

**고압 유도전동기 고정자권선의 결함에 따른 부분방전발생양상의 특징분석**

이강원, 김명룡, 백광선, 장동욱, 임기조  
한국철도기술연구원, 충북대학교

**Characteristic Analysis of PD Occurrence Aspects for Defect of Stator Coil in HV Induction motor**

Kang-Won Lee, Myung-Yong Kim, Kwang-Sun Baik, Dong-Uk Jang, Kee-Joe Lim  
KRRI, Chungbuk National University

**Abstract** - High voltage induction motor is the important equipment for ensuring the driving performance of the electric train. PD(partial discharge) is a good indicator for showing the insulation performance of stator coil in HV induction motor. This paper has investigated the characteristics of PD occurrence aspects for both the sound and defective stator coil which consist of maximum PD amplitude(V), total occurrence number, average PD amplitude(V) and PD amplitude(v) - PD occurrence number(n). They were compared with each other depending on applied voltages and reconstructed to 60x60 matrices of PD amplitude(v)- occurrence phase ( $\phi$ )-occurrence number(n) which is the good way to estimate the PD sources in stator coil.

**1. 서 론**

전동차에 사용되는 고압 유도전동기는 전동차를 구동하는데 있어 매우 중요한 장치이므로 고압 유도전동기의 성능을 좋게 유지하는 것이 매우 중요하다. 유도전동기의 성능은 기계적 성능, 전기적 성능으로 크게 나누어 볼수 있다. 기계적 성능은 축, 베어링, 고정자와 회전자 의 공극간격의 불균일등에 의해 주로 좌우되며, 진동 및 소음등에 의해 확인할 수 있고, 전기적 성능은 고정자에 흐르는 전류에 의한 저항손실열의 발생 및 고정자권선의 절연성능에 의해 좌우되며, 절연저항, 유전정점 및 부분방전의 측정을 통해 확인할 수 있다. 고정자권선의 절연 성능의 악화에 의한 절연파괴는 유도전동기 자체뿐만 아니라 전동차내 다른 저압장치들에도 악영향을 미칠수 있고 또한 인사사고의 가능성도 배제할 수 없는 중요한 사항이므로 절연성능의 악화에 영향을 주는 요인을 조사 분석하는 것이 매우 중요할 것이다. 절연성능을 확인하는 방법중 부분방전측정법은 on-line상으로 간접적이 아닌 안전한 측정법이다.[1,2] 본 논문에서는 건전한 상태의 고정자권선과 침형상의 결함을 가진 고정자권선에 고전압을 인가하여 발생된 부분방전신호를 데이터획득시스템을 이용하여 측정 및 저장하고 이들의 발생양상에 따른 특성을 비교 분석하였다. 분석을 위한 요소로서는 최대방전전하량(전압), 총발생빈도수, 평균방전전하량(전압)을 기본으로서 방전전하량과 발생빈도수의 관계 및 방전발생위상각에 따른 방전전하량과 발생빈도수의 3차원분포(60x60행렬)를 구성하여 결함이 있는 경우와 없는 경우에 대한 고정자권선에서의 부분방전발생양상을 비교분석 하였다.

**2. 본 론**

**2.1 실험구성 및 방법**

본 논문에서 사용된 고정자권선은 전동차용 고압

(1.1kVac) 유도전동기에 사용되는 것으로서 고정자권선의 입력단을 고압측에 그리고 전동기 슬롯을 모의한 전극을 고정자권선의 절연층위에 설치하여 접지하였다. 고정자 권선에 고압을 인가하기위하여 가능한 한 내부 크로나의 발생을 억제한 변압기를 사용하였고, 부분방전신호의 측정기구의 구성은 IEC60270을 따랐다.[2] 측정된 신호는 데이터획득장치인 DEWE3010에 의해 저장되었고, 저장된 데이터는 적절한 프로그램에 의해 데이터선별, 정제과정을 거쳐 데이터 분석이 이루어 졌다.

**2.2 결과 및 고찰**

본 논문에서는 매우 짧은 폭을 가진 부분방전신호를 peak detector를 이용하여 5[μs]의 펄스형태로 만든 후 데이터획득장치를 이용하여 입력된 신호를 최대 100kS/s의 샘플링속도로 저장하였다. 그러나 샘플링속도의 변화에 따라 펄스형태로 입력되는 부분방전신호의 크기 및 빈도가 영향을 받게 되므로 그 영향을 확인하는 것이 필요하다.

