

## 고압전동기 고정자권선의 턴단락 및 소선단락 써지시험 특성분석

공태식, 김희동, 이영준  
한전전력연구원

### Surge Property Analysis for Shorted Turn and Shorted Strand in High Voltage Motor Stator Winding

Tae-Sik Kong, Hee-Dong Kim, Young-Jun Lee  
Korea Electric Power Research Institute

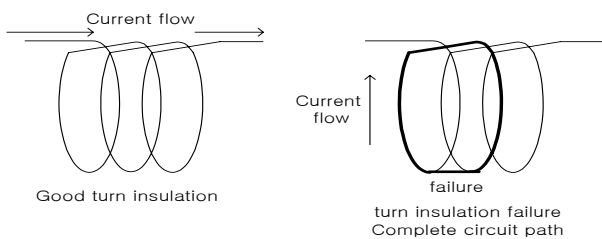
**Abstract** - This paper is purpose to understand the surge property for the shorted turn or shorted strand in high voltage motor stator windings. a shorted turn in high voltage motor windings causes a huge circulating current, and overheat windings, consequently burns the motor. a few shorted strands not cause winding failure immediately, but they increase the winding loss and temperature increase due to contact resistance.

We carried out the surge test for three cases, normal winding, shorted turn winding and shorted strand winding. and we analyzed the test result.

#### 1. 서 론

고압전동기 고정자권선에 흐르는 전류는 전동기 용량에 따라 달라지며 전류에 비례하여 고정자권선의 소선 가닥수가 결정된다. 전류의 표피 효과 때문에 같은 단면적이라도 동선 하나로 제작하는 것보다는 소선의 개수를 여러 개로 하는 것이 효율적이며, eddy current의 감소를 위해서라도 단선보다는 소선으로 제작하는 것이 유리하다. 또한 하나의 굵은 동선으로 전동기 고정자권선을 제작하면 구부리고 하는 성형공정이 어려워 제작의 용이성 면에서도 단선보다는 소선이 좋다. 소선절연이 제작과정 중 또는 운전중 진동 및 동도체에서 발생하는 주열에 의해 열화되어 소선간 단락이 발생하게 된다. 같은 턴에 있는 소선간 단락은 동전 위이기 때문에 당장 큰 문제는 발생하지 않는다. 그러나 단락부위에서 접촉저항이 증가하여, 다른 부분보다 열발생이 높게 나타나게 되어 전동기 고정자권선의 열화를 심화시킬 수 있다. [1]

턴절연의 목적은 턴간 단락방지에 있으며, 턴간 단락이 발생하면 변압기 2차측과 같이 작용하여 턴 수에 비례하는 막대한 전류가 유기되어 고정자권선에 홀려 단락부위를 과열시키며 수 초~수 분 내에 전동기를 소손시키게 된다. 따라서 턴간 절연상태를 파악하는 것이 전동기 안정운전에 중요한 요소 중 하나이다.



〈그림 1〉 턴간절연재료의 파괴

본 논문에서는 6.6kV 고압전동기 고정자권선을 모델로 하여 턴간단락 및 소선단락을 모의하여 모델코일을 제작하고, 써지시험을 실시하여 정상코일과의 특성을 비교 분석하였다. 전동기 권선에 써지펄스를 인가하게 되면 권선에 있는 인덕턴스(inductance) 성분과, 써지펄스 시험기에 있는 캐패시턴스(capacitance) 성분 사이에 충전과 방전이 번갈아 발생하는 공진현상이 발생하게 된다. 이때 공진 주파수 (resonant frequency)는 아래와 같이 주어진다. [2]

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

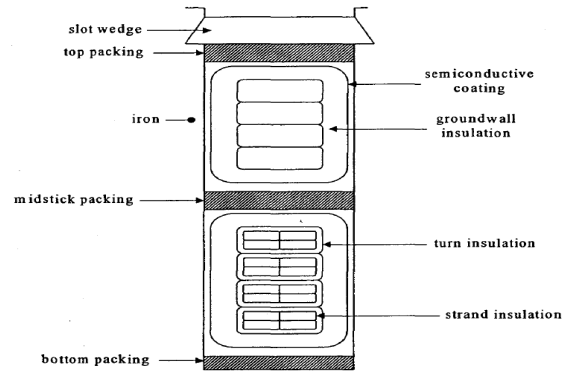
위 식에서 알 수 있듯이 턴간 단락이 발생하여 권선의 턴수가 줄어들면 인덕턴스(L)가 감소하게 되며 따라서 공진주파수(F)는 증가하게 된다. 따라서 권선에 써지펄스를 인가하여 공진파형을 측정함으로써 턴간 절연의 열화에 의한 도체간 단락현상을 알 수가 있게 된다. 또한 정상코일에서 측정된 공진파형을 턴간 단락시에 나타나는 공진파형 및 같은

턴 내에 있는 소선간 단락시에 발생하는 파형과 비교 분석하였으며, 이를 토대로 턴간 단락 및 소선간 단락의 진단방법을 검토해 보았다.

