

전자파를 이용한 배전용 불량애자에서의 부분방전 검출장치개발

Development of the partial discharge detecting equipment using electromagnetic wave in deteriorated insulator

강창원*, 송일근**, 김주용**, 이병성**, 강대수***
(C.W.Kang, I.K.Song, J.Y.Kim, B.S.Lee, D.S.Kang)

Abstract

배전용 애자는 전기적, 열적, 기계적 스트레스 등 내·외부 서지에 의한 균열이 서서히 발생되며 장시간 사용시 절연파괴에 의한 지락사고로 진전되는 경우가 많다. 이러한 사고로 인하여 순간정전이나 장시간 정전에 의한 피해를 최소화하기 위해 열화된 애자를 조기에 검출함으로써 전력공급의 신뢰성 향상을 기하고자 한다. 이를 위해 열화된 애자에서 나타나는 물리적 현상에 의해 변화되는 주파수 스펙트럼 분포 해석을 통해 방전 전자파가 갖는 주기성 파형(120Hz)을 검출하여 열화된 애자를 탐지·추적하는 장치를 개발하고자 한다.

1. 서 론¹⁾

발전된 전력을 배전망을 통해 최종 수요자에게 공급하는 배전부문에서는 안정되고 양질의 전력공급을 책무로 하고 있다. 이를 위해서 배전망을 구성하는 배전 기자재(주상변압기, 피뢰기, 현수애자 등)의 사고 방지가 무엇보다 중요하다. 배전 기자재는 운전되는 순간부터 경년열화가 진행되기 때문에 사고 방지를 완벽하게 하는 것은 현재의 기술로는 불가능하다고 볼 수 있다. 때문에 사고를 조기에 예방하는 기술을 개발하여 과학적이고 체계적인 점검방법을 현장에 적용할 필요가 있다. 많은 배전기자재 중에

서 배전용 현수애자의 고장율이 전체 배전선 사고의 14.6%('88 ~ '98년 평균)를 차지하고 있다. 선진국의 경우는 1.1%(미국) ~ 1.5%(일본) 수준이다. 원인별 고장현황을 보면 제작불량이 52.1%('93~'98 평균), 자연열화가 28.6%, 기타 19.1%로 제작불량이 절반을 차지하고 있다. 이러한 배전용 기자재인 애자류에서의 고장율은 '97년부터 감소추세에 있지만 선진국에 비하면 아직도 고장점유율이 높다고 할 수 있다. 현재 고장애자를 검출하기 위한 장비개발이 선진국에서는 활발히 추진되어 일부는 상용화되고 있지만 검출 감도가 떨어지고 주위 노이즈(Back Ground Noise)와의 구분해석이 미흡하여 오진의 경우가 많아 전주 위에 올라가 육안점검에 의존하고 있는 실정이다. 일반적으로 자기재 애자류에 절연 열화가 생기면 열화 부위에 국부적인 부분방전이 발생한다. 이것은 미약한 간헐적 부분방전 현상이다. 방전이 발생하게 되면 방전빛(光), 방전음(音), 방전열(熱),

* (주)피에스디테크

** 전력연구원

*** 천안공업대학

그리고 주위에 UHF 대역의 고주파 방사 전자파를 방출시킨다. 고장애자 검출장비도 이들 현상을 검출하기 위한 방향으로 개발되고 있다. 방전에 따른 빛이나 음향, 열등의 검출은 현장적용에 많은 어려움이 있어 현재까지 실용화가 극히 미미하다고 볼 수 있다. 때문에 선진국에서는 전자파 대역을 검출하여 고장 애자를 검출하는 기술이 활발히 연구되고 있으며 국내에서도 전력연구원을 비롯한 일부 학계에서 연구 수행 중에 있다. 현재까지 연구된 내용을 보면 고장애자에서 발생하는 전자파는 스펙트럼분석결과 특정 주파수대역에서 집중적인 방사전자파가 검출되었으며 방사전자파가 일정 주기성을 갖는 파형임을 규명하였다. 본 연구개발에서는 고장애자에서 발생하는 전자파 주파수 스펙트럼을 통해서 발생빈도가 가장 높은 주파수 대역을 찾고, 방전 일정 주기를 갖는 방전펄스를 검출하여 고장애자 검출 및 추적장치를 개발하고자 한다.