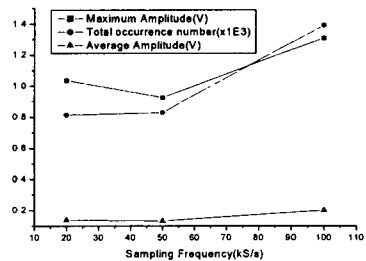


그림 1. 방전제량들의 샘플링주파수에 따른 변화

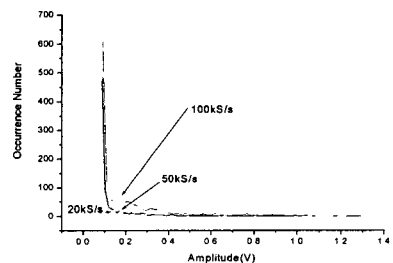


그림 2. 샘플링주파수에 따른 방전전하량(v)-발생빈도수(n) 분포

그림 1과 2는 20kS/s, 50kS/s, 100kS/s로서 저장된 부분

방전신호들에 대한 비교 결과이다. 측정된 부분방전신호는 건전한 고정자권선에 3.0kV를 인가하였을 때 발생한 것으로서 20kS/s와 50kS/s의 경우는 100kS/s의 경우에 비해 최대 방전전하량( $v_{max}$ ), 총 발생빈도수( $n_{total}$ ), 평균 방전전하량( $v_{ave}$ ) 등이 낮게 측정되었다는 것을 알 수 있다. 그러므로 샘플링속도에 따른 측정신호들의 분포는 샘플링속도에 있어 4배이하인 경우에는 거의 차이를 보여주지 않을 것으로 보여지므로 본 논문에서 사용된 100kS/s의 샘플링속도는 5[ $\mu$ s]의 펄스로 바뀌어진 부분방전신호들의 방전발생양상을 살피는데 적당하다고 볼 수 있다. 전동차용 고압 유도전동기의 고정자를 건전한 경우와 외부에서 임의로 침전극형태의 결합을 생성시킨 경우에 대한 부분방전발생양상을 살펴보았으며, 두 경우에 인가된 전압은 상용교류전압으로서 2.7kV, 3.0kV, 3.3kV를 각각 인가하였으며, 이때의 샘플링주파수는 100kS/s로 하였다. 건전한 고정자의 경우 PDIV(partial discharge inception voltage)는 2.3kV이나, 본격적으로 부분방전이 계측된 전압은 2.7kV 이상이 되면서 부터였다. 그리고 침결합을 가진 고정자의 경우에 PDIV는 1.5kV로서 건전한 고정자의 경우보다 낮은 전압에서 먼저 부분방전이 발생하였으며 약 2.0kV 이상에서 부분방전이 다수 관찰되기 시작하였다. 그러나 본 실험에서는 건전한 고정자의 경우와 침결합이 있는 고정자의 경우를 서로 비교하기 위하여 고정된 전압들을 인가하였다.

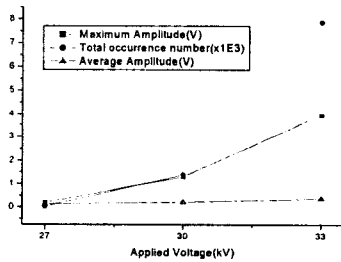


그림 3. 건전한 고정자권선에서의 전압에 따른 방전제량들의 변화

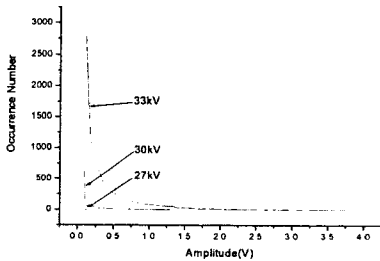


그림 4. 건전한 고정자권선에서의 방전전하량(v)-발생빈도수(n) 분포

그림 3은 건전한 고정자의 경우에 3초간(180주기) 발생되어 측정된 방전전하량(전압)의 최대 방전전하량(maximum amplitude), 총 발생빈도수(total occurrence number), 평균 방전전하량(average amplitude)에 대해 인가전압별로 비교한 결과이다. 측정시 발생된 노이즈를 제거하기 위한 데이터 정제(data cleaning)과정으로서 측정값들에 대해 0.8V의 offset을 적용하였다. 그림 3에서 살펴보는 바와 같이 최대 방전전하량, 총 발생빈도수, 평균 방전전하량은 인가전압이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 27kV의 경우 총 발생빈도수는 22번으로 30kV의 1392번에 비하여 매우 낮은 발생빈도를 보여준다. 그림4는 방전전하량에 대한 방전발생빈도수를

