

Propagation of Partial Discharge Pulse in High Voltage Motor Stator Windings

金 熙 東*
(Hee-Dong Kim)

Abstracts - This paper is to investigate how partial discharge pulse signal can flow in 6.6kV motor stator windings. Pulse propagation is experimentally analyzed in stator windings using a variety of frequency-domain techniques. The experiments were performed on two stator windings in the laboratory. Spectrum analyzer(9kHz to 3GHz) with tracking generator(100kHz to 3GHz) was used. Sweep time of the tracking generator was 100ms. The frequency spectrum of the response signal was detected by active FET probe(1GHz). The active FET probe has a flat amplitude response up to 1GHz without high frequency attenuation. The stator winding acts as a low-pass filter below 600kHz, the high-frequency components being highly declined. The resonance peaks show about 1.1MHz and 2MHz in low frequency of No. 1 and No. 2 stator windings, respectively. This low-frequency range indicates that attenuation is low. The peaks of partial discharge magnitude show about 900kHz, 1.6MHz in No. 1 stator winding and about 800kHz, 1.4MHz in No. 2 stator winding.

Keyword -

1. 서 론

고압전동기 고정자 권선 결함은 제작할 때 존재하거나 장기간 운전되는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적인 열화에 의해 복합적으로 형성된다. 결함 위치에 따라 내부방전, 슬롯방전, 표면방전 및 트리잉방전 등 여러 가지 부분방전(partial discharge) 패턴이 발생한다. 실제로 고압전동기 고정자 권선에서 절연열화 정도를 적절하게 평가하기 위해 부분방전 펄스 전송 특성에 대한 분석이 필요하다.

고압전동기 고정자 권선 내부에서 발생하는 부분방전 펄스는 시간과 더불어 크게 변화하고 각 상의 끝단(중성점측)에서도 감지할 수 있다. 고정자 권선은 복잡한 전기 시스템으로 이루어져 있으며, 슬롯내부는 접지측에 대한 캐패시턴스(전형적으로 ~5nF)와 써지 임피던스(~30Ω)로 구성되어 송전선의 특성을 갖는다. 슬롯 바깥측 단말권선(endwinding)에서는 써지 임피던스를 정의할 수 없으나, 대신에 상대 코일에 대한 강한 상호 캐패시턴스를 갖을 뿐만 아니라 인덕턴스도 나타난다[1].

슬롯내부가 송전선 구조를 갖기 때문에 부분방전 펄스는 초기에 고속 단극펄스(unipolar pulse) 모양으로 나타난다. 슬롯 길이와 절연재료의 유전율에 의존하여 주파수와 더불어 진동(oscillation)을 발생시킨다. 단말권선에서 부분방전 펄스도 역시 초기에 고속 단극 펄스가 발생하고 일반적으로 다른 주파수를 포함하는 진동이 일어난다. 결과적으로 고정자 권선에서 다양한 주파수가 부분방전 펄스에 의해 발생되어 펄스 상승시간과 결합하여 어떤 주파수에 도달한다.

본 논문은 정격전압 6.6kV급 고압전동기 고정자 모델 권선에서 부분방전 펄스 신호의 전송 특성을 분석하였다. 스

펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 사용하여 주파수 특성을 분석한 결과 고압전동기 고정자 모델 권선은 대략 600kHz 이하의 주파수에서 편평한 전송 특성을 보이는 저역필터(loss-pass filter) 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 그리고 저주파수 영역인 1.1MHz와 2MHz 부근에서 각각 펄스의 공진이 발생하였으며, 고주파수 영역에서는 현저한 감쇠를 나타내었다.

2. 시험방법

2.1 펄스 전송의 시험

6.6kV급 고압전동기 고정자 권선의 모델 코일(multiturn, 5턴)을 두 가지 방법으로 제작하였다. 동도체의 크기는 6.45×3.85mm이며, 주절연은 마이카/에폭시 테이프, 반도체층 및 판형 슬롯으로 구성되어 있다. 판형 슬롯과 웨지를 설치하여 실제 고정자 권선을 모의하였으며, No. 1 권선은 5턴과 No. 2 권선은 10턴(2병렬 5턴)으로 설계하였다.

