

회전자권선 단락에 의한 소용량 동기발전기의 공극자속파형 특성 연구

김동훈\*, 송명곤\*\*, 김태영\*, 박상배\*\*\*,  
\*경북대학교, \*\*벡터필드코리아(주), \*\*\*위덕대학교,

A research on air-gap flux characteristics caused by a short-circuit at rotor windings

Dong-Hun Kim\*, Myung Kon Song\*\*, Tae-Young Kim\*, Sang-Bae Park\*\*,  
\*Kyungbuk Univ. \*\*VFK \*\*\*Uiduk Univ.

**Abstract** - 전력수요의 증가에 대하여 전력을 공급하는 발전기의 대용량화, 고전압화, 소형경량화 등에 따라 발전기 고장 예방을 위한 진단이 더욱더 중요시되고 있다. 이들 발전기의 전기적 고장의 대부분은 고정자 및 회전자 권선에서 발생하며 이의 고장을 복구하는데 장시간이 요구되므로, 발전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 미연에 발견하고 불시정지에 따른 파급을 막기 위해서는 상시감시가 요구된다.

본 연구에서는 소용량 동기발전기를 이용하여 발전기 회전자권선의 단락 고장진단을 위한 공극에서의 자속패턴을 상용 전자장해석 전문프로그램을 이용하여 수치적으로 계산하여 도출하였으며, 또한 실제 회전자 권선 단락 실험을 통하여 실제 공극에서의 자속패턴과 전자장 해석결과와 비교를 하여 전자장 해석결과의 신뢰성을 확보 하였다.

극적 목표인 대용량 동기발전기 회전자권선 단락사고 감시 및 진단이라는 목적과는 정확히 부합하지 않는다. 즉, 여자권선에서 발생하는 자속패턴을 정확히 측정하기 위해서는 무부하 상태에서 전기자 권선에 전류가 흐르지 않는 타여자 방식이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 적당한 용량의 3상 동기전동기를 선택한 후, 기동용 농형구조물을 제거하여 발전기로 사용하였다. 실험에서 발전기를 구동시키기 위한 원동기는 유도전동기를 사용하였으며 유도전동기의 회전속도에 맞추기 위하여 발전기 회전자의 극수는 4극으로 선정하였다. 또한 발전기의 용량은 부하변동이 기동용 유도전동기의 속도에 영향을 주지 않도록 소형으로 채택 하였으며, 발전기의 유기전압, 여자전류 및 각 상의 전류, 그리고 공극에서의 자속밀도를 측정할 수 있는 구조로 선정하였다. 이러한 내용을 고려하여 최종 선정된 발전기는 정격용량 400W, 정격전압 220V, 회전속도 1800rpm인 3상 타여자 방식의 동기발전기로 정확한 발전기 재원은 표.1과 같다.

1. 서 론

발전기의 고장 진단 방법으로는, 발전기 운전중 회전자 고장 권선에서 부분방전을 측정하기 위해서 대용량 고압 전동기 및 발전기에 커플러(Couplers)를 설치하고 부분방전을 감시함으로써 고정자 권선의 고장진단을 수행하는 방법이 있다. 또한 절연열화 상태를 진단하는 연구는 1980년대 후반부터 본격적으로 시작되었으며, 처음에는 부분방전분석기(Partial Discharge Analyzer:이하 PDA)를 이용하여 수력 발전기의 고정자 권선의 고장진단을 수행하였으며 1990년대 초부터는 터빈발전기 분석기(Turbine Generator Analyzer:이하 TGA)가 개발되어 화력 발전기에 확대 적용되고 있다. 여자 권선의 경우에는 보다 쉬운 방법으로 공극에서의 자속밀도를 홀센서나 픽업코일로 측정한 후, 이를 분석하여 고장을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 기존의 발전기 고장 진단 방법은 실제적인 고장 발생 후에 그 결과를 측정하여 진단하는 방법이거나 상시 감시 시스템의 경우에도 정상상태와 고장상태를 구분할 뿐 고장의 종류 및 그 심각성을 알기는 어렵다. 본 논문에서는 소용량 동기발전기를 이용하여 발전기 회전자권선의 단락 고장진단을 위한 공극에서의 자속패턴을 상용 전자장해석 전문프로그램을 이용하여 수치적으로 계산하여 도출하였으며, 또한 실제 회전자 권선 단락 실험을 통하여 실제 공극에서의 자속패턴과 전자장 해석결과와 비교를 하여 전자장 해석결과의 신뢰성을 확보 하였다.

