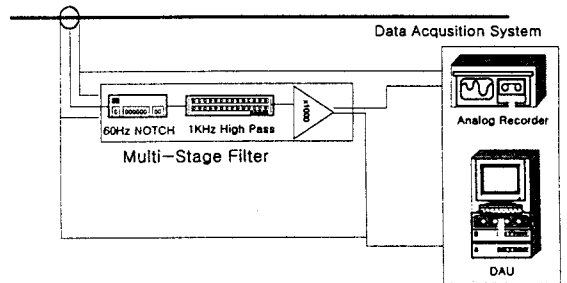


그림 1. 데이터 취득 시스템(DAS)의 구성

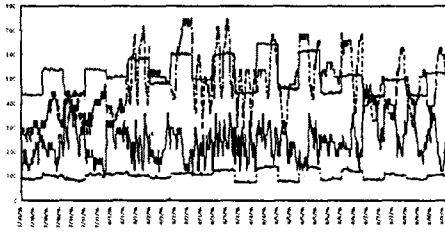
2.2 데이터 분석

약 14개월 동안 전체 20여 차례의 고장이 보고되었고 대부분의 고장은 애자의 파손에 기인하였으므로 본 논문에서는 애자고장의 예측을 위한 분석에 중점을 두었다.

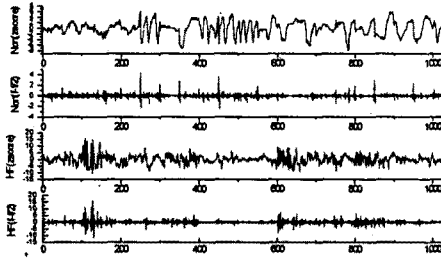
2.2.1 시간 및 주파수변수에 의한 분석

고장발생 직전과 직후에 변화하는 특정 변수나 특징을 추출하기 위하여 몇가지 변수를 분석하였다. 이 변수들은 다음과 같다. 주파수성분 변수(우수, 기수, 비정규교조파)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 8월 2일과 4일에 보고되었으며 이 고장일은 그림 (b)에서 처음 포인트 수로 나타나며 x축의 200과 400 포인트가 바로 고장발생 포인트이다. 또한, 그림 2(b)에서 상위의

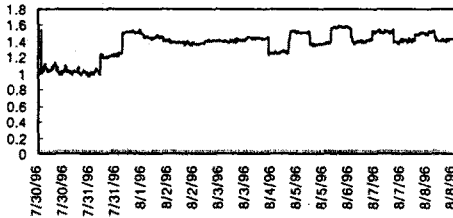
두 그래프는 각각 비정규고조파 성분과 $[f, f/2]$ 레벨, 또는 주파수 밴드에서의 1 스케일(Scale)에 대한 웨이브렛 변환 결과이며 (5) 하위의 두 그래프는 고주파성분과 이의 웨이브렛 변환 결과를 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

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

그림 2에서와 같이 웨이브렛 변환이나 비정규 고주파성분과 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-데이트(Event-Date) 개념을 도입, 적용하기로 한다.

2.2.2 새로운 분석기법의 도입(Event-date concept)

전형적인 배전선로에는 수많은 애자가 존재한다. 이런 애자들은 서로 다른 열화상태를 가지고 존재하고 있으며 시간적으로도 변화하는 주기를 가지며 사용되고 있다. 선로상에는 고장정후의 어떤 단계에 있는 애자들이 수십 개 존재할 것이며 단지 몇 개의 애자만이 어떤 시점에 도달하였을 때 절연파괴 또는 지락사고로 진전될 것이다. 그러므로, 특정사고를 찾아내어 그 원인을 수리보수한 후에도 고장이 진전중인 애자들이 선로내에 여전히 내재하게 되어 대부분의 특성들이 고장발생후에도 계속 나타나게 된다. 이런 복잡한 문제를 해결하기 위해 데이터의 이벤트를 인식하는 것에 근거한 새로운 분석기법을 제시한다. 1분씩 샘플된 데이터에 대하여 그 크기에서 변화성(Variance)이 큰 특징을 보이면 이러한 특징을