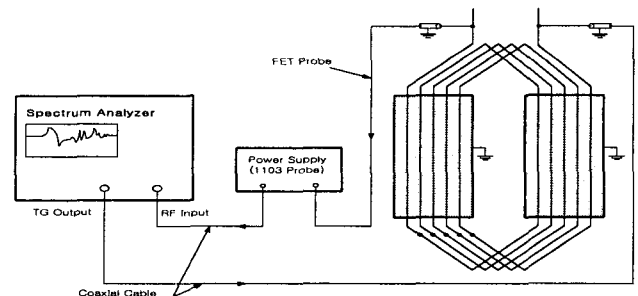


그림 1 펄스 전송시험의 기본 구성도

Fig. 1 Measuring Arrangements of Pulse Propagation Tests

* 正 會 員 : 韓 國 電 力 研 究 員 선 임 연구원
接受日字 : 2003年 7月 28日
最終完了 : 2003年 10月 16日

그림 1은 고압전동기 고정자 권선의 모델 코일에서 부분방전 펄스 전송시험의 기본 구성도를 나타냈으며, 트래킹 제너레이터(tracking generator, 100kHz~3GHz)가 설치된 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer, Anritsu-MS2661A, 9kHz~3GHz), FET(Fast Fourier Transform) probe(P6243, 1GHz, Tektronix), 1103 probe 전원공급장치(Tektronix) 및 Notebook PC를 사용하였다. 스펙트럼 분석기 TG Output(50Ω)에서 모델 코일 입력측과 RF Input(50Ω)에서 1103 probe 전원공급장치까지는 각각 동축케이블(coaxial cable, 3D-2V, 50Ω)을 사용하고 전원공급장치에서 모델 코일의 측정점까지는 FET probe를 연결하였다. 모델 코일의 슬롯, 입력측에 연결된 동축케이블 및 측정점에 연결한 FET probe는 동일한 접지에 연결하였다. 스펙트럼 분석기에서 얻어진 데이터를 RS232 통신케이블을 사용하여 Notebook PC에 저장하고 다시 모든 데이터를 Notebook PC에서 Spectrum Wave Form, Microsoft Excel 및 Igor Pro 3.14(WaveMetrics Inc)등의 기본 프로그램을 사용하여 크기(dB)와 주파수(100kHz~1GHz) 사이의 관계를 나타내었다. 스펙트럼 분석기는 설정된 주파수 영역에서 측정할 수 있는 데이터가 최대 500개 이며, 100kHz에서 1GHz까지 주파수 범위를 표 1과 같이 20개 영역으로 분리하여 총 10,000개의 데이터를 가지고 그림 2와 같이 하나의 그림을 그렸다.

표 1 측정 주파수 범위

Table 1 Frequency Measurement Ranges

No.	주파수 범위	No.	주파수 범위
1	100~200kHz	11	20~30MHz
2	200~400kHz	12	30~40MHz
3	400~600kHz	13	40~50MHz
4	600~800kHz	14	50~70MHz
5	800~1000kHz	15	70~100MHz
6	1~2MHz	16	100~200MHz
7	2~4MHz	17	200~300MHz
8	4~7MHz	18	300~500MHz
9	7~10MHz	19	500~700MHz
10	10~20MHz	20	700MHz~1GHz

2.2 Narrow-band에서 부분방전 측정

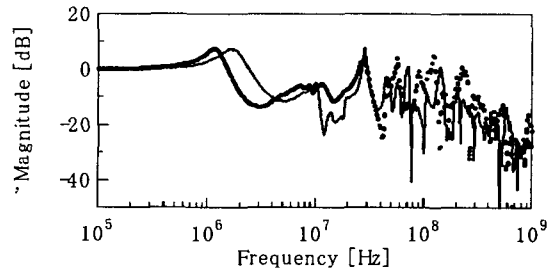
고압전동기 고정자 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선의 Narrow-band 범위에서 부분방전 크기를 측정하였다. 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 셰링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector : PDD, Tettex Instruments Type 9124)를 사용하였다. 셰링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283)와 브리지(Bridge, Type 2818)로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선에 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 각각 3.81kV, 4.76kV 및 6.6kV까지 변경하였다. 동시에 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)를 고정자 권선에 연결하고

부분방전 측정기에서 중심 주파수를 200kHz~2MHz까지 변경하면서 부분방전 크기를 측정하였고 선택할 수 있는 밴드폭은 ±30kHz 이다. 부분방전 크기를 측정하는 주파수마다 10,000pC으로 캐리브레이션(calibration)을 위해 캐리브레이터(calibrator, Tettex Instruments, Type 9120)를 사용하였다.

