

Analysis on Air-Gap Magnetic Flux of Synchronous Generator According to Short-Circuit Types in Winding

배 덕 권[†] · 김 동 훈* · 박 중 신** · 이 동 영*** · 이 성 일[§]

(Duck Kweon Bae · Dong-Hun Kim · Jung-Shin Park · Dong-Young Lee · Sung Ill Lee)

Abstract - As modern industrialized society progresses, the demand for electric power is increasing rapidly. The electric power system is getting amazingly bigger and complicated, which can easily induce serious troubles from the potential of large fault problems and/or system failure. The monitoring and diagnosis of the electric machine for the fault detection and protection has been important part in the electric power system. Most faults in the generator appear in the winding. This paper presents the air-gap magnetic flux characteristic of a small-scale 2-pole synchronous generator according to the faults in the field winding to protect the generator from the fault. The magnetic flux patterns in air-gap of a generator under various fault conditions as well as a normal state are simulated by using finite element method. These results are successfully applied to the detection and diagnosis of the short-circuit condition in rotor windings of a high capacitor generator.

Key Words : Synchronous generator, Air-gap magnetic flux, Finite element method, Short-circuit, Protecting method

1. 서 론

동기발전기의 기계적 고장을 감시하고 진단하는 기술은 이미 상용화되어 현장에서 많이 활용되고 있으나 전기적 고장에 대한 감시 및 진단 기술은 아직 초기기술개발단계로 국내·외 소수 대학 연구실을 중심으로 한 소규모 연구가 진행되고 있다. 특히 운전 중인 동기발전기의 전기적 고장에 대한 진단 기술에 관련한 국내·외 연구논문 및 기술개발 자료가 전무한 실정이며 따라서 이에 대한 연구는 거의 수행되지 않고 있다고 사료된다. 현재 개발된 발전기의 전기적 고장진단 방법으로는, 대용량 고압 전동기 및 발전기에 커플러(Couplers)를 설치하고 부분방전을 측정·감시함으로써 고정자 권선의 고장진단을 수행하는 방법이 있다. 또한 절연 열화 상태를 진단하는 연구는 1980년대 후반부터 본격적으로 시작되었으며, 처음에는 부분방전분석기(PDA: Partial Discharge Analyzer)를 이용하여 수력 발전기의 고정자 권선의 고장진단을 수행하였으며 1990년대 초부터는 터빈발전기분석기(TGA: Turbine Generator Analyzer)가 개발되어 화력 발전기에 적용되고 있다. 이러한 기존의 동기발전기 고장 진단 방법은 상시 감시 시스템의 경우에도 정상상태와 고장상태를 구분할 뿐 고장의 위치 및 그 심각성을 예측하

기는 어렵다. 또한 사선진단의 경우 실제적인 사고 발생 후나 정기적인 점검 시 전체 발전기시스템의 정지 후 진단으로 사고 위치의 대략적 판단정도가 가능하다 [1], [2].

본 연구는 동기발전기 권선단락사고의 정확한 진단이 목적이다. 이를 위하여 우선 전자장해석 기법을 활용하여 회전자권선에 대한 공극자속파형패턴 시뮬레이션수행 후 이를 활용한 회전자권선의 파형과 비교하여 향후 수행할 단락사고 해석을 위한 기본 자료를 확보하고자 하였다. 본 연구를 바탕으로 실제 실험으로 연기가 어려운 발전기 고장 시 발생하는 여러 가지 종류의 자속 패턴 및 전압파형을 데이터베이스(Database: 이하 DB)화 할 수 있으며, 나아가 이를 활용하여 동기발전기의 회전자권선의 절연이상 징후 및 고장 시 신속하고 정확한 감시 및 진단을 가능케 된다.

2. 2극 동기발전기 해석 및 실험

2.1 2극 동기발전기의 사양

표 1은 본 연구에 해석 및 실험에 사용된 2극 동기발전기의 사양을 나타낸다. 2극 동기발전기이므로 회전자의 회전속도를 1,800rpm으로 하여 출력전압의 주파수는 30Hz로 설계하였으며 한 상의 출력전압은 5V가 되도록 설계하였다. 전기자 내경은 188mm이고 회전자의 외경은 181.54mm이므로 본 발전기의 공극길이는 3.23mm였다. 전기자 슬롯수는 총 36개였으며 2층권으로 구성되었다. 회전자 권선수는 슬롯당 8턴이었으며 여자전압 5V로 1A의 여자전류가 회전자권선에 인가되도록 설계하였다. 또한 회전자의 축길이는 200mm였다. 그림 1은 회전자의 구조 및 권선형태를 나타내고 있다.