2. 고장애자의 열화에 따른 현상

가. 애자의 열화 메카니즘

일반적으로 자기재류는 크게 자기(Ceramic), 금구, 시멘트 등으로 구성되어있다. 열화의 진행은 이들 구성요소들에게 가해지는 열적, 기계적, 전기적, 환경적 요인들에 의해 절연내력이 저하된다. 애자의 열화 진행과정을 보면 다음과 같다.

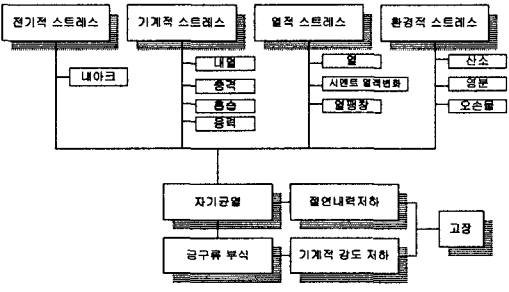


그림 1. 애자의 열화진행 메카니즘

나. 열화 현상

1) 자기 파손

제조 공정에 의한 불량이거나 경년열화에 의한 균열 등에 의해 기계적 인장하중이 계속해서 가해지게 되면 애자 자기 표면이나 내부에 미소 균열이 서서히 진행되어 결국 애자가 파손된다.

2) 내이크

뇌서지나 애자표면에서의 섬락(Flash over)등에 의해 아크가 발생하게 되면 자기부분에 용융이나 파손되는 현상이 발생된다.

3) 열팽창

자기애자와 지지하는 금구류의 열팽창계수가 다르다. 자기재의 열팽창계수는 $4\sim 5 \times 10^{-6}$, 금구류는 11×10^{-6} 이므로 애자의 열변화에 따라 각 부의 열팽창차이에 의해 자기재가 응력을 받아 균열이 발생한다.

4) 시멘트의 경년열화

자기재와 금구류를 부착시켜주는 시멘트는 장기 사용시 수분등에 노출되어 자기에 응력을 준다. 이로 인해 자기재에 균열은 일으키는 경우가 있다. 편애자의 열화 중 많은 경우가 이에 해당된다.

5) 기타 환경 부식

염분이나 오존등에 의해 지지금구류 부식, 시멘트 팽창 등에 의해 기계적 강도가 저하된다

3. 애자 열화에 의한 방전 전자파대역 분석

가. 방전 전자파대의 주파수 대역 분석

열화가 진행된 애자에서 나타나는 특징적인 현상은 절연저항이 저하되고 방전 주파수대역이 변화된다. 즉 방전 신호의 형태나 스펙트럼 분포에 영향을 준다. 애자의 절연파괴 과정을 분석해 보면 열화가 진행되는 순간부터 전자파가 방출되는 절연이 파괴될 때까지 방전에 의한 전자파는 광대역의 불규칙적인 주파수 스펙트럼을 갖는다. 이러한 방전 전자파를 펄스화 하였을 경우 이들의 발생시간에서 어떠한 특정한 패턴을 나타낸다. 특정패턴을 갖는 펄스파, 즉 방전전자파의 발생시간 분포를 나타내는 알고리즘에 의해 전면 열화된 애자의 열화정도를 검출할 수 있다. 이를 위해서는 펄스화된 방전전자파의 발생시간 분포패턴과 열화된 애자의 절연저하 관계를 분석할 필요가 있다. 또한 최적의 전자파 대역(Dominant Frequency)를 선정하기 위해서 많은 고장애자의 주파수 분포도를 찾을 필요가 있다. 지금까지의 연구에서는 열화된 애자에서 방출되는 방전 전자를 검출해 주파수 대역을 분석한 결과 30MHz 대역에서 발생빈도가 가장 많았다. 주파수 스펙트럼에서는 0~200MHz까지 광대역으로 나타나지만 이들 주파수 스펙트럼의 1주기 주파수 대역은 20~30MHz, 50~60MHz 대역에서 주기성을 갖는 분포빈도가 가장 많았다. 하지만 이들 실험은 한정된 시료에서 수행된 것이기 때문에 더 많은 시료에 의한 실험이 필요하다.