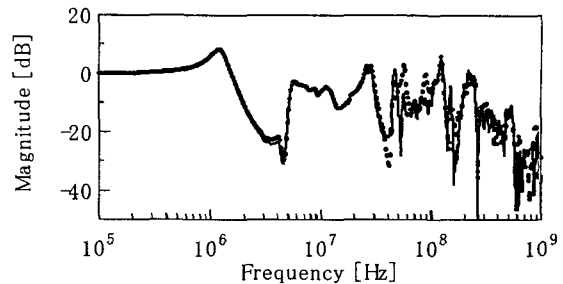
3. 시험결과 및 고찰

3.1 부분방전 펄스 전송상태 분석

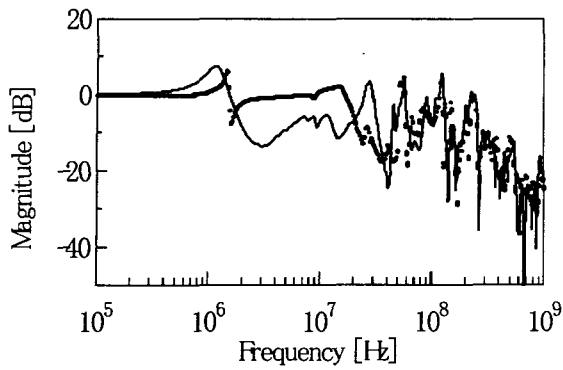
6.6kV급 고압전동기 고정자 권선에서 부분방전 펄스 전송상태를 확인하기 위해 감쇠(attenuation) 크기와 주파수 사이의 관계를 분석하였다. 그림 2(a)는 고압전동기 고정자 권선의 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선에 대한 감쇠 크기와 주파수 사이의 관계를 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선은 대략 600kHz이하의 주파수에서 편평한 전송 특성을 보이는 저역필터(loss-pass filter) 특성을 갖고 있다. 편평한 전송 특성으로 인해 저주파수 영역에서 부분방전 펄스 신호는 손실과 반사작용 없이 진행파 성분으로 전송된다. 따라서 저주파수 영역에서 부분방전 펄스의 에너지는 크게 손실되지 않고 일정한 크기를 유지하면서 부분방전 분석기에 도달한다[2]. 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선의 저주파수 영역에서는 각각 2MHz와 1.1MHz 부근에서 공진이 발생하고 있으며, 20MHz 이상의 고주파수 영역에서도 3~4개의 공진이 발생하다가 300MHz 이상에서는 현저한 감쇠가 발생하고 있다.



(a) No. 1과 No. 2 권선 사이의 비교



(b) No. 2 권선에서 병렬 권선 사이의 비교



(c) No. 2 권선의 접지와 비접지 사이의 비교

그림 2 No. 1과 No. 2 권선에 대한 주파수 특성
Fig. 2 Frequency Characteristics of No. 1 and No. 2 Stator Windings

저주파수 영역에서 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선의 공진 주파수 차이는 턴수(turn number)가 다르기 때문이다. 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선은 각각 5턴과 10턴(2병렬 5턴)으로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선에서 부분방전 펄스 신호가 더 많은 턴수를 통과하여 진행할수록 과도한 공진 주파수는 저주파수쪽으로 이동한다[2]. 즉, 고정자 권선의 임피던스가 증가할수록 공진 주파수가 낮아지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 실제적으로 회전기에서 주파수 전송상태를 시험할 경우에 멀티턴(multiturn) 코일을 사용하는 고압전동기, 수력발전기 및 터빈발전기 순서로 과도한 공진 주파수는 저주파수쪽으로 이동할 것이라고 예측할 수 있다.