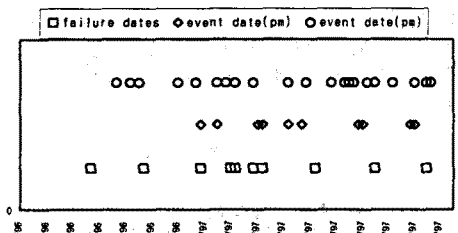
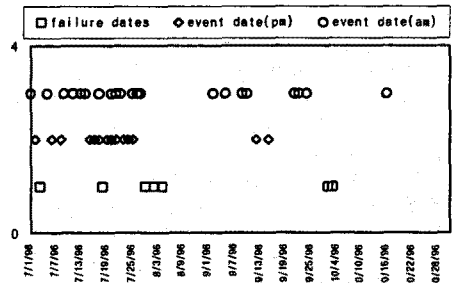
보인 날짜를 이벤트데이트(Event date)라 정의한다. 이런 변화성을 구하기 위하여 먼저, 특정 성분 크기의 측정치에서 평균치를 뺀 값이 Zero-crossing되는 수를 카운트하고 만약, 어떤 날의 샘플데이터의 카운트 수가 기준치를 넘는다면 이 날을 이벤트 날(Event date)이라 정의한다. 본 논문에서는 이 새로운 분석기법을 비정규고조파 성분과 고주파성분에 적용하고 데이터를 두 개의 그룹으로 나누어 이벤트-데이트 분석을 수행하였다 오전부('am' portion)와 오후부('pm' portion)의 1분간 데이터 각각에 대해 zero-crossing 카운트를 계산하고 아래와 같은 공식으로 이벤트-데이트율($E_n(\%)$, Event-date percentage)을 계산한다.

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

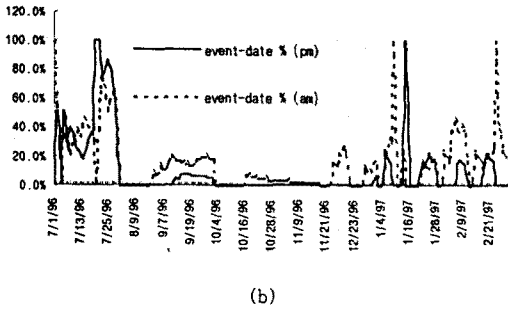
$E_n(\%)$: 이벤트-데이트 백분율, n : 날수

S_i : 날짜상태 즉, i 날이 '이벤트' 날이면 $S_i = 1$, 그렇지 않으면 $S_i = 0$

이벤트-데이트율이 그전의 애자고장에서 다음의 애자고장으로 어떻게 변화하는지를 알기 위하여 한 번의 고장일이 나타나면 바로 이벤트-데이트율을 0으로 초기화시킨다. 초기화한 다음 다시 첫 번째날($i=1$)로부터 이벤트-데이트율 계산을 재개한다. 그 다음 각 n 일의 $E_n(\%)$ 를 도시하면 이벤트일과 애자고장일 사이의 관계를 가시적으로 알 수 있게된다. 이 이벤트-데이트 분석법을 1996년 7월부터 1997년 2월까지 저장된 전체 데이터에 적용하였다. 저장기간중 96년 10월과 11월에는 필터링 회로의 문제로 인하여 고주파 성분의 데이터를 얻지 못하였다. 그림 3에 비정규 고조파 성분 데이터의 이벤트일과 고장일, 이벤트-데이트 백분율을 나타내었다. 그림 4와 같이 고주파 성분의 데이터에 대해서도 동일한 방법으로 분석결과를 나타내었다. 그림 3과 그림 4의 결과로부터 고장일을 포함한 이벤트 데이터율이 높은 기간을 비교하여 보면 다음과 같은 유사한 간격을 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 "이벤트-데이트 백분율(Event-date percentage)"을 이용하여 이벤트를 포함한 날을 근거로 애자사고가 임박했음을 나타내는 개략적인 판단을 내릴 수가 있다.