2. 본 론

2.1 소용량 발전기 재원

일반적으로 3상 동기발전기는 대용량에 많이 사용되는 방식으로 소형으로 제작되는 경우는 거의 없으며, 설령 있다하더라도 대용량 동기발전기와는 구조가 전혀 다른 타여자 방식을 채택하고 있다. 따라서 본 연구의 궁

표 1. 소용량 발전기 재원  
Table 1. Specification of a synchronous generator

치수	정격용량	0.4 kVA	정격전압	220 V
	회전속도	1,800 rpm	공극	0.3 mm
	고정자내경	70.0 mm	회전자외경	69.4 mm
고정자	전기자 슬롯수	24	전기자 층수	2 층권
	슬롯당 권선수	76 turn	극수	4 극
회전자	여자전류	1.5 A	여자전압	50 V
	권선 수	460 turn	축 길이	55 mm

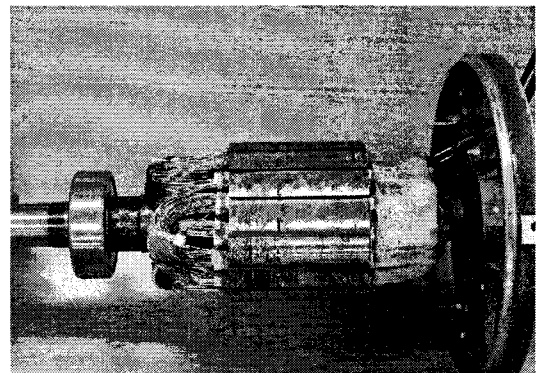


그림 1 소용량 발전기 회전자 구조  
Fig. 1 Rotor structure



그림 2 공극자속 측정용 픽업코일  
Fig. 2 Pick-up coil for air-gap flux measurement

2.2 픽업코일 재원 및 공극자속파형 측정실험

자장을 측정하는 일반적인 방법은 가우스 미터(Gauss meter) 또는 홀 센서(Hall sensor)를 이용하거나 교류 자장인 경우 픽업 코일(pick-up coil)을 제작하여 사용하는 방법 등이 있다. 그러나 실험에 사용된 발전기는 공극이 0.3mm로 가우스 미터나 홀 센서의 설치가 불가능하고, 설치를 위하여 철심을 가공할 경우 출력저하가 우려되므로 픽업 코일을 자체 제작하여 외부에서 calibration을 거쳐 발전기에 설치하였다.

픽업 코일은 발전기의 공극을 고려하여 표 2과 같이 제작하였으며, 그림 2은 실험을 위해 발전기에 설치된 픽업 코일을 나타내고 있다.

표 2. 픽업 코일의 제원  
Table 2. Specification of pick-up coil

턴수	3 turns
형상	원형
내경	5mm
면적	19.635mm <sup>2</sup>
선 직경	0.1mm

소용량 발전기의 회전자 권선 단락실험은 다음과 같이 진행 하였다. 먼저 무부하 정상상태에서 자속패턴을 측정하였고, 과도상태에서 벗어나 정상상태에 진입한 다음