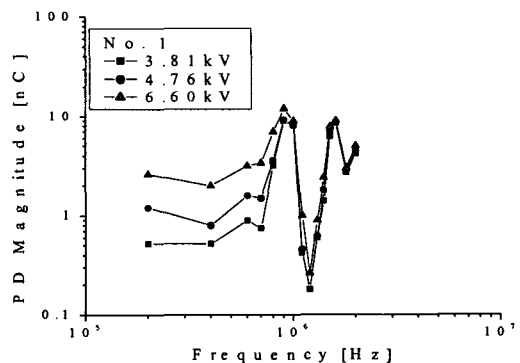
고주파수 영역에서 부분방전 신호의 감쇠는 명백하게 관찰할 수 있으며, 중심주파수 이상에서 감쇠를 시작하여 전형적으로 30~40dB 정도까지 이른다. 20~200MHz 사이에서 공진 피크가 넓게 분포되어 있으며, 공진은 슬롯내부에 있는 권선이 송전선 특성을 갖기 때문이다. 따라서 공진과 감쇠 발생은 단말권선(overhang)의 영향으로 판단된다[3, 4]. 공진 피크의 크기가 0dB 이상으로 크게 나타나는 것은 부분방전 신호가 권선을 통과하면서 감쇠하는 대신에 오히려 높게 증폭되는 것으로 해석할 수 있다. 전자기 전송과 같이 좀더 느린 영역에서 고정자 권선은 인덕턴스와 캐패시턴스로 결합된 코일 혹은 바는 송전선으로 취급되고 있다. 각 코일 혹은 바의 길이, 각 병렬회로의 수에 의존하여 모든 권선은 유일하게 정해진 공진 주파수를 갖고 있다. 만약에 센서/측정시스템의 통과 밴드가 이들 주파수 중에 하나와 일치하면 측정된 부분방전 크기는 비정상적으로 높게 나타난다. 그러한 공진으로 인해 고정자 권선에서 전송된 부분방전 펄스가 변형(distortion)되어 특히 부분방전 분석기에 도달하면 어떤 정해진 주파수 영역에서 오히려 감소된다[5]. 따라서 부분방전이 발생할 수 있는 권선 내부의 여러 영역에서 정확한 측정이 어렵게 됨에 따라 결과적으로 측정된 부분방전 크기에 대한 해석이 더욱 어려워진다.

그림 2(b)에서 나타낸 바와 같이 모델 코일 No. 2 권선에서 2병렬 5턴을 각각의 5턴으로 분리하여 감쇠 크기와 주파수 사이의 관계를 측정한 결과 1.3MHz에서 공진이 발생하고 있으며, 두 개의 주파수 특성은 거의 일치하였다. 그림

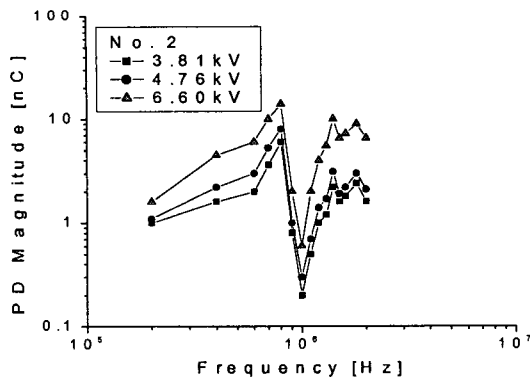
2(c)에서 보인 바와 같이 모델 코일 No. 2 권선의 철심(core)을 접지에 연결했을 때와 분리했을 때를 비교하였다. 비접지 권선은 철심과 접지 사이에 캐패시턴스의 변화에 따라 주파수 특성이 변화하고 있다. 부적절하게 접지된 고정자 철심과 프레임(frame) 같은 경우에 두개의 인접 도체 사이에서 통로가 짧기 때문에 코일 사이의 결합계수를 증가시킨다. 반면에 완벽하게 접지된 철심과 프레임은 코일 사이의 결합 효과를 감소시킨다[6].