† 교신저자, 정회원 : 충주대 공대 안전공학과 조교수 · 공박
E-mail : dkbae@cjnu.ac.kr
* 정 회 원 : 경북대 공대 전자전기컴퓨터학부 조교수 · 공박
** 정 회 원 : 위덕대 공대 전기공학부 조교수 · 공박
*** 정 회 원 : 위덕대 공대 전기공학부 부교수 · 공박
§ 정 회 원 : 충주대 공대 안전공학과 교수 · 공박
접수일자 : 2009년 3월 20일
최종완료 : 2009년 3월 24일

표 1 2극 동기발전기의 사양

Table 1 Specification of 2-pole synchronous generator

발전기	상출력전압	5 V	주파수	30 Hz
	회전속도	1,800 rpm	공극	3.23 mm
	전기자내경	188 mm	회전자외경	181.54 mm
전기자	전기자슬롯수	36	전기자층수	2 layer
	슬롯당권선수	8 turns/slot 4 turns/layer	극수	2 pole
회전자	여자전류	1 A	여자전압	5 V
	권선수	5 turns/slot	축길이	200 mm

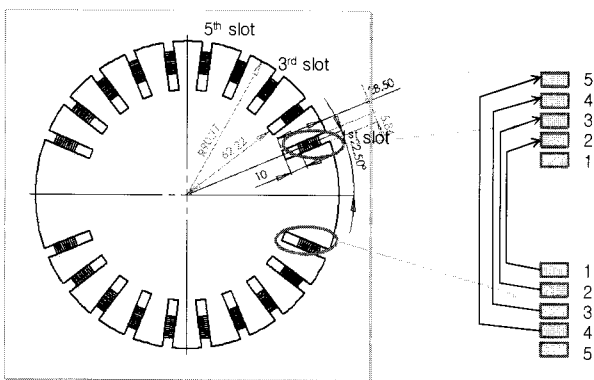


그림 1 회전자의 구조
Fig. 1 Structure of rotor

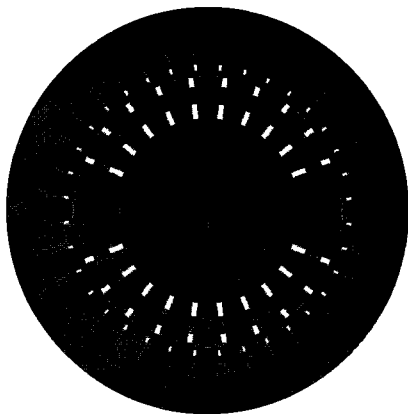


그림 2 2차원 유한요소 모델링
Fig. 2 2D modeling for FEM analysis

2.2 2극 동기발전기의 모델링

그림 2는 본 연구에 사용된 2극 동기발전기의 유한요소 해석을 위한 2차원 모델을 보여준다. 표 1의 사양을 기반으로 발전기 해석 모델 구축을 위한 2차원 도면을 작성한 후, 이 도면을 바탕으로 상용 전자장 해석도구인 MagNet을 이

용하여 유한요소(finite element) 모델을 구축하였다 [3]. 해석에 사용된 동기발전기의 전기자슬롯 및 회전자 슬롯은 제작한 발전기와 동일한 구조이며 여자전류로는 직렬로 연결된 여자권선에 1A가 흐르도록 하였다.

2.3 유한요소 모델의 자장해석 결과

그림 3은 본 연구에서 해석한 2극 동기발전기의 2차원 자장분포를 나타낸다. 회전기의 해석에 앞서 정자장 상태에서의 자장분포 해석을 먼저 수행하여 해석을 위하여 나눈 유한요소 메쉬의 타당성과 상용 해석도구의 성능을 검증하였다. 본 정자장 해석으로 정량적인 평가까지 수행할 수는 없으나 자속밀도 분포로써 경험적 메쉬의 타당성과 해석도구의 성능을 알 수 있다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 자극 사이로 형성된 등자속선 및 자속분포에서 메쉬 오류 및 자장의 이상분포는 관측되지 않았다.

2.4 2극 동기발전기 모의 고장 실험

그림 4는 모의 고장 시험을 위해 제작된 2극 동기발전기를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 대형동기발전기와 같은 구조로 설계 제작되어, 비돌극형 회전자 및 타여자 방식으로 운전된다. 그리고 다양한 회전자 및 전기자 권선의 단락 실험을 위해 정상상태 권선을 각 단락실험 시 사고부분을 단락시켜 재권선 하여 실험하였다. 모의 사고 동기발전기의 구동에는 디젤 기관을 이용하였으며, 각 상 유효기전압 및 공극자속을 측정할 수 있도록 외부에 단자를 설치하였다. 또한 고정자에 설치된 홀센서로 자장의 변화를 관측하였다. 모든 실험데이터는 SCXI 모듈과 LabVIEW로 제작한 프로그램을 통하여 실시간으로 데이터를 모니터링하면서 저장하였다.