#### 2. 본 론

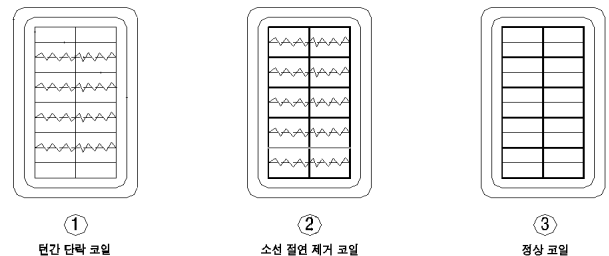
##### 2.1 모델코일 제작

고압전동기 고정자권선의 일반적인 구조는 그림2와 같이 동도체, 소선절연, 턴절연, 주절연, 반도전층 등으로 이루어져 있으며, 1턴 안에 있는 4가닥 소선들은 권선 말단에서 모두 하나로 접속되어 다음 권선과 연결된다.



〈그림 2〉 고정자권선 단면도

금번에 제작한 모델코일은 6.6kV급 고압전동기 고정자권선을 모델로 하였으며 제작한 모델코일은 3종류로써 정상권선과 턴간단락 모의권선, 소선간 단락 모의권선을 제작하였다. 모델권선의 단면도는 그림 3과 같으며, 고정자권선의 양단에 대하여 각각 30cm씩 결함을 주었으며, 그 외에는 전동기 권선제작과 마찬가지로 진공가압합침 등 공정을 모두 거쳤다.



〈그림 3〉 모델권선 단면도

##### 2.2 써지시험 및 분석

그림 4와 같이 모델코일 3개의 권선 한쪽 끝단을 모두 연결하여 고압전동기 고정자권선처럼 중성점을 만들어 Y결선된 3상을 모의하였다. 시험은 써지시험을 실시하였으며, 시험에 이용한 장비는 미국 Baker사의 AWAV를 사용하였다. 표1과 같이 A상과 B상에는 모두 정상코일을 두고 C상에만 정상코일, 턴간단락 및 소선단락 결함을 준 모델코일로 바꿔가며, 실험을 실시하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

〈표 1〉 써지시험 조합

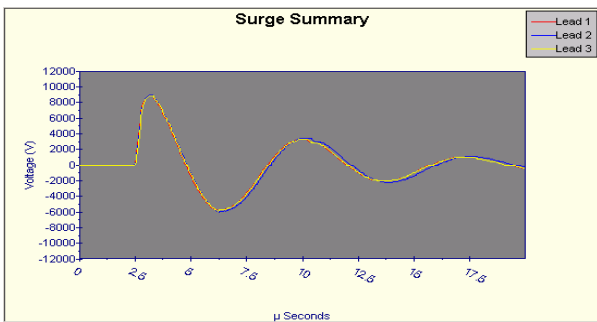
시험조합	A상	B상	C상
Case 1	Normal	Normal	Normal
Case 2	Normal	Normal	Shorted Turn
Case 3	Normal	Normal	Shorted Strand



〈그림 4〉 써지시험 장면

### 2.2.1 정상코일

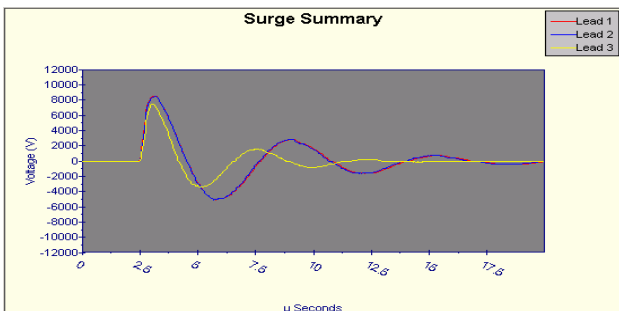
정상코일로만 3상을 모의한 시험결과화면은 그림5과 같이 3상 모두 공진파형이 정확히 일치하였으며, 이는 3상의 공진주파수가 모두 같음을 의미하고, 따라서 다른 상과 비교하여 인덕턴스의 감소를 유발하는 턴수의 감소 즉, 턴간단락 현상이 나타나지 않았다는 것을 알 수가 있다.



