

## 단일 활선 애자의 동특성 분석

오기용, 박준영, 이재경  
한전 전력연구원

### Analysis of Dynamic characteristics for live-line insulator

Ki-Yong Oh, Joon-Young Park, Jae-Kyung Lee  
Korea Electric Power Research Institute

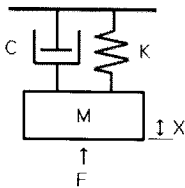
**Abstract** - 송전선로에 절연물로 사용되는 애자는 설치 이후 장시간 사용에 따라 고전압 스트레스, 기계적 스트레스, 열 및 환경 스트레스 등으로 열화가 진행되기 때문에 안정적인 전력설비 운영을 위하여 활선 애자의 비파괴 열화 상태 점검이 필요하다. 본 연구에서는 비파괴 상태 진단 감시 기술인 주파수 응답 함수 측정을 통한 고유 진동수 분석을 통하여 현재 활선 애자로 사용되고 있는 NGK210, KRI210, NGK300 및 KRI300 4가지 종류 애자의 동특성 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 애자의 결함이 발생하였을 때 고유진동수 변화를 분석하였다.

**Keyword** - 주파수응답함수(Frequency Response Function), 활선 애자, 동특성(Dynamic characteristics)

### 1. 서 론

활선 애자는 고장 발생시 불시 정전 사고를 유발하므로 이를 미연에 방지하기 위하여 가공송전운영기준에 의거하여 1회/5년의 주기로 애자의 점검을 실시하고 있으며, 2001년부터는 전기식 불량애자 검출기[1]를 확대 적용하고 있다. 하지만 절연저항 측정을 통한 불량 애자 검사 방법은 기계적 손상은 검출되지 않기 때문에, 기계적 손상으로 유발 가능한 정전·단락과 같은 전력선 사고는 미연에 방지하기 힘든 단점이 있다. 따라서 간단한면서도 정밀하게 수행 가능한 비파괴 상태 감시 기술의 개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 불량 애자의 비파괴 검출 방법 개발을 위하여 주파수 응답 함수 측정을 통한 고유 진동수 위치 및 크기의 분석을 제안한다.

주파수 응답 함수(Frequency Response Function)[2]는 시간 영역에서 측정된 시스템의 응답 신호를 신호처리 기법을 사용하여 주파수 영역 응답으로 변환한 것이다. 시간영역에서는 시스템의 응답 관찰을 통하여 시스템의 동특성인 질량, 강성, 감쇠와 같은 값을 파악하기 힘들지만, 주파수 영역에서 관찰하면 시스템의 특성 변화를 쉽게 파악할 수 있다.



〈그림 1〉 1자유도 2차 질량-강성-감쇠를 갖는 시스템

〈그림 1〉은 임의의 시스템을 1자유도 2차 시스템으로 묘사한 것으로 평형형 방정식을 세우면 식(1)과 같이 질량, 강성 및 감쇠를 갖는 2차 미분 방정식으로 표현되며, 이를 초기 조건은 모두 0이라고 가정하고, Laplace 변환을 수행하여 주파수 영역으로 변환하면 식(2)와 같다.

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) \quad (1)$$

$$F(s) = (Ms^2 + Cs + K)X(s) \quad (2)$$

식(2)를 입력된 힘에 대한 물체의 거동으로 표현하면 식(3)과 같은 분수식으로 표현되고 이를 고유진동수(Natural Frequency :  $\omega_n$ ) 및 감쇠율(Damping ratio :  $\zeta$ )[3]로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} \quad (3)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

활선 애자를 백색잡음(White Noise)[4] 특성을 갖는 힘으로 가진하고 거동을 측정하면 애자의 강성, 감쇠 등과 같은 애자의 동특성을 추정할 수 있으며, 애자의 결함이 발생하면 강성이나 감쇠가 변하여 고유진동수 위치가 변동하거나 고유진동수 진폭이 변한다. 본 연구는 결함이 발생한 활선애자와 정상 활선 애자의 고유 진동수를 비교하여 결함 발생시 발생 가능한 현상을 분석하였다.