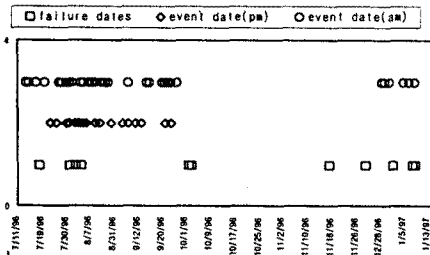
(a)



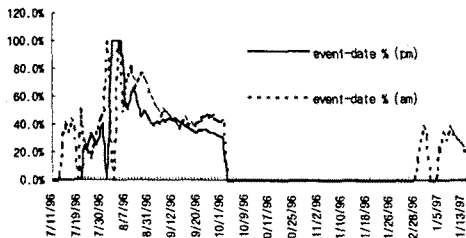
(b)

그림 3. 비정규고조파에 대한 이벤트-데이트 분석결과

(a) 이벤트일과 사고일 (b) 이벤트-데이트 백분율



(a)



(b)

그림 4. 고주파 데이터에 대한 이벤트-데이트 분석결과

(a) 이벤트일과 사고일 (b) 이벤트-데이트 백분율

2.3 고장예측 알고리즘의 구성

현장에서 취득한 데이터의 분석을 통해, 개발된 새로운 개념의 애자 고장예측 알고리즘을 제시하고 22.9kV 배전선로 실증시험장(고창)에서의 실증시험을 통하여 이를 검증하였다.

2.3.1 고장예측 알고리즘의 제시(애자)

선로의 전압, 전류데이터를 입력으로 하여 애자고장을 예측하는 본 알고리즘은 먼저, 센서를 통한 입력전류의 원시데이터와 원시데이터에서 분리한 고주파성분 데이터를 이용, 이 두 신호에 대하여 파고치(CF), 실효치(Rms), 그리고 이들의 고속 푸리에 변환(FFT)을 수행하여 도출된 비정규고조파 (Non-harmonic), 우수(Even harmonic) 및 기수고조파(Odd harmonic)성분을 이용하고 실효치성분과 더불어 Z-score(입력치-평균치)한 후, 새로운 개념에 의해 도입된 이벤트-데이트 분석기법(Event-date analysis)으로 이벤트를 카운트하여 이벤트율(Event-date percentage)을 산정, 최종적으로 애자의 상태를 예측하게 된다. 구성된 알고리즘

은 그림 5와 같다.

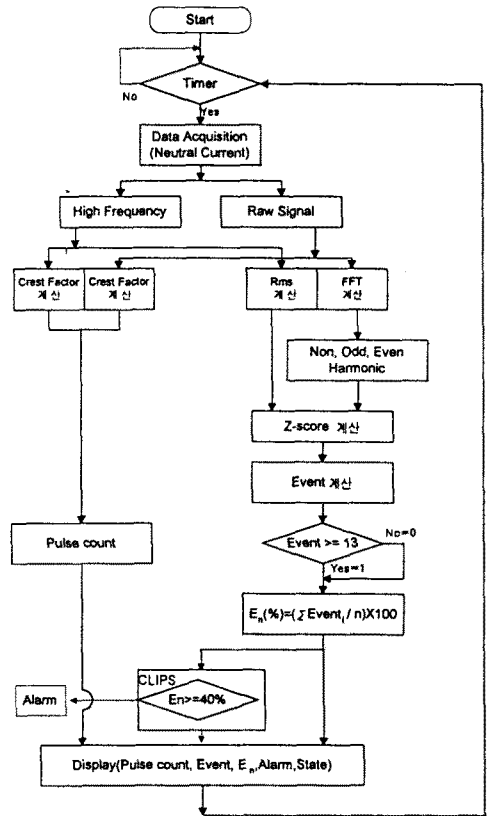


그림 5. 애자의 고장예측 알고리즘 (Flow chart)

2.3.2 실증 시물레이션 시험을 통한 검증

이벤트-데이트 분석법(Event-date Analysis)을 이용한 모형시스템을 고장의 특고압 배전 실증시험선로에 설치하여 실제통과 동일한 조건으로 시물레이션하여 그 성능을 입증하였다. 애자에 대한 고장징후 검출을 위하여 현장 선로(D/L)에서 수집된 30여종의 애자(열화진전별)를 더블테스트를 통해 단계별로 구분하여 인공열화 시험장치에 각각 인가하고 총 25일간(정상상태에서 절연과파 상태까지) 1일 1회 1분(오전)씩 전류데이터를 취득하여 알고리즘을 수행, 그 성능을 검증하였다. 알고리즘내의 이벤트 카운트에 대한 임계치(Threshold value)는 13으로하고 이벤트율에 대한 임계치는 40%로 선정하였다.

