

고압전동기 고정자 권선의 PRPD 부분방전 결함신호 해석

Analysis on Partial Discharge Fault Signals of PRPD for High Voltage Motor Stator Winding

박재준^{1,a}, 이성룡², 문대철²
(Jae-Jun Park^{1,a}, Sung-Young Lee², and Dae-Chul Mun²)

Abstract

We simulated insulation defects of stator winding wire on high voltage generator by 5 types. 4 types have one discharge source and other one has multi discharge source by simulation. For accurate decision, measurements used to PRPD pattern to occurred partial discharge source of various types. In this research, when PRPD pattern carried out or analyzed pattern recognition of discharge source, it used to powerful tools. In this result, PRPD pattern defined to have single discharge source of 4 types by insulation defect. When insulation defect simulated, all the defected winding have not the same result. Errors for a little different can make mistakes from a subtle distinction. The difference between internal and void discharge have magnitude of pulse amplitude of inner discharge bigger than void discharge and have a shape of bisymmetry. But void discharge has a shape of bisymmetry against maximum value on polarity respectively. In cases of slot and surface discharge, we confirmed to show similar results those other researchers. In case of multi-discharge, as a result of we could classify not perfect match with occurred patterns in single discharge eachother. In the future, we will have to recognize and classify with results of multi-discharge.

Key Words : PRPD, Partial discharge pattern, High voltage motor, Model coils fault

1. 서 론

거대한 회전기의 고정자권선 절연의 사고가 서비스 중 예기치 못한 갑작스런 발생은 경제, 사회적으로 큰 영향을 가져온다. 이런 사고를 미연에 예방하기 위해서 온라인/오프라인 등 병행하여 진단하고 있다. 진단을 위한 신호의 계측 및 평가 시 가장 중요한 측정기법이 부분방전을 계측하는 것으로 귀결되었다. 부분방전(Partial Discharge: 이하 PD)측정은 오래전에 발전기에서부터 시작되어졌다 [1]. 그러나 오늘날에도 여전히 고압전동기 나 발

전기 PD을 계측하여 어떻게 진단을 실행하여야 하는지 표준화된 규칙이나 또는 독특한 과정이 없다. 그렇지만, 구체화된 조건에서 고압전동기 고정자권선으로부터 계측된 PD펄스들의 상호관계에 대하여 오랜 시간에 걸쳐 많은 노력이 진행되어 지고 있다. 다양한 PD 계측 기법도 진행되고 있다. 즉 고정자 슬롯 바로 앞에서 안테나를 이용한 전자기신호 계측[2]과 단순한 AM라디오를 이용하여 탐지하는 방법도 있었다[3]. 또한 고정자권선의 중성점(Neutral Point)주변에 고주파전류센서(HF-CT: High Frequency Current Transformer)에 연결하여 계측하는 기법도 상용화 및 연구되고 있다. 가장 광범위하게 고압회전기 진단을 위한 부분방전 신호계측 시 이용하고 있는 기법 즉, 기기의 단말 또는 기기와 개별적으로 병렬회로를 구성하여 직접적으로 용량성 커플러에 연결하여 측정하는 온라인 커플링(on-line coupling)방법 등이 있다[4,5].

1. 중부대학교 전기전자공학과
(충남 금산군 추부면 대학로 101)
2. 호서대학교 정보통신공학과
a. Corresponding Author : jjpark@joongbu.ac.kr
접수일자 : 2006. 7. 5
1차 심사 : 2006. 9. 12
심사완료 : 2006. 9. 19

위와 같은 수많은 계측기법이 발달되어져도 정확하게 PD 펄스 평가와 PD발생원의 근본적인 신호분류가 아직도 미미한 상태에 있다 할 것이다. 또한 종래의 경우 단일한 PD방전원만을 고려하여 연구가 진행되었지만, 현장의 경우는 단일방전원과 다중방전원이 병행하여 진행됨으로서 단일방전과 다중방전원을 병행하여 연구가 진행될 필요가 있다.