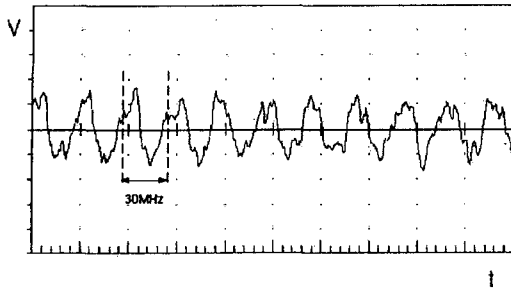


그림 2. 주파수 대역 스펙트럼

나. 방전 전자파의 발생 주기 검출

애자에 전압이 가해지면 애자가 인가전압을 충분히 견딜 수 있다면 애자에서는 어떠한 전자파도 발생하지 않는다. 그러나 애자가 열화된 경우에는 인가전압을 충분히 견디지 못하고 절연파괴가 진행되어 전자파가 발생하게 된다. 그림 3은 인가전압이 V_0 일 때 열화된 애자에서의 절연파괴 시작전압이 V_1 인 경우 전자파 발생구간을 나타낸 것이다.

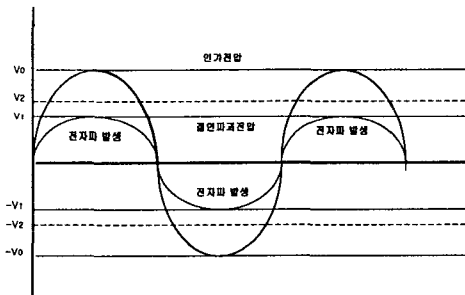


그림 3. 전자파 발생 전압 및 구간

그림에서와 같이 V_0 와 V_1 사이에서 전압이 인가될 때 전자파가 방사된다. 인가 전압이 주기성(60Hz)을 갖고 인가되기 때문에 전자파 발생도 V_1 와 V_0 사이에서 주기성을 갖는다고 볼 수 있다. 만약 V_2 에서 전자파가 발생된다면 애자절연파괴전압은 V_2 가 된다. 그림 3에서의 전자파 발생구간에서의 신호는 임펄스에 많은 주파수 성분의 정현파가 변조되어 있는 형태가 된다. 그림 4는 이러한 예를 나타낸 것이다.

애자의 인가전압이 V_0 이상일 때 임펄스(Impluse)가 발생하게 되며 펄스를 만들어서 하나의 신호와 다음 신호가 발생하는 사이의 시간을 측정하여 이 시간의 통계적 분포를 본다면 여러 가지 메카니즘을 추출할 수 있다. 위상동기화에 따른 펄스와 펄스사이의 발생 구간사이의 통계적 분포를 도착시간 확률

분포라 한다.

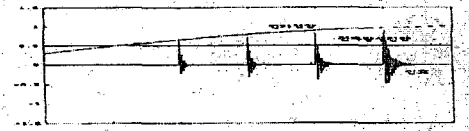


그림 4. 전자파 발생의 위상동기화
다. 펄스 발생구간에서의 도착시간 특성

그림 3에서와 같이 열화된 애자에서의 방사전파 도착시간 분포는 60Hz 동기화 시킨 결과 그림 5와 같이 8.3ms(120Hz)의 주기성을 갖는 것을 알 수 있다.

