

논문 20-7-14

수력발전기 고정자 노후권선의 모의결함 시편에 대한 부분방전 파라미터 변화 분석

Analysis of Parameters on Partial Discharges from Insulation Defects of used Hydro Generator Stator Windings

오봉근^{1,a}, 김현일¹, 강성화², 임기조³
(Bong-Keun Oh^{1,a}, Hyun-Il Kim¹, Seong-Hwa Kang², and Kee-Joe Lim³)

Abstract

Partial discharge(PD) test for simulated insulation defects of used hydro generator stator winding was conducted to analyze the PD parameters. Simulated insulation defects are classified by 5 types - corona, slot, internal, multi and aging defect. Phase resolved partial discharge, statistical parameter (skewness, kurtosis), PD magnitude as a function of the test voltage(Q-V curve) and PD magnitude change under test voltage for 2 minutes are used as PD parameters. The analysis of PD parameters by 4 types are proved to be useful methods. In particular, PD parameter characteristics of aging defect could help to assess the aging condition of stator winding because aging defect has more weak insulation strength than other insulation defects ; PD distribution is wide and flat, PD rises rapidly near 0° and 180° and Q-V curve rises sharply and then gently drops.

Key Words : PD, Insulation defect, Hydro generator, Stator winding, Q-V curve

1. 서 론

고전압 회전기의 주요고장원인 중의 하나는 권선의 절연파괴사고이므로 권선절연의 건전성을 평가하는 것은 발전기의 안정운동을 보장하고 잔여수명을 연장하며 효과적인 정전 및 유지보수 계획을 수립하는데 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 권선절연의 건전성을 평가하는 방법으로 다양한 절연진단 방법이 제시되어 사용 중에 있다[1]. 그 중에서 부분방전시험은 권선의 절연열화에 따라 수반되는 절연물 결함에서 전계 인가시 발생하는 부분방전(partial discharge) 신호를 측정하는 시험

법으로 측정된 신호는 시간 영역 또는 주파수영역 분석등 다양한 분석이 가능하여 다른 시험법과 비교해 볼 때 권선절연에서 국부적으로 발생하는 절연문제를 찾아내고, 식별하는 데 신뢰성 높은 진단 방법으로 알려져 있다[2,3].

발전기 고정자권선에서 발생 가능한 절연결함을 살펴보면 권선 절연물 내부에 보이드(void)가 존재하여 발생하는 내부방전(internal discharge), 도전성페인트 말단부에서 전계의 집중으로 발생하는 코로나방전(corona discharge), 철심내부에서 권선의 진동 등에 의해 도전성페인트가 일부분 제거되어 발생하는 슬롯방전(slot discharge)등이 대표적인 결함으로 알려져 있다[4]. 하지만, 이러한 결함의 형태는 보통 단독으로 발생하지 않고 다중스트레스(전기적, 기계적, 열적, 환경적)에 의해 복합결함 형태로 나타나므로 복합결함에 의한 부분방전(multi discharge)과 권선절연의 열화가 많이 진전되어 나타나는 부분방전(aging discharge)도 고려해 볼 필요가 있다.

1. 한국수자원공사 수자원연구원
(대전시 유성구 전민동 462-1)
2. 충청대학 소방안전과
3. 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부
a. Corresponding Author : bongkia@kwater.or.kr
접수일자 : 2007. 6. 5
1차 심사 : 2007. 6. 14
심사완료 : 2007. 6. 20

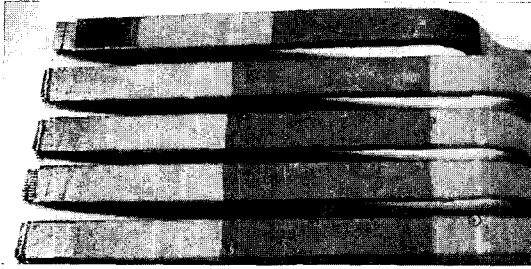


그림 1. 모의 결함을 갖는 고정자 권선 시편.
Fig. 1. Stator winding with simulated defects.