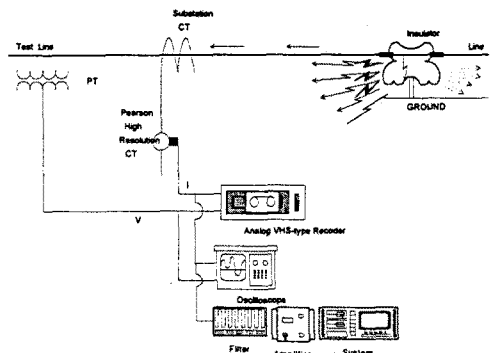


그림 6. 실증 시물레이션을 위한 구성(고창)

모형시스템내의 알고리즘은 각 상과 증성전류에 대한 실효치(RMS) 계산과 입력신호 중 임계치(Threshold) 이상만 계산하는 펄스계산 및 푸리에변환 분석, 필터를 통과한 고주파에 대한 실효치 계산을 수행한다. 실효치 계산은 고주파 성분의 분산(Variance)을 감시하기 위해서이다. 필터를 거치지 않은 신호(원신호, Raw Signal)에 대해서는 푸리에변환(FFT) 분석을 수행하며, 이 푸리에변환(FFT)분석은 입력 신호의 주파수 성분들을 분석하여 크기만을 나타낸다. 이 분석을 통하여 비교고주파와 기수, 고주파 그리고 우수 고주파 성분을 구하며 비교고주파성분은 30Hz, 90Hz, 150Hz, 210Hz, …… 성분들의 합이며 기수 고주파 성분은 기본 주파수인 60Hz의 홀수배 성분들의 합이다(60Hz는 기본 주파수 이므로 제외), 우수 고주파 성분은 60Hz의 짝수배 성분들의 합이다. 이렇게 구해진 고주파성분의 실효치 값과 비교고주파 성분, 기수 고주파성분, 우수 고주파성분에서 Z-score를 계산하고 이벤트(Event)를 계산한다. Z-score는 데이터에서 데이터들의 평균을 제거한 것이다. 그러면 평균이 '0(zero)'이므로 분석신호가 0(zero)축을 몇차례 교차하는 지를 알수 있다. 이벤트(Event)계산 부분에서 이것이 13회 이상이면 이벤트데이트(Event date)가 된다. 그러면 E_n 은 증가하고 이벤트가 13회 미만이면 이벤트 데이트가 아니므로 E_n 은 감소한다. 여기서 나온 E_n 값을 누적된 E_n 값과 계산하여 현재의 애자 상태를 화면에 표시하고 또한, 화면에는 펄스계산과 이벤트(Event) 계산결과, 현재의 상태를 표시한다. 여기서, 필터를 거치지 않은 입력신호의 펄스계산 결과가 '0(zero)'이면 이벤트를 무시하며 '0(zero)'으로 만든다. 그렇지 않으면 작은 변화에 대한 이벤트를 계산하므로 오차가 발생하기 때문이다. 그리고, 애자의 고장 진단 단계에 따라서 애자의 상태를 화면에 표시한다. 표1은 실증 시물레이션 시험 결과치를 종합적으로 나타낸 것이며 그림 7은 본 알고리즘이 내장된 모형시스템의 출력화면을 Snapshot으로 잡은 그림이다.

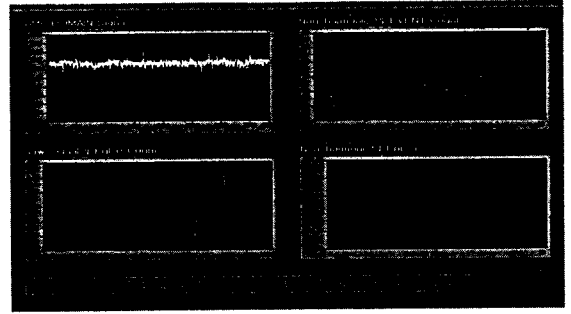


그림 7. 실증 시물레이션 결과의 출력화면(Snap-shot)