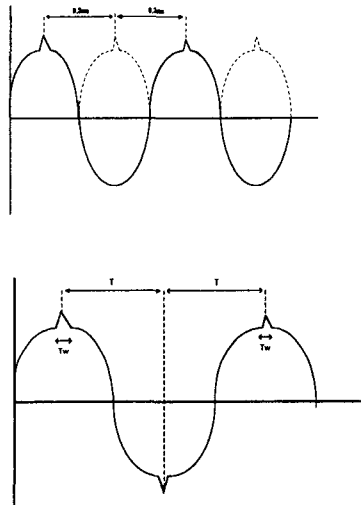


그림 5. 전자파 발생의 펄스동기화

열화 되는 정도가 심할수록 펄스 발생빈도가 커지게 되면 두 펄스사이의 간격이 좁아져 8.3ms 이내가 된다. 이와 반대로 열화정도가 약한 경우와 건전 상태인 경우는 8.3ms 범위에서 펄스가 발생하지 않는다. 일정시간동안 펄스와 펄스사이의 시간차를 구하여 통계적 분포를 나타낸 것이 그림 6이다

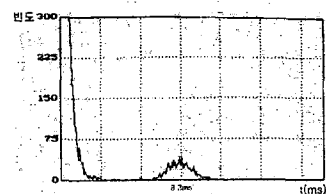


그림 6. 도착시간의 통계적 분포도

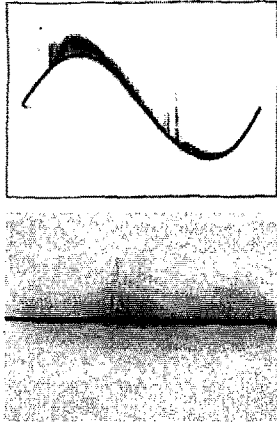


그림 7. 방전 파형 및 방사전자파 수신 파형

열화 애자에서 방출되는 전자파의 주기는 120Hz로서 이는 상용전원 주파수인 60Hz의 2배가 된다. 방사전자파의 발생구간(Tw)은 애자의 열화 정도에 따라 변하지만 열화가 심하면 구간은 넓어지고 열화가 적으면 좁아진다. 상승하강 지점에서 다소의 전압차이가 있겠지만 적어도 절연내압 파괴 후부터 방사되며 그 이전에는 낮은 전압으로 방사가 정지된다.

이와같은 패턴은 60Hz지속 시간의 반주기 내에서 지속되는 현상이다. 즉 방사전자파가 발생되면 방사전자파의 펄스군은 8.3ms의 주기성을 가지게 입증되는 것이다. 따라서, 60Hz의 상용전원에 가압중인 애자가 열화되어 전자파를 방사하고 있다면 절연체의 열화 정도는 Tw로 나타낼 수 있다. 그림 7은 방전파형과 방사전자파의 수신파형을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 방사전자파의 발생구간은 밀한 부분과 소한 부분이 인가교류 전압원에 의해 주기적으로 교번 되는데 이를 제곱 복조하면 대수형 펄스의 밀한 부분과 소한 부분의 시간간격분포를 각각 얻을 수 있다. 즉, 밀한 부분의 시간간격분포는 시간영점에서 대수함수형태를 보이고 소한 부분의 시간간격분포는 방사전자파의 발생량에 따라 일정시간(8.3ms 이내)을 중심으로 정규분포와 유사한 모양을 가지게 된다. 10초간(교류인가전압 600주기)수행한 결과에 대한 시간간격분포와 이를 반복하였을 때 정규분포의 중심시간에 대한 경향을 분포의 형태를 모델화 한 것이 그림 8이다. Sp 와 Sd의 각 분포에 대해 총 빈도는 밀한 부분과 소한 부분의 펄스발생간격 각각의 빈도를 Pi, Di 라 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Sp = \int Pi$$

$$Sd = \int Di$$

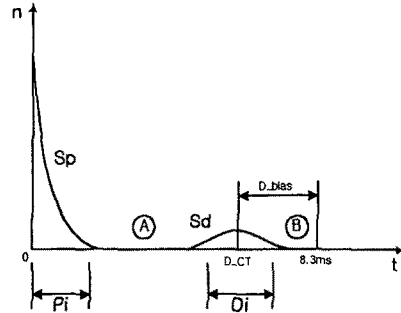


그림 8. 방사전자파 펄스 발생시간 분포 모델

따라서 각 분포의 평균점은 다음과 같이 되고 이들 식으로부터 D_bias의 파라미터를 유도할 수 있다.