따라서 본 연구에서는 위에서 설명한 세 가지 대표적인 결함을 포함하고 내부방전과 슬롯방전의 복합방전, 그리고 권선의 열화가 많이 진행된 열화방전을 실제 운전한 발전기 권선에 모의하였다. 시료로 사용한 발전기 권선은 약 30년간 운전한 수력발전기 고정자권선을 인출하여 사용하였고, 각 결함에서 발생하는 부분방전특성을 위상기준 부분방전분포(Phase resolved partial discharge), 통계적 파라미터 및 Q-V 곡선 등을 이용하여 분석하였다.

2. 실험

2.1 권선의 특성 및 모의결함 시편 제작

시료로 사용되는 모의결함권선은 약 30년간 운영된 수력발전기 고정자권선으로 절연물은 에폭시마이크 권선절연이고, 절연등급은 B종으로 최고허용온도가 130 ℃이다. 정격전압은 3.45 kV 정격전류는 1233 A, 정격용량은 7 MW이다. 본 연구의 실험목적 수행하기 위하여 발전기 고정자(stator)로부터 인출된 고정자권선을 그림 1과 같이 보완 제작 하였다. 각각의 시료 슬롯부분의 전계분포를 일정하게 하기위하여 도전성페인트(conductive paint)를 120 mm로 도포하였고, 도전성페인트 양쪽 말단부는 시험전압 인가시 전계집중을 방지하기 위하여 반도체 페인트(semi-conductive paint)를 120 mm 도포하였다.

시료로 사용되는 권선은 장기간 운전된 권선이므로 절연물에 어느 정도 열화가 진행된 것을 고려해야 한다. 발전기 고정자권선 열화는 전기적, 기계적, 열적, 환경적 스트레스 하에서 복합적으로 진행되고 최종적으로 절연물에 도전로가 형성되어 절연파괴가 발생하게 된다. 그래서 본 연구에서는 이러한 복합열화에 의해 발생 할 수 있는 절연물의 열화조건을 다섯 가지 형태로 권선결함을 모의하였다. Type 1은 코로나방전 결함으로 도전성페인트와

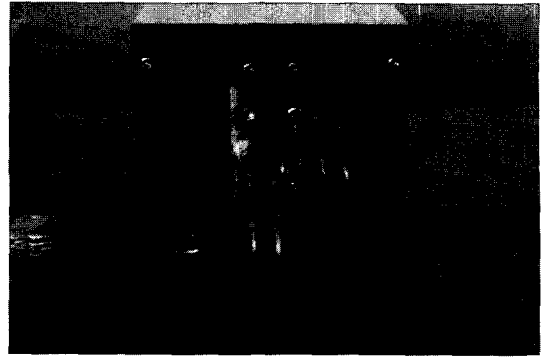


그림 2. 내부결함 제작용 고주파가열기.
Fig. 2. High frequency heater to make internal insulation defects.

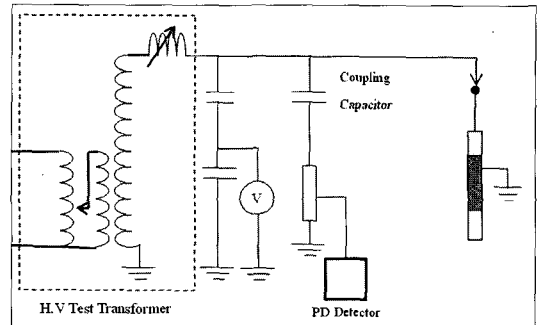


그림 3. 부분방전 측정시스템.
Fig. 3. Measuring system of partial discharge.

반도전페인트의 접속부분에 반도체페인트를 제거하여 제작하였다.

Type 2는 슬롯방전 결함으로 도전성페인트가 도포된 부분의 일부(30×20 mm) 제거하여 모의하였다. Type 3은 내부방전 결함을 모의하기 위하여 그림 2의 고주파가열기를 이용하여 단시간에 국부적(폭 20 mm)으로 상온에서 200 ℃/5분으로 승온시켜 절연물의 내부 결함을 형성시켰다. Type 4는 내부방전과 슬롯방전의 복합결함으로 Type 2와 Type 3의 결함을 동시에 모의하였다. Type 5는 열화가 많이 진행된 권선결함으로 부분방전개시 전압이 매우 낮고(2.2 kV), 권선내부에서 방전음이 매우 크게 발생하는 시료를 선정하였다.

