

## 고전압회전기 고정자권선의 모의결함에 따른 부분방전 특성인자 분석

오봉근, 김현일, 한창동, 임기조\*  
한국수자원공사, \*충북대학교

### Analysis Of PD Characteristic Parameters Based On Simulated Defects For High Voltage Rotating Machine Stator Bar

Bong-keun Oh, Hyun-Il Kim, Chang-Dong Han, Kee-Joe Lim\*  
K-water, \*Chung-Buk National University

**Abstract** - 고전압회전기 고정자권선의 절연은 열적, 전기적, 기계적, 환경적 스트레스에 복합적으로 노출되어 열화 된다. 이런 열화의 진전특성을 분석하기 위한 고정자권선 절연상태 진단은 안전한 운전을 보장하고 발전기의 잔여수명을 연장하는데 매우 중요한 방법이다. 이 논문에서는 절연상태를 진단할 수 있는 시험방법 중 부분방전시험을 이용하여 고정자권선에서 발생할 수 있는 모의결함을 인가하고 결함별로 나타나는 위상기준 부분방전 분포특성을 분석하여 결함별 특성을 식별하였다.

#### 1. 서 론

고전압회전기의 신뢰성 있는 운영은 고정자권선의 건전성 여부가 매우 중요하다. 그 이유는 회전기의 주요 고장원인중의 하나가 절연고장이기 때문이다. 고정자권선의 진단은 안전운전을 보장하고, 잔여수명을 연장하며, 효과적인 정전과 유지보수를 계획하는데 매우 중요한 역할을 한다. 하지만, 고전압회전기 절연열화상태평가는 현재까지도 계속하여 연구되고 있는 주제로 열화상태를 표시하고 평가하는데 뚜렷한 식별인자를 찾기위해 많은 연구가 이루어 지고 있다. 이 논문에서는 이러한 연구 주제와 관련하여 약 30년동안 실제 운영된 수력발전기에서 인출한 고정자권선을 이용하여 발생가능한 5가지 형태의 모의결함을 구성하였다. 그리고 부분방전시험을 실시하여 모의결함에 따른 절연특성 식별인자를 찾고자 위상기준 부분방전분포 데이터를 분석하였다. 실험결과 모의결함을 식별할 수 있는 부분방전 특성인자를 찾을 수 있었다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 시료특성 및 제작

시료로 사용하는 권선은 약 30년간 운영된 수력발전기 고정자권선으로 절연등급은 B종으로 최고허용온도가 130℃이고, 정격전압은 3.45kV, 정격전류는 1233A, 정격용량은 7MW이다. 시료권선은 VPI 에폭시마이크 권선으로 본 논문의 실험목적에 수행하기 위하여 권선을 보완제작하였다. 인출된 권선을 그림1과 같이 여섯개 시료로 분류하였다. 각각의 시료는 슬롯부분의 전계분포를 일정하게 하기위하여 반도전페인트를 도포하였고, 반도전페인트의 끝단부는 전계의 집중을 방지하기 위하여 고저항 페인트를 도포하였다.

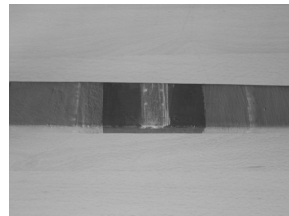


〈그림 1〉 시료권선 사진

##### 2.1.1 시료의 모의결함 구성

발전기 고정자권선은 약 30년간 운영되었으므로 어느정도 절연물에 열화가 진행된 것을 고려해야 한다. 따라서, 초기 부분방전시험을 실시하여 최대부분방전량 및 위상분포특성을 기준으로 권선을 분류하였다. 발전기 고정자권선의 열화는 전기적, 열적, 기계적, 환경적 스트레스에 의하여 복합적으로 진행되고, 최종적으로는 절연물에 전기적인 도전도가 형성되어 절연파괴가 발생하게 된다. 그래서 본 논문에서는 이러한 복합 열화에 의해 발생할 수 있는 절연물의 열화조건을 다섯가지 형태로 모의하였다. Type 1은 코로나 결함으로 반도전페인트와 고저항 페인트의 접속부 부분에 고저항페인트를 제거하여 모의하였다. 이러한 결함을 모의하기 위해 6개의 모든시료에 대하여 반도전페인트 도포후 고저항페