각 인가전압별로 비교한 결과를 나타내며, 그림 3에서 비교된 결과들을 확인할 수 있도록 도와 준다. 그림 5는 3.3kV를 건전한 고정자에 인가한 상태에서 180주기 동안 측정된 부분방전을 60x60의 행렬로 구성하여 방전전하량(v), 방전발생위상각( $\phi$ ), 발생빈도수(n)의 3차원 형태로 나타낸 것이며, 발생빈도의 크기를 등고선의 형태로 나타낸 것이다.

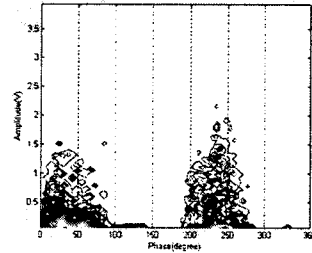


그림 5. 건전한 고정자 권선에서의 v- $\phi$ -n분포

그림 5에서 살펴보는 바와 같이 부분방전은 주로 정주기 중 0-100°의 위상과 부주기 중 180-280°에서 주로 발생하였으며 130°부근과 330°부근에서도 부분방전이 관찰되었다. 발생빈도수는 차이가 있으나 정주기와 부주기에서의 발생분포가 매우 유사하다는 것을 알 수 있으며, 이러한 부분방전발생분포는 보이드 형태의 결합에서 관찰되는 분포이기도 하다. 그러므로 건전한 고정자에 3.3kV가 인가된 경우 고정자를 둘러싼 절연상 보이드에 의한 부분방전이 발생하므로 고정자가 지속적으로 고압에 노출된 경우 부분방전에 의한 열화로 절연상태가 빠르게 악화될 수 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 전동차에 사용되는 고압유도전동기의 동작전압은 1.1kV로서 본 실험에서의 3.3kV보다 낮은 전압이다. 그러나 스위칭시 발생하는 임펄스 전압 및 서지전압 등에 의하여 3.3kV 정도에 도달할 수 있는 가능성이 있으므로 동작전압을 가능한 낮게 유지하거나 절연등급을 적절히 선택하는 것이 중요하다. 그림 5에서 130°부근과 330°부근에서의 부분방전분포는 주로 고정자의 노출부위 또는 커넥터의 불평등 전계하에서 발생하는 기중부분방전에 의한 것으로 보인다. 고압 유도전동기는 고정자권선에 흐르는 삼상전류에 의한 회전자력에 의해 전동차를 움직이며, 이때 고정자에 흐르는 전류에 의한 저항손실열은 고정자의 절연성능을 저하시키는 한 요인으로 작용할 수 있다. 또한 전동기의 기계적 결합들에 의해 고정자권선의 외부 절연층이 손상을 입게 되어 이로 인한 불평등전계의 발생에 의한 절연성능저하도 발생할 수 있으므로 이러한 고정자권선의 절연상 결합을 모의하여 고정자 권선의 절연층에 침형상의 나사못을 이용하여 약간 손상을 입혀 이때의 부분방전발생양상을 관찰하였다.

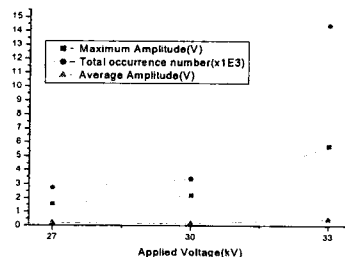


그림 6. 침형상 결합이 있는 고정자권선에서의 전압에 따른 방전제량들의 변화

그림 6는 인가전압에 따른 최대방전전하량, 총발생빈도

수, 평균방전전하량의 측정결과를 보여준다. 그림 6에서 보여주는 바와 같이 최대 방전전하량과 총 발생빈도수는 인가전압이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주지만 평균방전전하량은 30kV의 경우 27kV보다 낮은 값을 가지게 된다. 이것은 30kV의 방전발생빈도가 27kV의 발생빈도보다 크나 30kV의 방전발생빈도중 큰 방전전하량보다 작은 방전전하량의 발생빈도가 높기 때문이며, 방전전하량에 대한 발생빈도수의 기울기를 보여주는 그림 7에서 확인 할 수 있다.