이런 이유로 본 연구에서는 고압전동기 부분방전 측정을 위해, 단일방전원과 다중방전원(Multiple PD Sources) 고정자권선의 절연결함을 모의하여 진행하였다. 부분방전 특성의 징후(Signature)가 전체에 걸쳐 PRPD(phased Resolved Partial Discharge) 패턴이 겹쳐져 복잡한 패턴 결과를 가져올 것이다. 비전문가들의 경우는 유일한 단일방전원의 종류도 식별하기 어려울 것이다. 특히 다중방전원의 경우 식별하기는 더욱 어려울 것이다. 그리하여 수많은 연구결과를 분석검토로부터 얻어진 결과는 다중방전원 PD패턴 인식은 아직 해결되지 못하는 문제로 드러나고 있다. 이런 점이 연구의 목적 및 필요성이 되고 있다.

2. 실험 및 측정시스템

2.1 모의 결합권선의 제작

고압전동기 고정자권선의 예상된 결함을 모의 수행하기 위하여 전문가들과 상의한 결과 고정자권선의 모델코일을 제작하였다. 6.6 kV급 고압전동기 고정자권선을 모의한 절연결함을 실시하였다. 절연결함의 종류는 가장 흔히 작업공정 상 내포할 수밖에 없는 결함으로서 내부방전(Internal Discharge), 인공적으로 큰 보이드를 모의한 방전(Void Discharge: 두께0.8 mm, 지름16 mm, 길이270 mm), 운전상에서 나타나는 방전의 일환으로서 슬롯방전(Slot Discharge), 표면방전(Surface Discharge) 등 4개의 단일방전원을 모의하였다. 그러나 실제현장에서 열화가 진행되는 작업환경 및 열화의 여러 조건에 의하여 대체적으로 1개 이상의 방전원이 발생이 이루어진다. 이점에 착안하여 연면방전과 보이드방전을 중첩시켜 다중방전을 실제 모의권선을 제작하였다. 실험은 실험실상에서 실시하였으며, 교류 6.6 kVrms을 인가한 PRPD 측정장치를 이용하여 부분방전 패턴을 계측하였다. 모의권선은 하나의 모의결함방전을 위하여 4개를 제작하였으며, 인공적으로 제작된 모의권선으로서 측정신호의 결함에 대한 신뢰를 높이기 위해서, 측정 계측신호 패턴은 최소 2개 이상의 권선에서 발생된 부분방전 결함신호패턴으로 하였다. 이상의 모의결함권선의 제작된 결과는 그림 1에서 나타낸 형상으로 제작된 것이다.

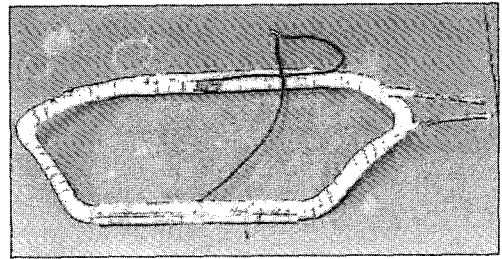


그림 1. 모델권선.

Fig. 1. Model winding.

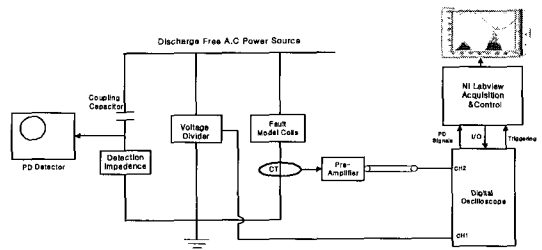


그림 2. 부분방전 측정시스템.

Fig. 2. Measuring system of partial discharge.