인트 도포전에 부분방전을 측정하였다. Type 2는 슬롯결함으로 반도전페인트가 도포된 부분의 일부를 그림2와 같이 부분적(2mm×3mm)으로 제거하여 모의하였다. Type 3은 내부결함을 모의하기 위하여 그림3과 같이 고주파가열기를 이용하여 단시간에 국부적으로 권선부에 온도를 210도까지 3분간 상승시켜 내부 절연물의 결함을 형성시켰다. Type 4는 내부결함과 슬롯결함의 복합형태로 Type 2와 Type 3의 모의결함을 동시에 인가하였다. Type 5의 경우는 열화가 많이 진행된 결함을 모의하였다. 이 시료의 경우는 부분방전 개시전압이 매우 낮고, 전압인가시 권선내부에서 방전음이 발생하는 시료를 선정하였다.



〈그림 2〉 권선슬롯 결함사진



〈그림 3〉 고주파가열기

##### 2.1.2 부분방전 측정장비 및 분석방법

부분방전시험은 IEC60270에서 제시하는 시험방법을 준용하였고, 디지털 부분방전검출기(TE571, Haefely Trench AG)와 10nF의 커플링커패시터를 이용하여 시험전압 4 kV에서 2분간 부분방전을 측정하였다.

측정된 부분방전데이터를 분석하는 방법으로 위상기준 부분방전분포특성과 통계적 파라미터를 이용하였다. 본 논문에서는 위상기준 최대부분방전량과 부분방전갯수에 대한 분포특성을 분석하였고, 이들 분포특성에 대한 통계적 파라미터로는 왜도(Skewness)와 첨도(Kurtosis)를 이용하여 열화에 따른 파라미터의 변화를 분석하였다.

##### 2.1.3 권선결함시료 분류

모의결함으로 시료권선을 분류하고자 6개의 시료에 대하여 초기 부분방전시험을 실시하였다. 시료권선이 현장에서 장기간 사용된 권선으로 권선의 열화상태에 따라 매우 상이하였다. 그래서, 2.1.1절에서 설명한 위상기준 부분방전특성분포 중 부분방전크기  $q(\max)$ 를 기준으로 분류하였다. 시험전압에서 부분방전이 발생하지 않는 1개의 건전한 시료는 초기 절연강도를 측정하기 위하여 절연파괴시험을 실시하기로 하였다. 나머지 다섯 개의 시료중 한 개의 시료는 부분방전 개시전압이 낮고, 시료권선 내부에서 방전음이 강하게 발생하여 열화가 많이 진행된 권선으로 분류하였고, 나머지 네개 시료는 코로나, 슬롯결함, 내부결함 및 복합결함으로 분류하였다.

#### 3. 결과 및 분석

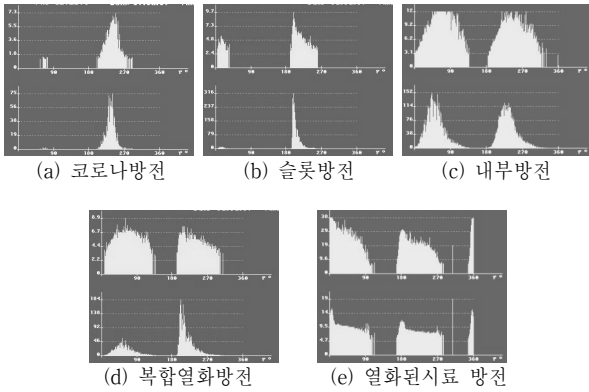
##### 3.1 초기 절연강도특성

시료권선중 시험전압에서 부분방전이 발생하지 않은 건전한 권선에 대하여 절연파괴시험규격 ASTM D 149-97a를 준용하여 파괴시험을 실시하였다. 시험결과 파괴전압은 22kV이고, 절연파괴위치는 반도전페인트와 고저항페인트의 접속점에서 발생하였다. 따라서, 장시간 운전한 권선이지만, 건전한 권선의 절연파괴전압은 정격전압의 약 6배로 매우 양호한 절연내력특성이 나타났다.