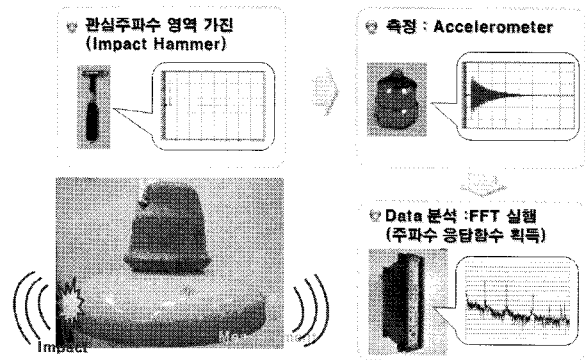
### 2. 본 론

#### 2.1 실험개요

단일 애자 동특성 분석 실험은 송전선 선로에 가장 많이 사용되는 NGK210, KRI210, NGK300 및 KRI300 4가지 종류의 애자에 대해 수행하였다. 실험 절차는 〈그림 2〉에 도시하였다. 단일 애자를 자유단조건(Free-Free)을 만든 후 임팩트해머(Impact Hammer)로 가진하여 가속도계(Accelerometer)를 통하여 애자의 응답 특성을 측정한다. 계측기는 임팩트 해머에 부착되어 있는 힘센서(Force Sensor) 및 가속도계에서 측정되는 신호를 식 (5)[5]를 사용하여 주파수 응답함수로 변환한다.

$$FRF = \frac{P_{xy}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (5)$$

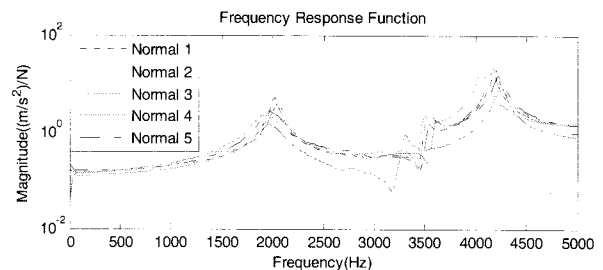
식(5)에서  $P_{xx}(f)$ 는 임팩트 해머에서 측정되는 힘 신호의 Power Spectral Density이며,  $P_{xy}(f)$ 는 힘에 대한 가속도 신호의 Cross Power Spectral Density이다. 주파수 응답함수에 의하여 각 주파수에서의 단위 힘에 대한 애자 거동 가속도의 크기를 측정할 수 있으며 이를 통하여 활선 애자의 동특성 측정이 가능하다.



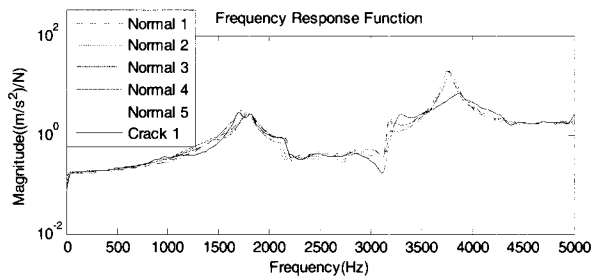
〈그림 2〉 Schematic diagram of Experiment

#### 2.2 실험 결과 분석

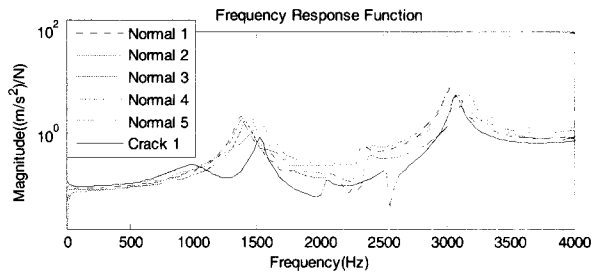
송전선 애자의 동특성 분석 실험 수행시 추후 애자 결함 검출 알고리즘 개발할 때 CPU 성능, 데이터 양 및 계산시간을 고려하여 2개의 고유 진동수만 관찰하기로 하였다. 이에 따라 KRI210 및 NGK210은 0~5000Hz를, KRI300 및 NGK300은 0~4000Hz를 관심주파수 영역으로 설정하였다. KRI210은 자연적으로 파손된 애자 시편이 없어 정상 애자 5개만 동특성 실험을 수행하였으며, NGK210 및 KRI300은 정상애자 5개 파손애자 1개, NGK300은 정상애자 4개, 파손애자 1개에 대하여 실험을 수행하였다.