$$P_center = \int xi Pi / Sp$$

$$D_center = \int xi Di / Sd$$

$$D_bias = \cos((8.3 - D_center)/2)$$

D_bias는 분포의 중심이 8.3ms로부터 얼마나 떨어져 있는가를 나타내어 주는 것으로 애자의 열화 정도를 상대적으로 나타낼 수 있는 대표적인 파라미터가 된다. 즉, 방사전파발생 전압의 영역이 넓어지므로 이러한 전파발생구간에서 발생하는 펄스화된 방사전파의 도착시간분포의 중심은 이론적으로 8.3ms(120Hz)이다. 또한 이 도착시간 분포의 중심은 애자의 열화 정도에 따라서 8.3ms보다 작게 나타나므로 도착시간 분포의 주기성은 애자의 불량을 판단할 수 있는 중요한 파라미터가 되고 도착시간 분포의 중심은 절연저항과 직접적인 관계가 있으므로 애자의 열화 정도를 추측할 수 있는 파라미터로 사용될 수 있다. 단, 발생시간 분포 중심 파라미터는 0으로 접근은 하되 0은 되지 않는데 이는 절연체의 양단전압이 0(volt)에서는 절연이 파괴되지 않기 때문이며, 이러한 최소 전파발생전압에 따른 펄스 발생시간 분포 중심 파라미터는 본 검출기의 검출한계가 될 것이다. 또한 다음 식은 각 분포의 분산을 나타내는 것으로 방전의 형태에 따라 특징적인 값이 될 수 있으며 이상의 파라미터를 구하는 과정은 표1과 같다.

$$P_o = \sqrt{\sum P_i^2/n_p - (\sum P_i/n_p)^2}$$

$$D_o = \sqrt{\sum D_i^2/n_d - (\sum D_i/n_d)^2}$$

표 1. 특징파라미터 추출 알고리즘

단계 ①	분포의 포락선 추정
단계 ②	A영역 및 B영역 시간구간 추정
단계 ③	Sp 및 Sd 영역의 Local Maximum 탐색
단계 ④	Sp 및 Sd 면적의 90(%)를 포함하는 영역 (P-Width, D-Width)의 평균 시간점 (D_CT) 산출
단계 ⑤	분포의 분산값 산출

라. 방전전자파의 도착 주기성 모의 실험

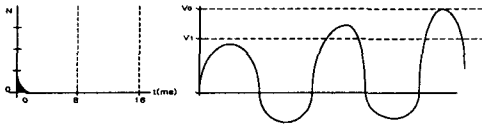


그림 9. 애자 내부의 초기열화단계

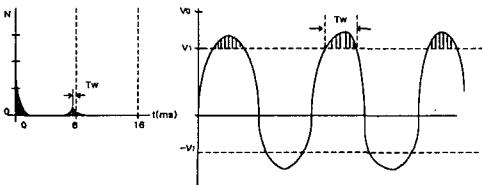


그림 10. 전파 발생구간 검출시작 단계

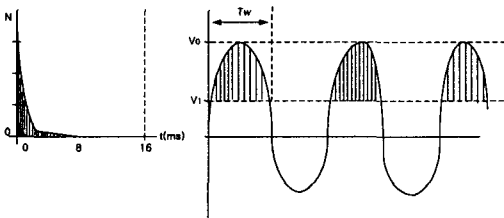


그림 11. 전파 발생구간 한계

그림 9~11과 같이 애자의 절연저하가 진행될수록 전자파 발생 빈도가 커지게 된다. 이 전자파 발생구간에서 발생하는 펄스화된 방사전파의 도착시간 분포의 중심은 8.3ms이며 이보다 작게 나타나는 경우는 애자의 고장정도가 심해지고 있다고 볼 수 있다. 따라서 도착시간 분포도를 보면 애자의 변화정도를 예측할 수 있다.

4. 방전전자파 측정 장비에 의한 실험

가. 실험실에서의 모의실험

열화된 애자를 중심으로 방전전자파 도착시간 분포측정을 이용하여 실험실에서 모의 실험을 하였다.