2.2 부분방전 측정시스템

그림 3은 부분방전측정 시스템의 구성도이다. 부분방전시험은 IEC60270에서 제시하는 시험방법을 준용하였다. 시험은 PD free 시험용 변압기(12

kV Haefely)를 이용하여 4 kV를 결합권선에 인가하였다. 부분방전 측정장비는 부분방전검출기(TE571, Haefely Trench AG)와 10 nF의 커플링 커패시터를 이용하여 시험전압(4 kV)에서 2분간 결합권선의 부분방전을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 위상기준 부분방전 패턴 분석

그림 4는 모의결합 권선 시편에서 발생한 부분방전 펄스를 인가전압 위상에 따라 나타낸 것이다 [5]. 각 권선결합 시편별 그림에서 상부측은 최대부분방전량 $H_{qmax}(\phi)$ 분포이고, 하부측은 부분방전 빈도수 $H_n(\phi)$ 의 분포를 보여준다.

그림 4(a)는 코로나 방전(Type 1)으로 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 모두 음주기에 크게 나타났다. 또한 PD 개시위상부터 서서히 증가하여 소멸위상 부근에서 방전수가 많아지며 이후 급격히 감소하는 위상분포 특성이 나타났다.

그림 4(b)는 슬롯방전(Type 2)으로 코로나 방전의 위상분포와 동일하게 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 모두 음주기에 크게 나타났다. 하지만, PD 개시위상에서 급격히 PD와 방전수가 증가하고, 소멸위상에서 서서히 감소하여 코로나 방전형태와는 상호 대칭적인 분포를 가지는 것으로 나타났다.

그림 4(c)는 내부방전(Type 3)으로 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 모두 양주기와 음주기가 상호 대칭적이고, 서서히 증가하여 감소하는 위상분포특성이 나타났다.

그림 4(d)는 복합열화(Type 4)로 $H_{qmax}(\phi)$ 의 경우 양주기는 내부방전 형태를 보이나 음주기의 경우 PD 개시위상에서 부분방전이 급증한 분포특성을 보였고, $H_n(\phi)$ 은 양주기에서는 내부방전형태를 보이나, 음주기의 PD 개시위상에서 방전수가 급증하는 분포특성이 나타났다. 이는 그림 4(b)의 슬롯방전 음주기 $H_n(\phi)$ 분포특성과 유사한 패턴을 보였다. 특히 $H_{qmax}(\phi)$ 에서는 양주기와 음주기 모두 유사한 크기를 나타냈지만, $H_n(\phi)$ 에서는 양주기보다 음주기의 방전수가 수배 더 큰 것을 볼 수 있었다.

그림 4(e)는 열화시료(Type 5)로 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 모두 인가전압의 제로크로스에서 부분방전이 급증하는 형태를 보이며, 양주기가 음주기보다 다소 크게 나타나며, $H_n(\phi)$ 은 부분방전 발생주기 동안 PD 개시위상을 제외하고 고르게 분포하는 특징이 나타났다.