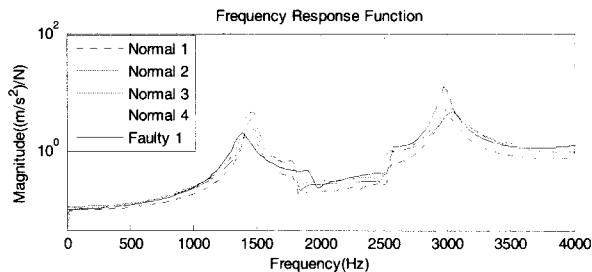
(a) KRI210



(b) NGK210



(c) KRI300



(d) NGK300

<그림 3> Frequency Response Function

<그림 3>에는 관심 주파수 영역에서 각 애자의 주파수 응답 함수를 측정하여 도시하였다. 동일한 종류의 애자도 고유 진동수 위치가 25~200Hz까지 다양하게 변화함을 관찰 할 수 있다. 애자는 고온의 화로에서 제조하기 때문에 제조 과정에서 화로의 국부 온도 변화, 재료의 종류 및 미세한 비율 변화와 같은 제작 조건에 따라 특성 변화가 발생하는 것으로 생각된다. 파손된 애자는 거동 특성이 정상 애자와 상이하며 다음과 같은 현상이 나타날 수 있다. 첫째로 질량이나 강성의 변화로 인하여 고유 진동수 위치가 증가 또는 감소될 수 있다. 둘째로 감쇠의 변화로 인하여 고유 진동수 진폭의 크기가 변화 될 수 있으며 경화가 진행되면 고유 진동수 진폭의 크기가 증가하며 연화가 진행되면 고유 진동수 진폭의 크기는 감소한다. 이러한 현상들은 시스템의 동특성을 나타내는 질량, 강성, 감쇠의 변화로 나타나는 현상으로 열화 진행에 따라 고유진동수가 변하는 것을 관찰하면 애자의 교체 시기를 판단할 수 있다는 것을 유추할 수 있다.

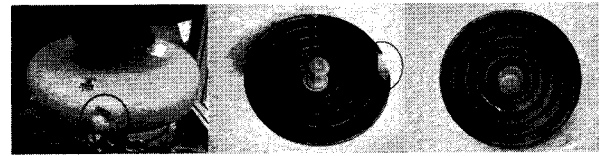
<표 1>에는 네 종류의 애자의 주파수 응답 함수를 분석하여 각 고유 진동수 위치와 고유 진동수 진폭을 정리하여 도시하였다.

NGK210 파손 애자는 첫 번째 고유진동수가 정상 애자에 비하여 낮으며, 두 번째 고유진동수의 위치는 정상애자보다 높고 진폭은 크게 감소하였다. 주파수 응답 함수를 보면 첫 번째 고유진동수의 피크는 두 개로 분리되며 두 번째 고유진동수는 사라진 것을 관찰 할 수 있다. KRI300 파손 애자는 첫 번째 고유진동수 진폭이 크게 감소하는 현상이 발생하였으며 전체적인 응답의 크기가 작은 것을 관찰할 수 있다. NGK300 파손 애자는 첫 번째 고유진동수 위치 및 진폭이 감소하였으며, 두 번째 고유진동수의 위치가 감소하였다. 세 개의 파손 애자 모두 정상 애자의 응답 특성과는 다른 거동을 보였으며 앞에서 언급한 것과 같이 파손으로 인하여 고유 진동수의 위치 또는 진폭이 변하는 현상이 발생하였다. 실험 시편이 적기 때문에 정상 애자의 정확한 고유진동수 및 진폭을 결정하기 위해서는 후후 정상 애자 및 파손애자에 대한 많은 실험을 통하여 데이터베이스(Database)를 구축이 필요하며, 이를 통하여 정상 애자의 정확한 고유 진동수 위치에 대한 기준이 확립되면 고유 진동수의 위치 및 진폭을 통하여 파손 애자를 검출하는 것이 가능하다. 또한 현장에서는 제품의 제조사에 대한 구분 없이 애자가 설치되어 있으므로 향후 제조사에 대한 구분 없이 손상 애자 검출 가능한 방법이 구축된 데이터베이스를 기반으로 연구·개발되어야 한다.