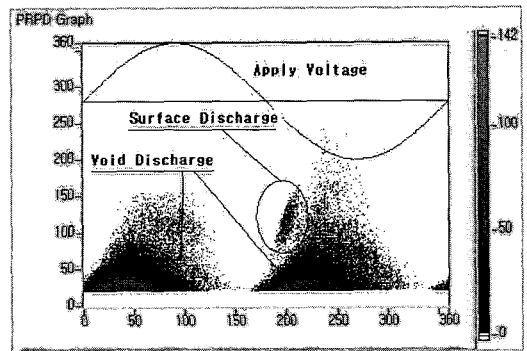


그림 3. 다중 방전원을 갖는 부분방전 패턴.

Fig. 3. Partial discharge pattern having multiple PD sources.

2.2 부분방전 취득 시스템

PD신호들은 고전압발생장치 (Hafely TE571, IEC6027방식)을 이용하여 교류 6.6 kVrms을 모의 결합권선에 인가하였다. 부분방전검출은 고주파전류센서 (High Frequency Current Transformer: HF-CT: -3 dB기준으로 2~25 MHz) 을 통한 출력된 신호와 분압기를 통하여 발생된 인가전압 위

상각의 신호를 PRPD (Phased Resolved Partial Discharge)패턴으로 결합신호를 매 1분마다 누적된 PRPD부분방전 패턴결합신호가 계속되어 컴퓨터에 저장하게 된다. Labview 프로그램을 통하여 제어 및 자료처리를 실시하였다. 그림 3의 경우는 실측된 다중 방전원을 갖는 PRPD패턴으로서 보이드방전과 연면방전을 중첩하여 모의한 경우의 PD 패턴을 나타내고 있다. 실험시스템 구성 및 블럭도는 그림 2에서 나타내었다.

3. 실험결과 및 검토고찰

3.1 부분방전 패턴분류

3.1.1 내부방전(Internal discharge)

그림 4에서는 내부방전의 PD패턴을 나타내고 있으며, 절연체 내의 미소보이드(microvoid)로 구성된 보이드방전의 일종으로서, 내부방전 활동은 정상동작 조건하에서도 존재하는 방전이다. 내부방전은 내부의 PD개시전압 레벨보다 낮은 전압에서도 일어나고 있음을 연구자들은 말하고 있다[5]. 또한 내부방전은 최대 진폭에 대칭적인 패턴을 갖고 그리고 인가전압 사이클(applied voltage cycle)의 정극성(positive Polarity)과 부극성(negative polarity)에서 비교하여 보아도 대칭적인 방전패턴임을 볼 수 있다. 내부방전은 다른 방전에 비하여 상대적으로 미약한 방전으로 오손된 트래킹의 표면방전에 비하여 1000~20배의 큰 차이를 나타내는 방전이다[5].

3.1.2 슬롯 방전(Slot discharge)

일반적으로 슬롯방전의 존재는 서비스 중 사고

의 위험성이 증가되고 있음을 인정하고 있는 방전으로 볼 수 있다. 이 방전은 자기 코아와 고정자권선의 측면사이 공기 갭에서 일어난다. 이 경우는 여러 가지 경우에서 일어난다. 즉, 바(bar)의 반도체 코팅이 지나치게 저항성일 경우 또는 bar진동의 결과로서 코팅 침식은 금속의 접지된 코아에서 만나는 고전압에 발가벗는 절연만을 남기게 될 때이다. 본 연구실에서는 권선을 모의하기 위하여 bar의 한쪽 편에 반도체성 페인트가 떨어져나가는 경우로 모의하였다. 전압이 인가되어 6.6 kV까지 인가 후 360사이클 동안 누적된 PRPD패턴으로 나타낸 것이다. 최대진폭의 값은 내부방전 최대값보다 훨씬 큰 진폭 즉, 240 mV정도의 진폭을 측정할 수 있었다.