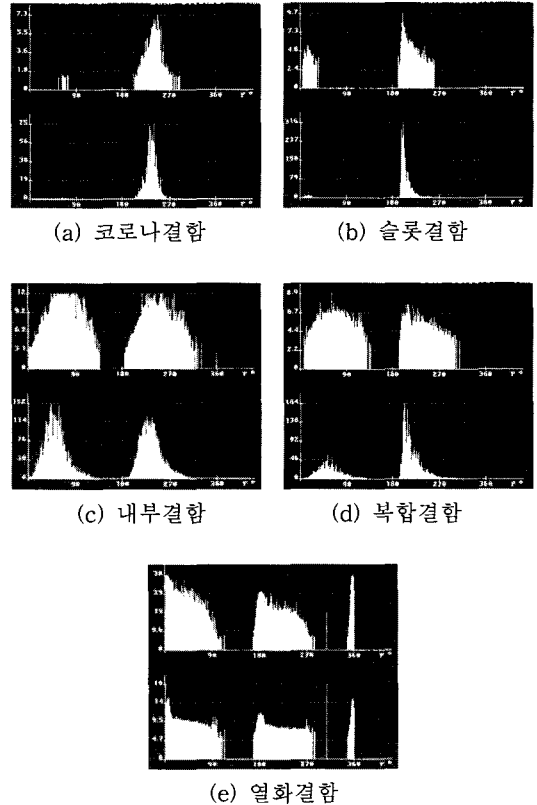


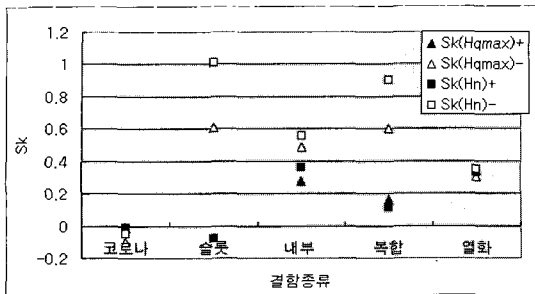
그림 4. 위상기준 부분방전분포(상위:최대부분방전량, 하위:부분방전 빈도수).

Fig. 4. Phase resolved distribution of PD (upper: $H_{qmax}(\phi)$, lower: $H_n(\phi)$).

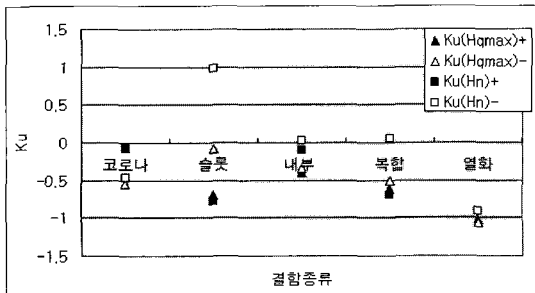
3.2 위상기준 부분방전의 통계적 분석

위상기준 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 의 부분방전분포에 근거하여 각 결합권선에 대한 식별인자를 도출하고자 왜도(Skewness 이하 Sk)와 첨도(Kurtosis 이하 Ku)의 통계적 파라미터를 이용하였다[6]. Sk는 정규분포에 대한 분포의 비대칭정도를 의미한다. Sk=0은 대칭, Sk>0은 왼쪽이 큰 비대칭이고, Sk<0은 오른쪽이 큰 비대칭을 나타낸다. Ku는 정규분포에 대한 분포의 첨예도를 의미한다. Ku=0은 정규분포이고, Ku>0은 첨예한 분포, Ku<0은 평평한 분포를 나타낸다. 그림 5는 결합권선의 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 에 대한 통계적 파라미터인 왜도(Sk)와 첨도(Ku)이다.

코로나 방전의 Sk는 대칭이고, 음주기의 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 에 대한 Ku는 0보다 작은 값으로 정규분포대비 평평한 분포를 나타냈다. 슬롯결합의 Sk



(a) 왜도(Skewness)



(b) 첨도(Kurtosis)

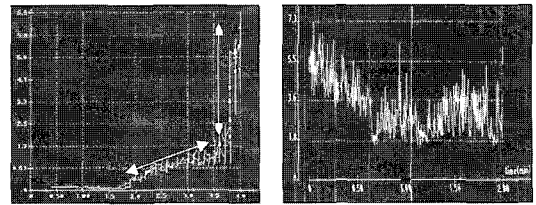
그림 5. 결함별 통계적 파라미터(+:양주기, -:음주기).

Fig. 5. Statistical parameters by simulated insulation defects(+:positive half cycle, -:negative half cycle).