〈그림 5〉 정상코일 써지시험 결과화면

### 2.2.2 턴간단락

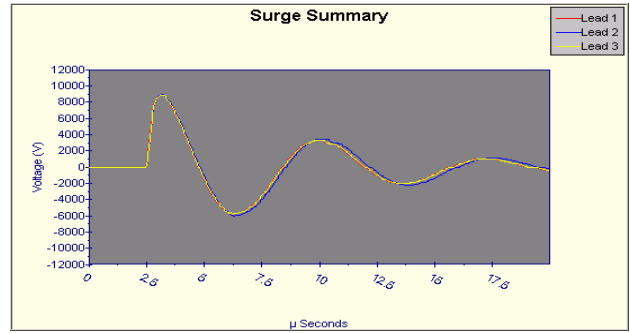
A상과 B상에는 정상코일을 C상에는 턴간단락 모델코일을 시험한 결과화면은 그림6과 같이 A상, B상에 비하여 C상 (Lead 3)의 공진파형이 시간축 상에서 왼쪽으로 이동하여 나타나는 현상을 보였으며, 이는 공진주파수가 증가하는 것으로써 인덕턴스(L) 값이 다른 상에 비해 작다는 것을 의미한다. 즉, 인덕턴스가 작다는 것은 다른 모든 조건들은 나머지 상들과 동일하므로, 코일의 감긴 횟수 즉 턴수가 작다는 것을 의미하며, 이는 고정자권선내의 턴간 절연이 불량하다는 것으로 이해할 수 있다.



〈그림 6〉 Shorted Turn 써지시험 결과화면

### 2.2.3 동일 턴내의 소선간 단락

A상과 B상에는 정상코일을 두고 C상에는 동일한 턴 내에서 소선간 단락 현상이 발생한 것을 모의한 모델권선으로 전동기 고정자 권선을 모의한 회로에 대한 써지시험 결과 파형 화면은 그림7과 같다.



〈그림 7〉 Shorted Strand 써지시험 결과화면

그림에서 모두가 A상과 B상의 정상코일과 C상의 소선간 단락코일의 써지시험 결과파형에 차이가 전혀 없음을 알 수 있다. 이는 정상코일로만 시험했던 Case1의 결과와도 일치하였다. 동일한 턴 안에서 발생한 소선간 단락현상은 턴수의 감소에 따른 인덕턴스 값의 감소를 야기시키지 않으므로 공진주파수에는 아무런 영향이 없다는 것을 알 수 있으며, 따라서 써지시험으로는 동일 턴내에서 발생한 소선간 단락현상은 알 수가 없음을 확인할 수 있었다.

소선간 단락현상이 발생하면 턴간 단락처럼 매우 큰 순환전류가 유기기 되는 등의 위험상황이 즉시 발생하지는 않으나, 소선간 접촉이 된 상태로 전동기를 계속 운전하면, 접촉저항에 의한 열을 발생시켜 주변 절연물의 열화를 촉진시키는 역할을 하게 된다. 따라서 소선을 여러 가닥 사용하는 대용량 전동기들은 제작시에 각각의 코일에 대하여 다음 코일과 연결시키기 전에 코일 양쪽 끝단의 소선들을 이격시킨 후 각 소선사에 일정한전압 (1턴에 걸리는 전압정도)을 인가하여 소선간 단락여부를 시험하고 이상이 없는 것을 확인 후 다음 코일과 연결하는 것이 바람직하다고 할 수 있으며, 코일들을 연결하여 제작 완료된 전동기에서 동일 턴내의 소선단락 유무를 확인하기는 거의 불가능하다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 고압전동기 고정자 권선에서 발생할 수 있는 턴간 절연물 및 동일 턴내의 소선간 절연물의 열화로 인한 단락현상을 모의하고 써지시험을 실시하여 각각의 현상들에 대한 아래와 같은 특성들을 알 수 있었다.

1. 소선간 절연물의 결함으로 동일 턴내에서 발생한 소선단락은 턴 수의 변화와는 무관하여 공진주파수에는 아무런 영향이 없어 써지시험으로는 소선단락을 확인이 불가능함을 알 수 있었다.
2. 턴간단락된 코일은 턴수가 줄어드는 역할을 하여 인덕턴스의 감소를 초래하여 공진주파수를 높여 써지시험을 통한 확인이 가능하였다.
3. 따라서 여러 가닥의 소선을 사용하는 대용량 전동기들은 제작 당시에 코일 각각에 대하여 소선간 절연확인 여부를 확인하는 과정, 즉 코일 양쪽끝단의 소선들을 이격시키고, 일정전압을 걸어 open회로된 것을 확인하는 것이 바람직하며, 코일들을 연결하여 완성한 전동기들에 대한 소선절연 여부를 확인하는 것은 불가능하다.

## [참 고 문 헌]

[1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani "Electrical Insulation for Rotating Machines", pp12-14, 2003  
 [2] "IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternation-Current Rotating Electric Machines", IEEE Standards Board, IEEE Std 522-1922.