3.2 Narrow-band에서 부분방전 분석

고압전동기 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선의 저주파수 영역에서 발생하는 공진현상에 대해 실제적으로 주파수 변화에 따라 부분방전 펄스 전송상태가 근본적으로 어떻게 변화하는지를 확인하기 위해서 Narrow-band에서 분석하였다. 외부 전원장치를 이용하여 직접 모델 코일에 전압을 인가하면서 부분방전 크기를 측정하였다. 고압전동기 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선은 각각의 인가전압에서 중심 주파수를 200kHz~2MHz까지 변경하면서 부분방전 크기를 측정하였고 선택할 수 있는 밴드폭은 ±30kHz 이다. 외부 전원장치에서 인가전압을 3.81kV, 4.76kV 및 6.6kV까지 변경하면서 No. 1과 No. 2 권선의 부분방전 크기를 측정하여 그림 3(a), (b)에 나타내었다. No. 1과 No. 2 권선의 부분방전 크기를 분석한 결과 각각 900kHz와 800kHz에서 가장 크게 나타났으며, 그 다음 피크는 각각 1.6MHz와 1.4MHz에서도 나타났다. 그림 2(a)에서 보인 바와 같이 공진이 발생하는 주파수 범위에서 실제적으로 부분방전의 피크값이 나타나고 있음을 확인하였다. 그러나 Narrow-band에서 측정된 부분방전 크기는 200kHz~2MHz 범위의 중심 주파수에서 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선이 각각 1.2MHz와 1MHz에서 부분방전 크기가 가장 낮게 측정되었다. 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선의 저주파수 영역에서 공진이 한 곳에 나타나는 것에 비해 부분방전 크기의 피크값은 두 곳에서 발생함에 따라 향후 이러한 현상에 대해 좀 더 깊은 연구가 필요하다. 인가전압 증가에 따른 부분방전 크기도 모델 코일 No. 1 권선은 3.81kV, 4.76kV 및 6.6kV로 증가됨에 따라 200kHz~800kHz 범위의 주파수에서는 현저한 차이를 보이고 있으나 900kHz 이상에서는 거의 일치하였고, No. 2 권선은 전체적인 주파수 범위에서 현저한 차이를 나타내었다.



(a) No. 1 권선



(b) No. 2 권선

그림 3 No. 1과 No. 2 권선의 부분방전 특성

Fig. 3 Partial Discharge Characteristics of No. 1 and No. 2 Stator Windings

4. 결 론

6.6kV급 고압전동기 고정자 모델 코일에서 절연연화 정도를 적절하게 평가하기 위해 부분방전 펄스 전송상태와 Narrow-band 범위에서 부분방전 시험 결과를 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 고압전동기 고정자 모델 코일은 대략 600kHz 이하의 주파수에서 편평한 전송 특성을 보이는 저역필터 특성을 갖는다. 모델 코일 No. 1과 No. 2 권선은 저주파수 영역에서 2MHz와 1.1MHz에서 공진이 발생하고 있으며, 20MHz 이상의 고주파수 영역에서도 3~4개의 공진현상이 발생하고 있으나 300MHz 이상에서는 현저하게 감쇠하였다. 따라서 모델 코일의 턴수가 증가할수록 공진이 저주파수 영역으로 이동하고 있음을 확인하였다.

(2) 인가전압을 3.81kV, 4.76kV 및 6.6kV까지 변경하면서 주파수 변화에 따른 부분방전 크기를 분석한 결과 모델 코일 No. 1 권선은 각각 900kHz와 1.6MHz, No. 2 권선은 각각 800kHz와 1.4MHz에서 피크값을 나타내었다. 이와 같은 주파수 대역은 부분방전 펄스 전송상태에서 공진이 발생하는 주파수 범위와 유사하게 나타나고 있음을 확인하였다. 그러나 저주파수 영역에서 공진이 한 곳에 나타나는 것에 비해 부분방전 크기의 피크값은 두 곳에서 발생함에 따라 향후 이러한 현상에 대해 좀 더 깊은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] G. Stone, "Importance of Bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators", IEEE Trans. on Dielectrics and Electr. Insul., Vol. 7, No. 1, pp. 6-11, 2000.
 [2] J. Kemp, H. Zhu, H. G. Sedding, J. W. Wood and W. K. Hogg, "Towards a new partial discharge calibration strategy based on the transfer function of machine stator windings", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 143, No. 1, pp. 57-62, 1996.

[3] J. W. Wood, H. G. Sedding, W. K. Hogg, J. Kemp, H. Zhu, "Partial discharge in HV machines ; considerations for a PD specification", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 140, No. 5, pp. 409-416, 1993.
 [4] Q. Su, C. Chang and R. C. Tychsen, "Travelling Wave Propagation Partial Discharges Along Generator Stator Windings", Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, pp. 1132-1135, 1997.
 [5] IEEE Std 1434-2000, IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
 [6] I. J. Kemp and C. Zhou, "Measurement Strategies for PD Testing and Pulse Propagation in Stator Windings", IEEE International Symposium on Electr. Insul., pp. 214-217, 1996.

저 자 소 개



김희동(金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 일본 큐슈공업대학 초빙연구원. 1990년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 선임연구원

주관심분야 : 고압회전기 절연진단, 수명평가, 절연재료 분석, 운전중 감시 시스템 개발 및 부분방전 펄스 전송
 Tel : 042-865-5261, Fax : 042-865-5304
 E-mail : hdkim@kepri.re.kr