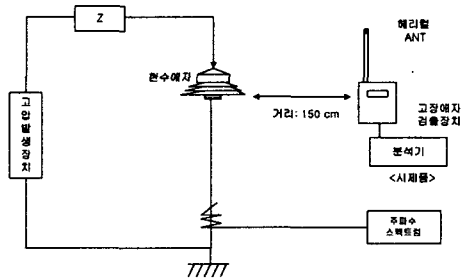


그림 12. 부분방전 발생 실험구성도

주파수 스펙트럼은 LeCroy 9310A Oscilloscope이며, 측정 주파수 대역은 400MHz까지 이고 샘플링은 100Ms/s, 채널은 2채널, 메모리 2M사용 CPU는 Motorola Micro-processor 68020/68881를 사용하였다. 이와 같은 측정 장치를 구성하고 현수애자와 1.5m 이격된 장소에서 대역 30MHz±0.5MHz의 헤리컬 안테나를 이용하여 전자파를 측정하였다.

나. 현장에서 모의실험

개발된 시제품의 주파수 감도와 측정거리를 증가시킨 후 고창에서 현장 실험을 실시하였다.

◎ 실험일자 : 2001. 02. 02

◎ 측정일소 : 고창 배전 실증 시험실

◎ 기상상태 : 맑음, 4℃, 62%, 미풍

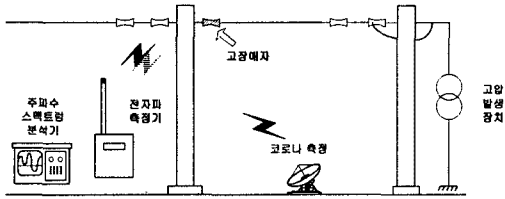


그림 13. 고압 발생장치 및 현수애자 설치 구성도

◎ 측정조건

- 옥외시험야드에 현장과 동일한 구조로 배전용 세라믹 현수애자를 설치하고 3련 중 전원측 1개를 불량애자로 교체하여 검출가능성을 측정
- 인가전압 : AC 13.2kV
- 주변상태: 765kV 전선 교체 작업으로 가압을 하지 않아 송전 잡음 없음.

◎ 시료

- 불량애자 3개 설치, 각 상별로 3련의 애자 중 전원 측 1개에 불량애자 설치
- A상 불량 : 두부 punctuation
- B상 불량: 내부 관통 섬락
- C상 불량: 갓 1/2 파손

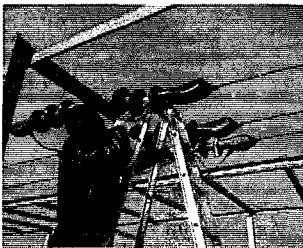


그림 14. 측정 모습

현장실험결과 건조상태에서는 주파수 스펙트럼결과 광대역으로 특정 주파수대역 검색은 되지 않았다. 또한 전자파 검출장비에서도 간헐적으로 8.3ms 이내에서 전자파의 도착주기성이 검출되었다. 누수 상태에서는 특정주파수 대역이 검출되었다.(185~225MHz) 또한 전자파 검출장비에서도 모두(4.3~8.3ms)사이에서 검출되었다.

5. 결 론

고장애자에서 발생하는 방전전자파의 도착시간 확률분포실험실 모의 실험 및 현장 실험에서 규명되었

다. 하지만 현장실험에서와 같이 건전 상태에서 고장애자를 검출하는 감도중폭부문을 개량하게 되면 고장애자 및 발생위치를 탐지하리라고 생각된다. 이러한 실험을 근거로 장치 개발 중에 있으며 조기 실용화되도록 더욱 개발을 추진해 나갈 예정이다.

【참고 문헌】

1. “배전설비 결함분석 기술” 1999.9.2 전력 연구원
2. “배전 기자재의 열화 진단기술의 개발” 1995.12 일본전기평론
3. “절연체 열화에 의한 방전전자파의 특징 추론에 대한 연구” 2000. 천안공업대학 논문집