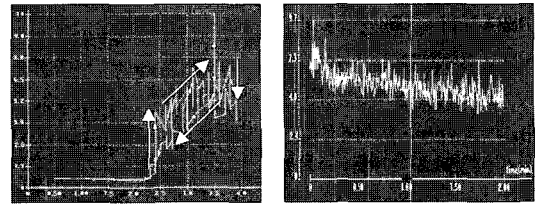
는 음주기에서 왼쪽으로 큰 비대칭 이며, 양주기의 경우 대칭특성이었다. Ku는 음주기의 Hn(ϕ)이 첨예한 분포를 나타냈으며, 나머지는 정규분포 및 0보다 작은 값을 나타냈다. 내부결함에서 Sk는 Hqmax(ϕ)와 Hn(ϕ) 모두 왼쪽으로 비대칭이고, Ku의 Hqmax(ϕ)은 0보다 작은 값이고 Hn(ϕ)은 정규분포를 나타냈다. 복합결함권선에서 Sk는 음주기가 왼쪽으로 큰 비대칭이고, 양주기는 대칭특성이 나타났다. Ku는 Hn(ϕ)의 음주기가 정규분포를 나머지는 0보다 작은 값을 나타냈다. 열화결함의 경우 Sk는 모두 왼쪽으로 비대칭특성이고, Ku는 다른 결함권선에 비하여 평평도가 큰 것으로 나타났다.

3.3 Q-V curve 및 Q-t 특성 분석

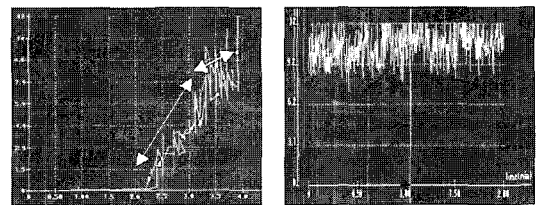
그림 6은 결함권선에 시험전압까지 단계별로 인가 후 다시 전압을 하강하며 측정된 부분방전량(pC)의 변화특성 곡선(Q-V curve, 좌측그림)과 시험전압(4kV)을 2분간 유지하면서 측정된 부분방전량의 변화특성(Q-t 특성, 우측그림)을 나타낸 것이다. 이러한 분석은 부분방전 개시전압, 전압인가



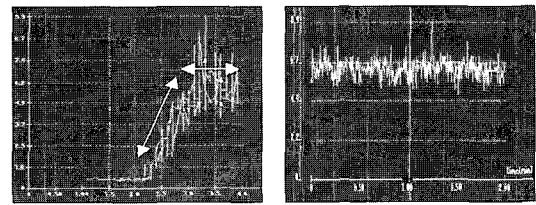
(a) 코로나결함



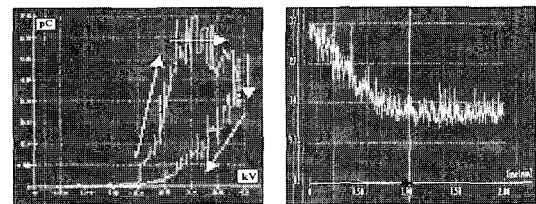
(b) 습꽃결함



(c) 내부결함



(d) 복합결함



(e) 열화결함

그림 6. Q-V 곡선(좌측)과 Q-t 특성(우측).

Fig. 6. Q-V(right) and Q-t curve(left).

시간에 따른 부분방전크기 변화 등으로 권선결함별 특성을 구별하고자 하였다[4].

코로나결함의 Q-V 곡선특성은 시험전압상승 및 하강시 일정전압(3.8 kV)에서 PD가 급증 및 급감하였고, 전압인가 시간에 의한 영향은 PD가 점차 큰 진폭을 가지고 감소 후 안정되는 특성이 나타났다. 습꽃결함의 경우 PD 개시전압에서 부분방전

크기가 급증하였고, 전압상승 후 하강 시에는 상승 시 부분방전량 보다 다소 작은 값으로 감소하는 이력특성이 나타났다. 전압인가 시간에 의한 영향에서는 부분방전량이 점차 감소하였다. 내부결합의 경우 PD 개시전압과 소멸전압이 같았고, 전압상승 및 하강시 같은 크기로 증가 및 감소하였으며, 전압인가 시간에 의한 영향은 PD가 큰 진폭으로 상승하강을 반복하였다. 복합결합의 경우 부분방전량이 시험전압에 따라 증가 후 포화특성이 나타났고, 하강 시에는 증가 시와 동일하게 감소하였고, 전압인가 시간에 의한 영향은 부분방전 크기의 변화가 작았다. 열화결합의 경우 시험전압 상승 시는 PD가 가파르게 상승하였고, 하강시에는 완만하게 감소하는 이력 특성을 나타냈다. 전압인가 시간에 의한 영향은 부분방전량이 초기측정값 대비 약 1/2로 감소하여 안정되는 특성이 나타났다.