개발을 목적으로 수행된 본 연구에서는 최종적으로 이벤트-데이트 분석법(Event-date Analysis)에 의한 애자의 고장예측 알고리즘이 개발되었으며 이 알고리즘을 탑재한 모형시스템이 제작되었다. 이를 배전 실증 시험선로에서 열화단계별로 애자를 취부, 실지 선로와 최대한 동일한 조건으로 시험하여 알고리즘의 성능을 성공적으로 검증함으로써 배전선로의 고장예측 가능성을 제시, 국내외적으로 동일 분야에서 기술선도적인 역할을 수행하였으며 후속연구를 통한 실용화시스템의 개발이 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [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] S. T. Park, J. H. Shin et al, "A Study for the Prediction Method of Fault Symptoms on Distribution Feeder", KEPRI TR.No.J1998.16, May 1998.
- [3] C. J. Kim, M. H. Yoo, "Distribution Failure Prediction and Diagnosis Technology," *Proceedings of KIEE*, Vol. 45, No. 5, May 1995.
- [4] C. J. Kim et al, "A Study on the Distribution Incipient Failure Detection: Preliminary Results", *KIEE 97 Spring Conference*, May 1997, pp. 68-71.
- [5] A. Bruce, D. Donoho, H. Gao, "Wavelet Analysis," *IEEE Spectrum*, pp. 26-35, October 1996.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] H. Ohnishi et al., "Insulation Deterioration Monitoring System for Underground Power Distribution System," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 9, no.2, April 1994.
- [9] 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.
- [10] News from EPRI Power Delivery Group, 1997.
- [11] W. A. Chisholm et al., "The Cold-Fog Test", *IEEE PES Winter Meeting*, 96WM 099-2 PWRD.
- [12] C. J. Kim, B. D. Russell, "Analysis of Distribution Disturbances and Arcing Faults using Crest Factor," *Electric Power Systems Research*, No. 35, 1995.

표 1. 시물레이션 총 결과값

구분	%PF	일구 (Day)	펄스카운트		이벤트 카운트				이벤트출(E _n (%))			
			원시	고주파	원시 신호			RMS	원시 신호			고주파
					Non	Odd	Even		Non	Odd	Even	
LP13	6.73	1st	0	8280	0	0	0	30	0	0	0	25
		2nd	0	2682	0	0	0	27	0	0	0	40
		3rd	1	1423	18	5	4	21	16.677	0	0	50
		4th	0	767	0	0	0	2	14.285	0	0	42.857
		5th	0	412	0	0	0	17	12.5	0	0	50
LP12	7.86	6th	0	677	0	0	0	25	11.111	0	0	55.555
		7th	0	210	0	0	0	29	10	0	0	60
		8th	0	353	0	0	0	2	9.09	0	0	54.545
		9th	0	383	0	0	0	21	8.333	0	0	58.333
		10th	0	359	0	0	0	27	7.692	0	0	61.538
LP15	8.72	11th	22	8766	16	30	16	36	14.285	7.142	7.142	64.285
		12th	11	12634	17	24	11	4	25	25	0	0
		13th	0	9144	0	0	0	20	20	20	0	20
		14th	0	8636	0	0	0	11	16.666	16.666	0	16.666
		15th	1	6974	26	13	17	15	28.571	28.571	14.285	28.571
LP14	39.36	16th	1	7614	22	11	17	13	37.5	25	25	37.5
		17th	4	18158	20	27	15	30	44.444	33.333	33.333	44.444
		18th	6	13869	21	21	17	13	50	40	40	50
		19th	2	9278	25	13	12	9	54.545	45.454	36.363	45.454
		20th	3	8458	16	10	14	14	58.333	41.666	41.666	50
LP11	95.05	21th	95	19111	22	19	23	11	61.538	46.153	46.153	46.153
		22th	256	13530	3014	14	16	18	64.285	50	50	50
		23th	195	10429	21	21	23	27	66.666	53.333	53.333	53.333
		24th	68	12720	25	22	30	29	68.750	56.250	56.250	56.250
		25th	4	6794	15	6	28	14	70.588	52.941	58.823	58.823

3. 결 론

배전선로의 고장징후 예측 가능성 검토와 모형시스템