##### 3.2 부분방전 절연특성인자 분석

부분방전시험을 이용한 여러가지 분포특성 가운데 여기서는 위상기준 최대부분방전량  $q(\max)$ , 부분방전갯수  $q(\text{num})$ 의 분포특성과 통계인자인 왜도와 첨도에 대하여 결함에 따른 분포특성을 분석하였다.

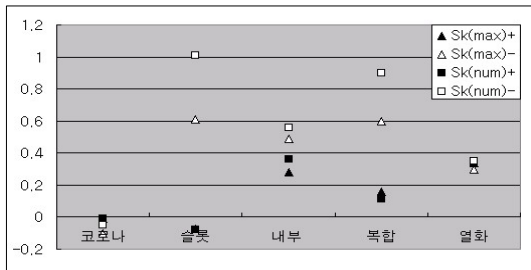
### 3.2.1 위상기준 부분방전분포특성 분석



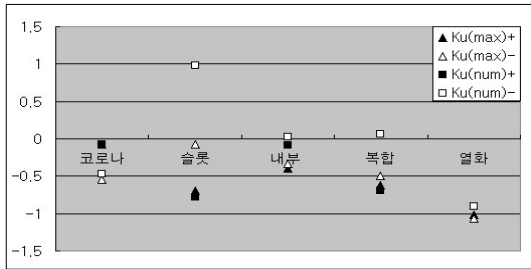
〈그림 4〉 고주파가열기

그림4는 위상기준 부분방전의 분포특성을 나타내었다. 코로나 방전(Type1)의 경우 음주기에서 최대부분방전량과 부분방전갯수가 양주기에 비하여 매우 크게 나타났으며, 음주기에서도 270도 가까이에서 부분방전이 발생하였다. 슬롯방전(Type2)의 경우 코로나 방전과 유사한 특성을 나타내지만, 부분방전 개시위상이 빠르며 부분방전이 매우 급격하게 발생하고, 음주기에서 180도 가까이에서 부분방전이 발생하였다. 내부방전(Type3)의 경우 최대부분방전량과 부분방전갯수가 양주기와 음주기 모두 유사한 분포특성을 나타내었다. 슬롯결합과 내부결합을 같이 모의한 복합열화(Type4)의 경우 최대부분방전량의 위상분포는 내부방전과 유사하나, 음주기에서 부분방전개시 위상에서 부분방전이 급증하는 특성이 나타났으며, 부분방전갯수의 위상분포는 최대부분방전의 분포형태와는 다르게 음주기에서 상대적으로 많이 발생하는 것으로 나타났다. 열화된 시료(Type5)의 경우 최대부분방전량 및 부분방전갯수의 위상분포는 부분방전 개시위상이 0도와 180도 부근에서 발생하고, 급증하는 형태를 보이며 양주기의 부분방전량이 음주기보다 다소 크게 발생하는 것으로 나타났다.

### 3.2.2 위상기준 부분방전분포 통계인자분석



(a) 왜도(Sk) 특성



(b) 첨도(Ku) 특성

〈그림 5〉 통계인자를 이용한 부분방전분포 특성

(max:최대부분방전량, num:부분방전갯수, +:양주기, -:음주기)

위상기준 최대부분방전량과 부분방전갯수에 대한 부분방전분포에 근거하여 통계적 처리로부터 결합별 특성인자를 도출하고자 왜도와 첨도의 통계인자를 사용하였다. 왜도는 정규분포에 대한 분포의 비대칭정도를 의미한다.  $Sk=0$ 은 대칭,  $Sk>0$ 은 왼쪽이 큰 비대칭이고,  $Sk<0$ 은 오른쪽이 큰 비대칭을 의미한다. 첨도는 정규분포에 대한 분포의 집중정도를 나타낸다.  $Ku=0$ 은 정규분포이고,  $Ku>0$ 은 첨예한 분포,  $Ku<0$ 은 평평한 분포를 나타낸다. 그림

5는 결합별 통계인자에 대한 특성을 나타내었다.