3.4 권선 결함별 파라미터의 변화

권선 결함 시편에 대하여 위상분포특성, 통계적 파라미터특성, Q-V 및 Q-t 특성을 분석한 결과 권선 결함 시편에서 나타나는 특징적인 요소들은 표 1에 나타내었다. 하지만, 금번 실험의 경우 시료 수가 한정되어 신뢰성 확보를 위해서는 좀더 많은 시료에 대한 실험이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

실제 장기간 운전한 수력발전기의 고정자권선을 인출하여 발생 가능한 5가지 결함을 모의/제작하여 부분방전시험을 실시하였다. 실험결과 위상기준 부분방전 분포특성은 권선결함 형태별로 구분이 용이 하였다. 통계적 파라미터에서는 슬롯결함 및 복합결합에서 왜도가 좌측비대칭정도가 크게 나타났고, 침도의 경우 열화결합에서 평평한 정도가 크게 나타났다. Q-V 특성곡선의 경우 시험전압의 상승 및 하강에 따라 각 결함별 특성곡선이 다르게 나타났다. 전압인가 시간 영향(Q-t 특성)에서 내부결합과 복합결합에서는 일정하였고, 나머지 결함은 감소하는 특성이 나타났다. 따라서, 4가지 형태의 분석방법으로 권선결함별 PD특성들을 용이하게 구별할 수 있었다. 특히, 열화결함 권선은 다른 절연결합과 비교하여 절연내력이 상당히 저하된 상태이므로 열화결함 시편에서 나타나는 부분방전 파라미터 특성은 고정자권선의 열화상태를 평가하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 금번 실험 시 제한된 시료로 인하여 신뢰성 있는 자료로 사용하기 위해서는 좀 더 많은 실험데이터의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

표 1. 결함별 파라미터의 변화.

Table 1. Parameters according to defects.

권선결합	부분방전 특성
코로나	음주기에서 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 이 크고, PD위상분포는 대칭. PD개시위상(전압)에서 급증하는 특성.
슬롯	음주기에서 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 이 크고, PD위상분포는 좌측비대칭. PD개시위상(전압)에서 급증, Q-V곡선은 이력 특성을 나타냄.
내부	양주기와 음주기에서 $H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 이 같고, Q-V곡선은 상승과 하강이 동일.
복합	음주기의 $H_n(\phi)$ 이 상대적으로 크고, Q-V곡선은 상승과 하강이 동일.
열화	$H_{qmax}(\phi)$ 와 $H_n(\phi)$ 의 위상분포가 넓게 분포. PD개시위상(전압)이 0도와 180도 부근에서 급증. Q-V곡선은 급격히 PD가 증가하고, 완만히 감소하며, 큰 이력특성을 나타냄.

참고 문헌

- [1] I. M. Culbert, H. Hhirani, and G. C. Sone, "Handbook to assess the insulation condition of large rotating machines", EPRI publication EL-5036, Vol. 16, 1989.
- [2] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, "Trends in partial discharge pattern classification : A survey", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 2, p. 248, 2005.
- [3] 박성희, 임기조, 강성화, "견인전동기용 고정자 코일의 Off-line 부분방전 진단을 위한 NN의 적용", 전기전자재료학회논문지, 18권, 8호, p. 766, 2005.
- [4] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths, 1989.
- [5] 박재준, 이성룡, 문대철, "고압전동기 고정자권선의 PRPD 부분방전 결함신호 해석", 전기전자재료학회논문지, 19권, 10호, p. 942, 2006.
- [6] B. Yue, X. Chen, Y. Cheng, J. Song, and H. Xie, "Diagnosis of stator winding insulation of large generator based on partial discharge measurement", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, p. 387, 2006.