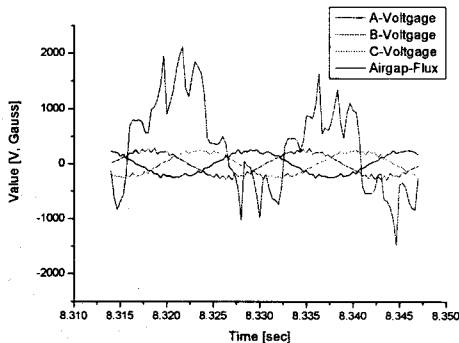


그림 3 무부하 실험 결과  
Fig. 3 No-load experiment result

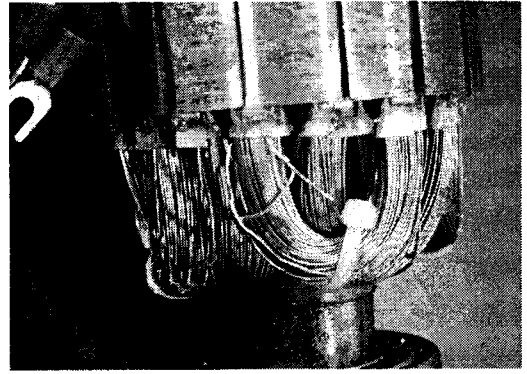


그림 4 회전자 권선 단락사고 모  
Fig. 4 Short-circuit on rotor winding

의 데이터를 얻기 위하여 가능하면 30초 이상 지속하여 데이터를 얻었다. 그림 3은 무부하 정상상태에서 얻은 자속패턴 및 각상의 유전압으로 중심이 정확하게 맞지는 않는 것을 알 수 있다. 이에 대한 원인으로는 발전기의 축이 정확히 중앙에 위치하지 않는 경우와 실험을 위한 잣은 분해조립으로 인하여 기계적인 진동이 발생한 것을 들 수 있겠다. 실제로 측정 데이터를 분석한 결과 상당히 긴 주기로 자속패턴이 진동하는 것을 볼 수 있다.

4극 발전기에서는 전기적인 한 주기가 기계적인 반 주기에 해당하고, 자속 패턴을 보면 1회전에 모두 16개의 극대(또는 극소) 값이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 회전자의 슬롯이 16개로 각각의 회전자 권선에서 발생하는 자속을 그대로 나타내고 있는 것이다. 따라서 어느 한 슬롯의 회전자권선에 사고가 발생한다면 해당 슬롯에서 발생하는 자속이 감소할 것이며, 이는 자속 패턴에 영향을 준다는 것을 예상할 수 있다. 이러한 내용을 확인하기 위하여 그림 4와 같이 회전자권선에 인위적인 사고를 내어 자속 패턴을 측정하였다. 인위적인 사고를 발생시킨 다음 회전자권선의 저항을 측정한 결과 원래의 230턴이 91턴으로 변경된 것을 확인 할 수 있었다.

인위적으로 사고를 발생시킨 회전자를 이용하여 자속 패턴을 측정한 결과가 그림 5에 나타나 있다. 실험하기 전에는 하나의 슬롯에 해당하는 자속만 차이가 발생할 것으로 예상하였으나 그림 3과 그림 5를 비교하면 다른 슬롯에서도 차이가 발생하는 것은 확실하나 그 차이를 정확히 집어내기가 어렵다.

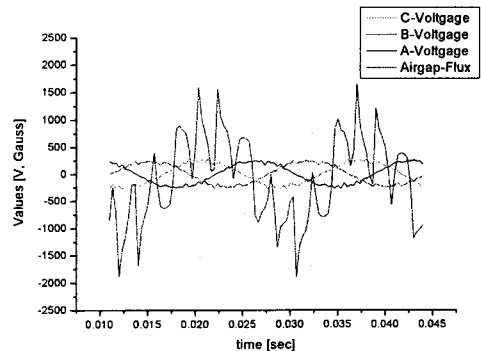


그림 5 무부하 사고상태 실험 결과  
Fig. 5 Short-circuit experiment result

### 2.3 발전기 전자기 해석 및 결과

2.1절에서 주어진 데이터를 바탕으로 그림 6과 같이 소용량 발전기의 전자기 해석모델을 구축하였다. 실험에 사용된 발전기는 회전자 슬롯이 16개로 한 자극이 차지하는 슬롯 수는 4이다. 따라서 2개의 회전자 권선이 4개의 슬롯에 나뉘어 감겨져 있는 형태이다. 한편 전기자 슬롯은 24개로 전체 발전기는 1/4 대칭성을 나타내고 있지만 본 논문에서는 그림 6과 같이 편의상 전체 모델의 반을 취하여 해석을 수행하였다.

실험에 사용된 발전기의 회전자는 유도전동기에 사용되는 철심을 이용하여 이루어져 있다. 슬롯 수는 16으로 4극 발전기를 만들기 위해서는 자극 당 4개의 슬롯이 할당된다. 실제로는 230턴의 회전자권선 두 개를 4개의 슬롯에 교차하여 삽입한 구조로 되어있다. 따라서 하나의 슬롯에는 230턴의 회전자권선이 위치하고 있으며, 실험에서 회전자전류는 턴 당 1.25A로 운전하였으므로, 해석에서 사용된 한 슬롯에서의 회전자 전류는  $230 \times 1.25$  이다. 4극을 만들기 위해서는 아래 그림과 같이 배열한 다음 +2의 대칭성(대칭 경계면을 기준으로 같은 전류방향)을 부여하게 된다.