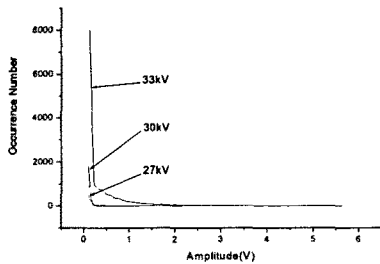


그림 7. 침형상 결합이 있는 고정자권선에서의 방전전하량-발생빈도수

침형상의 결합이 있는 고정자권선에서의 최대방전전하량, 총발생빈도수, 평균방전전하량의 값은 건전한 고정자권선의 경우에 비해 전체적으로 높게 측정되었다. 이로써 결합이 존재하는 경우 절연열화의 심각성은 커진다는 것을 확인할 수 있었다. 그림 8은 3.3kV에서 발생된 부분방전을 180주기동안 측정하여 60x60의 행렬분포로 구성한 그림으로서 방전전하량(v), 방전발생위상각( $\phi$ ), 방전발생빈도수(n)의 3차원 분포를 나타낸 것이다. 그림 8에서 부분방전은 주로 정주기에서는 0~140°, 부주기에서는 180~290°로 넓게 퍼져 분포하는 것을 알 수 있으며, 이결과는 건전한 고정자권선의 경우와 비교할 때 보이드방전분포와 함께 침전극에 의한 불평등전계로 발생한 부분방전의 발생이 상당히 증가하였다는 것을 보여주고 있다.

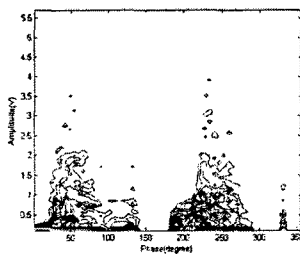


그림 8. 침형상 결합이 있는 고정자 권선에서의 v- $\phi$ -n 분포

### 3. 결 론

본 논문에서는 최대 100kS/s의 샘플링 속도를 가진 데이터획득시스템을 이용하여 건전한 상태의 고정자권선과 침형상의 결합이 있는 고정자권선에서 발생된 부분방전신호를 측정, 저장 및 처리를 하였다. 샘플링속도를 20kS/s, 50kS/s, 100kS/s의 각각의 경우를 비교한 결과 샘플링속도에 의한 차이는 약 4배이상의 경우 현저할 것으로 판단되었다. 건전한 고정자권선에서 최대방전전하량(전압), 총발생빈도수, 평균방전전하량(전압)은 전압이 증가함에 따라 함께 상승하는 경향을 보여주었으며, 방전발생위상각에 따른 3차원분포를 구성한 결과 0~100°와

180~280°에서 부분방전이 주로 분포하였고, 이러한 분포를 통하여 고정자권선 내부에 존재하는 보이드에 의한 방전이 주로 주로 발생하였다는 것을 추정할 수 있었다. 침형상의 결합을 가진 고정자권선에서도 최대방전전하량(전압), 총발생빈도수는 전압의 증가와 함께 증가하였으나 30kV에서 작은 크기의 방전이 다수 발생한 결과 평균방전전하량(전압)은 27kV보다 낮게 계산되었다. 방전위상각에 따른 3차원분포를 구성하여 살펴본 결과, 0~140°와 180~290°에서 부분방전이 주로 발생하였으며 이것은 보이드성 부분방전과 함께 침전극에 의한 불평등전계로 인한 부분방전이 함께 주요 방전원이 되었다는 것을 추정할 수 있게 하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] N. H. Ahmed, N. N. Srinivas, "On-line Partial Discharge Detection in Cables", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 5, No 2, pp. 181-188, 1998
- [2] IEC standard 60270, Partial Discharge Measurements, pp. 1-57, 1980