이 슬롯방전은 모든 자료들이 비대칭적인 방전을 항상 나타내고 있었다. 슬롯방전활동의 경우 PRPD패턴은 내부방전의 패턴과는 전혀 다른 패턴을 갖고 있었다. 전형적인 PRPD패턴은 방전의 진폭에 관계하여 비대칭적인 것으로 나타내었고 그리고 다른 저자들의 연구결과[2]를 볼 때, 부극성의 반파의 시작지 부분의 기울기가 매우 날카로운 패턴을 나타내었다. 본 연구에서는 모의권선의 계속된 결과를 비교하여 볼 때 완벽한 일치를 볼 수 없었지만 정, 부극성시 시작지에서 상당히 기울기가 큰 상태의 패턴이 유사함을 볼 수 있었다. 그림 5의 경우처럼 실선으로 패턴을 그려보았지만 이상적으로 나타나지 못했다. 역시 Claude[5]의 경우는 슬롯방전 시 인가전압을 증가시키면서 측정된 결과를 볼 때 PRPD패턴은 시작지에서 수직하게 급한 경사를 갖는 패턴으로서 패턴의 크기가 점진적으로 증가됨을 볼 수 있었다.

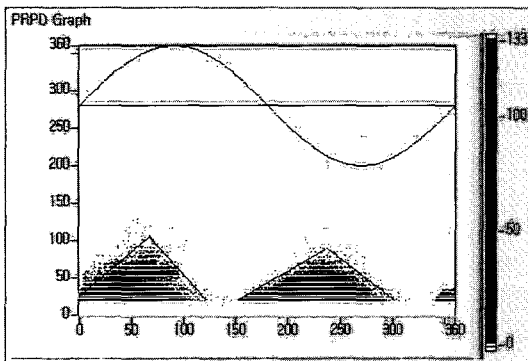


그림 4. 내부방전의 분포패턴.
Fig. 4. Distribution patterns of internal discharge.

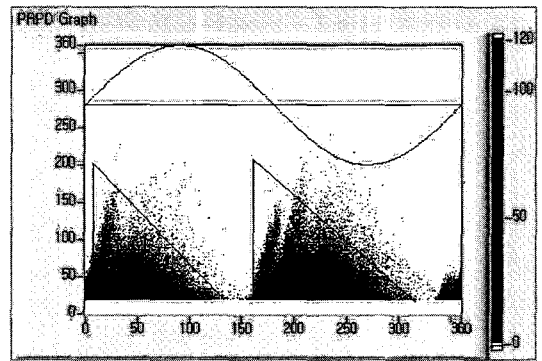


그림 5. 슬롯방전의 분포패턴.
Fig. 5. Distribution patterns of slot discharge.

3.1.3 보이드 방전(Void discharge)

그림 6에서 보이드 절연시스템의 경우, 보이드 방전은 위치에 따라 여러 가지로 불리어진다. 즉, 가장 일반적인 보이드방전은 내부방전을 지칭한 것이다. 즉 절연물 내에 미소의 보이드가 존재하는 형식의 방전을 말한다. 이는 앞서 서술한 내부방전의 경우를 의미한 것이다. 그리고 동도체와 절연물 사이에 인공적인 보이드를 형성시켜 방전을 일으킨 경우를 말한다. 이것은 본 연구에서 사용되어진 보이드 방전을 모의한 경우가 될 것이다. 또 하나의 경우는 절연물과 Iron Core사이의 보이드 방전을 의미한 것이다. 이는 일반적으로 슬롯방전으로 불리워진다. 연구에서 사용된 보이드방전은 인가전압은 교류 6.6 kV을 인가하였고 그 결과의 PRPD 는 그림 6에서 나타내었다.

내부방전의 경우와 비슷한 모의를 실시하였지만, 내부방전은 미소 마이크로 보이드가 다수 존재하는 경우를 말한다. 그러나 본 연구에서 모의한 보이드 방전은 두께: 0.8 mm, 지름: 16 mm, 길이: 270 mm를 갖는 보이드를 설계하여 모의 권선을 제작하였다. 그림 6의 경우 보이드방전의 패턴을 나타내고 있다. 내부방전보다 발생 진폭의 크기가 상대적으로 크고, 완전히 대칭적이지는 못하였다. 정극성보다 부극성의 진폭의 크기가 크지만, 위상에 따른 정극성 및 부극성에 대해서 비대칭적이고, 정극성 자체의 최대값을 기준으로 할 때 좌. 우가 대칭성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 보이드방전의 경우 내부방전과의 차이점은 부극성 진폭의 크기가 상대적으로 크고 정, 부극성이 비대칭적인 패턴으로 나타내었다.