또한 전기자 권선의 구조는 2층권으로 슬롯 당 권선 수는 76턴이므로 해석 시 슬롯 당 한 상의 전기자전류는  $76/2$  부하전류임을 알 수 있다. 한편 전기자 권선은 2층권에 전체 슬롯 수는 24이며, 슬롯 피치는 5이다. 따라서 해석모델에서는 전기자 슬롯을 같은 면적을 갖도록 2층으로 나누어 각각에 권선을 위치시켰다.

정지 상태에서는 주어진 회전자 권선과 전기자 권선의 배열에 의하여 그림 7과 같은 자기력선 분포를 나타낼 것이다. 하지만 본 연구에서의 모델은 여기에 회전운동이 더해져 보다 복잡한 결과를 나타낼 것이다. 앞에서 만든 모델을 이용하여 무부하 정상상태 및 무부하 사고 발생 시 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

과도상태를 벗어난 다음의 결과를 얻기 위하여 한 주기 이후의 데이터를 취득하였으나, 아직 정상상태에 이르지 않아 자속패턴이 아래로 편중된 것을 확인할 수 있다.

정상상태와 사고상태의 경우를 비교해 보면 인위적으로 사고를 발생시킨 슬롯에서만 권선 수에 비례하여 자속밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 실제 대형 발전기의 경우 회전자권선이 굵은 각선으로 이루어져 있기 때문에 단선이 나는 경우 사고 위치와 사고의 정도를 예측할 수 있으리라 평가된다.

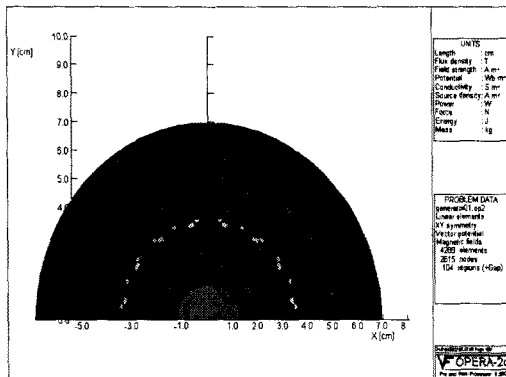


그림 6 전자기장 해석 모델  
Fig. 6 Model for electromagnetic analysis

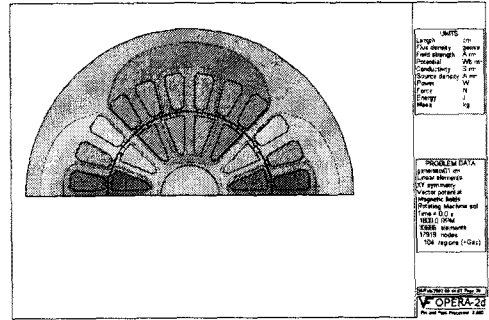


그림 7 정지상태의 자기력선 분포  
Fig. 7 Magnetic flux line

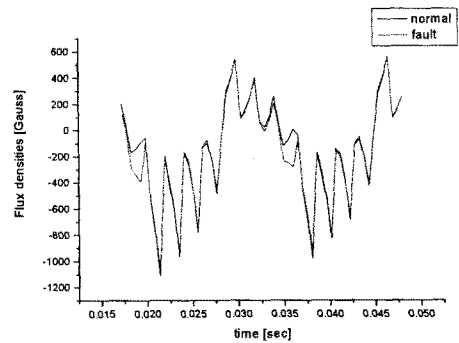


그림 8 전자기장 해석 결과  
Fig. 8 Electromagnetic analysis result

### 3. 결 론

소형 발전기를 이용하여 공극에서의 자속패턴을 측정하였다. 이를 위하여 Pick-Up 코일을 제작하여 전기자 철심에 부착한 다음 무부하 및 부하를 연결한 상태에서 실험을 수행하였으며, 회전자권선을 단락시킨 상태에서도 자속패턴을 측정하였다. 또한 OPERA-2d/RM 프로그램을 이용하여 측정용 발전기에 대한 2차원 전자기장 해석을 수행하여 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 실험용 발전기의 권선 상태가 불량하여 그 결과가 완전히 일치하지는 않지만 전반적으로 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-7-068)주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] Markus Zahn, Electromagnetic Field Theory, John Wiley & Sons, pp.331, 1979
- [2] Vectorfields, "OPERA-2d Reference Manual". Vectorfields, v9.0, 2003