<표 1> Frequency & Frequency Amplitude Variation

	States		1st N. F.		2nd N. F.				
			Freq.	Mag.	Freq.	Mag.			
	KRI 210	Normal	Max 2050 Min 1950	100	5.3 3.8	4250 4050	200	20.8 9.5	11.3
NGK 210	Normal	Max 1775 Min 1750	50	3.3 2.5	0.8	3775 3750	25	22.8 18.2	4.6
		Crack	1700	2.9	3875	7			
KRI 300	Normal	Max 1525 Min 1375	150	3.6 1.9	1.7	3150 3025	125	12.7 4.2	85
		Crack	1525	1	3075	6.5			
NGK 300	Normal	Max 1475 Min 1425	50	4.7 2.3	2.4	3125 3000	125	14.4 3.9	10.5
		Crack	1375	2.1	2975	12.9			

<그림 4>에는 본 실험에 사용된 NGK210, KRI300, NGK300 파손애자를 도시하였다. 본 그림을 통하여 애자의 파손은 특정한 부분에 집중되는 것이 아니라 임의의 위치에서 임의의 크기로 파손되며, 외부 파손은 육안으로 판별 가능하지만 절탐에 설치된 경우 내부 파손을 육안으로 판별이 불가능하다. 또한 미세한 파손은 바로 절연저항의 감소를 유발하지 않기 때문에 단순히 절연저항 측정을 통하여 검출하는 것이 어렵지만 장기적으로 열화가 진행됨에 따라 절연저항이 감소하고 정전사고를 유발시킬 것이기 때문에 예방점검을 통하여 검출 및 교체 작업이 시행되어야 한다. 그러므로 이러한 파손 상태를 점검 가능한 주파수 응답 함수 분석을 통한 애자 점검 방법은 매우 간단하면서도 효과적인 방법이라고 할 수 있다.



(a) NGK210 (b) KRI300 (c) NGK300

<그림 4> 결함 애자

### 3. 결 론

본 연구에서는 비파괴 상태 진단 방법의 하나인 주파수 응답 함수 측정을 통하여 활성 애자의 고유 진동수의 위치 및 크기를 측정하였으며, 이를 통하여 애자 파손시 고유 진동수의 위치 및 크기 변화를 관찰 및 발생 가능한 다양한 현상들을 도시하였다. 일반적으로 사용되는 절연저항 측정을 통한 상태 감시 방법은 예방정비 수행시 기계적인 파손에 의한 결함은 검출이 불가능하여 향후 불시 정전과 같은 사고 발생의 위험 계가 어렵지만 본 연구에서 제안하는 애자의 고유진동수 분석을 통한 열화 상태를 점검 방법은 기계적인 파손 또한 감지가 가능하여 예방정비에 적용되면 탁월한 효과를 발휘할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G. H. Vaillancourt, J. P. Bellerive, M. St-Jean, and C. Jean, "New Live Line Tester for Poclain Suspension Insulators on High-Voltage Power Lines." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 208~219, January 1994.
- [2] JULIUS S. BENDAT ALLAN G. RIEBSOL, "Random Data Analysis and Measurement Procedures", WILEY INTER SCIENCE, pp 31~32, 2000
- [3] Daniel J. Inman, "ENGINEERING VIBRATION 2nd edition", 97~111, 2001
- [4] CYRIL M. HARRIS, "Shock and Vibration Handbook", McGRAW-HILL, pp11.6~11.7, 1961
- [5] Stoica. P., R.L. Moses, "Introduction to Spectral Analysis", Prentice-Hall, pp52~54, 1997