코로나방전의 경우  $Sk$ 는 대칭이고  $Ku$ 는 음주기에서 다소 평평한 것으로 나타났다. 슬롯방전의 경우  $Sk$ 는 음주기에서 왼쪽으로 비대칭이고,  $Ku$ 는 양주기는 평평하고, 음주기의 부분방전갯수 분포가 첨예하게 나타났다. 내부방전의 경우  $Sk$ 는 모든 특성이 왼쪽으로 비대칭이고,  $Ku$ 는 정규분포의 특성이 나타났다. 복합열화의 경우  $Sk$ 는 음주기에서 모두 왼쪽으로 비대칭이고,  $Ku$ 는 음주기 부분방전갯수를 제외하고 모두 평평한 분포를 나타냈다. 열화시료의 경우  $Sk$ 는 왼쪽으로 비대칭이고,  $Ku$ 는 평평한 분포를 나타내었다.

### 3.2.3 모의결합에 대한 식별

모의결합을 인가한 권선에 대한 위상기준 분포특성을 분석한 결과 표1과 같이 결합별 특성요소를 찾을 수 있었다. 하지만, 금번 시험에서는 시료의 수가 한정되어 있어 좀더 많은 시료에 대한 실험을 실시하여 신뢰성을 확인이 요구된다.

표 1 결합별 부분방전 분포특성

결합	부분방전 분포 특성
Type 1 (코로나방전)	+보다 -에서 $q(max)$ 와 $q(num)$ 가 큼. $Sk \approx 0$ 이고 $Ku \approx 0$
Type 2 (슬롯방전)	+보다 -에서 $q(max)$ 와 $q(num)$ 가 큼. $Sk > 0$ 이고 $Ku > 0$
Type 3 (내부방전)	+와 - 모두 $q(max)$ 와 $q(num)$ 의 크기가 비슷함. $Sk > 0$ 이고 $Ku \leq 0$
Type 4 (복합방전)	$q(max)$ 는 +와 - 모두 크기가 비슷함. $q(num)$ 은 +보다 -에서 크기가 큼. $Sk > 0$ 이고 $Ku \leq 0$
Type 5 (열화시료)	부분방전개시위상이 0도와 180도 부근이며 급증 $Sk > 0$ 이고 $Ku < 0$

## 4. 결론

발전기 고정자권선의 결합형태에 따른 부분방전의 위상기준분포특성을 분석하여 결합형태를 식별하고자 실제 장기간 운전한 수력발전기의 고정자권선을 인출하여 발생 가능한 5가지 결합을 모의하고 부분방전시험을 실시하였다. 시험전압에서 2분간 인가한 데이터를 이용하여 위상기준 최대부분방전량과 부분방전갯수 분포특성을 알아보고 통계적 인자로서 왜도 및 첨도에 대한 특성값을 분석하였다.

분석결과 위상기준 부분방전분포 특성과 통계적 인자 특성이 모의결합 종류에 따라 상이한 것을 알 수 있었다(3.2.3절참조). 따라서, 부분방전시험을 이용한 고정자 권선의 절연결합 특성분석시 도움이 될 것으로 판단된다. 하지만, 금번시험에서는 모의결합 시료수가 적고 실제 발전기의 운전환경(권선이 슬롯에 삽입되어 있는 조건)에서 측정이 되지 않는 등 다소 실험이 제한적으로 이루어짐으로 신뢰성 있는 자료로 활용하기 위해서는 좀더 많은 시료에 대한 실험과 데이터가 필요할 것으로 판단된다.

## [참고 문헌]

- [1] A. Contin, A. Cavallini, G.C. Montanari, C.Hudon, M.Belec, D.N.Nguyen, "Searching for Indexes Suitable for Rotating Machines Diagnosis", Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 101-105, 2006
- [2] Belec, M., Hudon, C., and Guddemi, "Laboratory Study of Slot Discharge Characteristic PRPD Patterns", 2001
- [3] 박재준, 이성룡, 문대철, "고압전동기 고정자권선의 PRPD 부분방전 결합신호 해석", 전기전자재료학회, 제19권 제10호, pp. 942-946, 2006
- [4] Bo Yue, Xiaolin Chen, Yonghong Cheng, Jiancheng Song, and Hengkun Xie, "Diagnosis of Stator Winding Insulation of Large Generator Based on Partial Discharge Measurement", IEEE Transactions on Energy conversion, Vol. 21, No. 2, 2006 pp. 387-395, 2006
- [5] IEC 60270, "Partial Discharge measurements", 1996
- [6] ASTM D 149-97a, "Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies", 2004