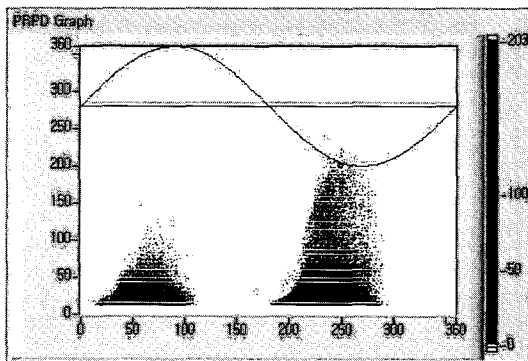


그림 6. 보이드방전의 분포패턴.
Fig. 6. Distribution patterns of void discharge.

3.1.4 표면방전(Surface discharge)

표면방전은 표면의 트래킹이 공기와 절연 계면에서 끝단의 암(arm)을 따라 형성되는 방전이다. 정상적으로 먼지나 또는 다른 오손물에 의하여 원인이 되고 또는 비정상적인 고온에 의한 나쁜 수행으로 한층 더 높아지게 된 것이다. 표면의 트래킹에 의해서 발생된 PRPD는 비대칭적인 패턴을 주어진다. 표면트래킹의 방전은 일반적으로 매우 큰 방전으로 알려져 있다. 그리고 특정부분의 위상각영역에 국한되어 수직으로 군집된 형태를 만든다. 그리고 강력한 표면의 방전이 일어나게 되면 매우 큰 방전이 수직으로 일어나게 된다[5]. 그러나 본 연구에서 표면방전은 오손에 의한 트래킹의 방전이 아니고 건조상태의 오손되지 않은 표면방전으로서 강력한 표면방전이 발생되지 않는다. 또한 수직하게 돌발적으로 때를 이루는 방전패턴도 발생하지 아니하고 거의 방전펄스 크기가 비슷한 펄스들이 수평하게 특정부분의 위상에 때 지어 발생된 패턴으로 표현할 수 있다.

3.1.5 다중방전(표면방전+보이드방전)

본 연구에서도 표면방전과 보이드방전을 중첩한 다중 방전원을 모의한 경우 그림 8에서 나타내었다. 그러나 본 연구의 모델권선에서 단일방전원인 보이드방전 패턴과 다중방전원의 경우 보이드부분에서 발생된 PD 패턴과는 상당히 유사한 패턴을 갖고 있음을 볼 수 있다. 즉 부극성의 경우 최대값을 중심으로 좌우가 거의 대칭적인 패턴과 부극성의 경우 정극성에 비하여 크게 나타나는 현상만으로도 볼 때 유사한 경우로 볼 수가 있다. 또한 그림 3의 PRPD를 볼 때 실선으로 표시한 부분이 연

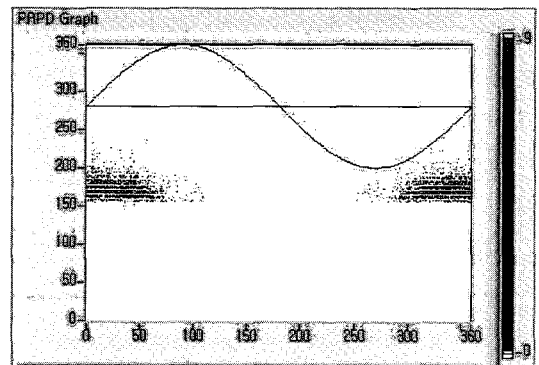


그림 7. 표면방전의 분포패턴.
Fig. 7. Distribution patterns of surface discharge.

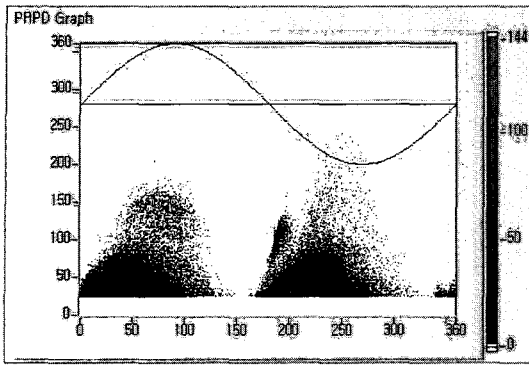


그림 8. 다중방전의 분포패턴.
 Fig. 8. Distribution patterns of multi-partial discharge.

면방전의 파형으로 볼 수가 있을 것이다. 일반적으로 연면방전의 경우는 특정위상각 200°의 근처에서 수직으로 어떤 Cluster를 형성하고 있는 경우로서 역시 여러 차례의 실험결과에서 발견된 경우로서 연면방전의 패턴으로 볼 수가 있다. 이와 같은 경우는 PRPD처럼 패턴을 통하여 전문가들만이 이해될 수 있는 경우로서 패턴화하여 디지털적으로 정량화하여 구별하기는 어렵다고 판단된다. 영상으로 취급할 때 여러정도로 취급될 수 있는 패턴으로 볼 수 있기 때문에 아날로그적인 방식과 디지털방식을 병행할 때 좀더 정확한 결함원 및 패턴을 진단할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

Labview 프로그램을 개발하여 PRPD법의 계측 기법으로 단일방전원 4가지 경우 내부방전, 보이드방전, 슬롯방전, 표면방전의 패턴을 구하였다. 또한 다중방전원을 모의한 보이드+표면방전의 실제측을 통하여 다중방전의 패턴을 구하였다. 각각의 결함에 대한 방전원에서 발생된 부분방전패턴이 독립적인 패턴을 갖고 있음을 알 수 있었다.

첫째, 내부방전의 경우 연구자 경우와 거의 일치하는 결과로서 위상축에 대해서 대칭적임을 확인하였다.

둘째, 보이드방전은 내부방전에 비하여 진폭의 크기가 상대적으로 크고 각 사이클 반파에 대해서 발생된 패턴은 최대값을 축으로 대칭적임을 알 수 있었다.

셋째, 표면방전은 표면의 오손과 같은 트레이킹을 모의하지 않았고 건조상태에서 표면의 방전을 실시하여 패턴을 구하였다. 진폭의 크기가 유사한 방전이 특정위상영역에서 발생되었고 비대칭적인 패턴을 갖고 있었다.

넷째, 슬롯방전은 몇몇 연구자에 의한 결과를 볼 때 부극성시 시작지에서 급격히 수직상승하여 기울기가 급한 패턴을 갖고 있지만 본 연구결과와는 유사함을 알 수 있었다.

다섯째, 다중방전의 경우 독립된 개개의 방전패턴을 확인할 수 있었고 향후 중첩된 이중의 결합신호를 분리하는 연구가 절대적으로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술(R-2005-B-139)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. S. Johnson, "Slot discharge detection between coils surfaces and core of high-voltage stator winding", Trans. Amer. Inst. Electr. Eng., Vol. 70, p. 1993, 1951.
- [2] J. E. Timperley, "Incipient fault identification through neural RF monitoring of large rotating machine", IEEE Trans. Power. App. and Syst., Vol. 102, p. 693, 1983.
- [3] G. J. Paoletti and A. Golubev, "Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, p. 90, 2001.
- [4] G. C. Stone, "Advancements during the past quarter century in on-line monitoring of motor and generator winding insulation", IEEE Trans. Dielectric. Insul., Vol. 9, p. 746, 2002.
- [5] C. Hudon and M. Belec, "Partial discharge signal interpretation for generator diagnosis", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, p. 297, 2005.