표 2는 본 연구에서 수행한 회전자 모의 고장 시험의 종류를 나타낸다. 그림 1에 나타난 슬롯 1, 2, 3에서 상부 도체 중 일부를 단락시켜 여러 가지 회전자 권선 단락을 모의하였다. 표 2의 S는 슬롯을 의미하고 C는 케이스를 의미한다. S1C1은 회전자 슬롯 1 상부의 2번과 3번 도체를 서로



그림 3 정자장 자장해석 결과
Fig. 3 Simulation result of static magnetic field analysis

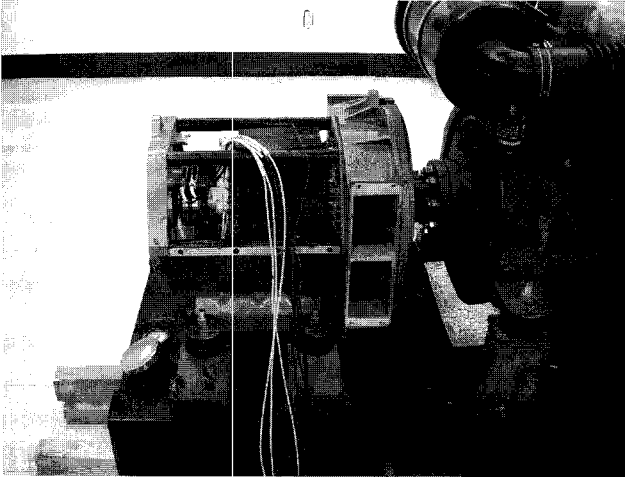


그림 4 고장 시험용 동기발전기
Fig. 4 Synchronous generator for fault test

표 2 회전자 권선 고장 모드
Table 2 Modes for fault of rotor winding

	2-3 short	3-4 short	4-5 short	2-3-4 short	3-4-5 short	2-3-4-5 short
1st slot	S1C1	S1C2	S1C3	S1C4	S1C5	S1C6
3rd slot	S3C1	S3C2	S3C3	S3C4	S3C5	S3C6
5th slot	S5C1	S5C2	S5C3	S5C4	S5C5	S5C6

단락시킨 것을 의미하며 S3C6는 회전자 슬롯 3의 2번에서 5번 도체까지를 단락시킨 것을 의미한다. 본 시험 시의 여자전류는 1.84A였다.

3. 결과 및 검토

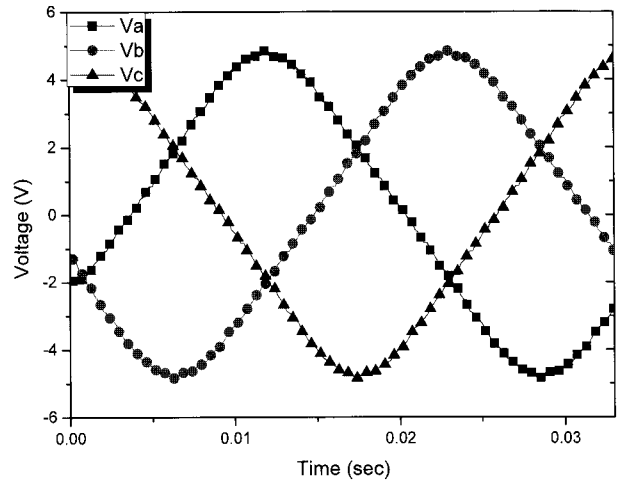
3.1 정상상태 출력 전압

그림 5는 정격속도 1800rpm으로 회전하고 있는 2극 동기발전기의 출력파형을 나타내고 있다. (a)는 실제 발전기의 출력을 DAQ 장비를 통해 측정된 결과를 나타내고 있고 (b)는 유한요소 해석으로 구한 출력전압을 나타내고 있다. 최대값 약 5V의 출력이 관측되고 있으므로 설계치에 맞는 해석결과가 나왔으며 실제 제작한 2극 동기발전기도 설계사양을 만족하는 것으로 나타났다. 단 실측한 결과에 나타나 있듯이 C상의 전압이 약간 높게 관측되었는데 이는 제작 시 발생한 전기자 권선오차에 기인하는 것으로 생각된다.

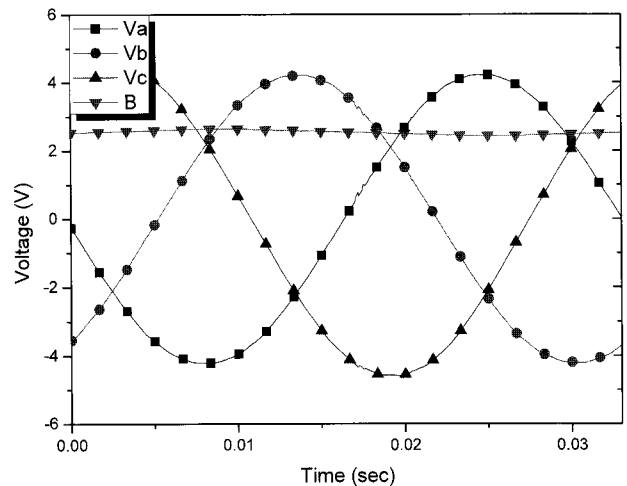
3.2 정상상태에서의 공극 자속

그림 6은 전자기해석으로 계산된 공극자속 파형 과 실험에서 측정된 공극자속 파형을 보여준다. 실험에서 직접 측정된 값은 홀센서에 의한 자속밀도 값인데 이를 전압으로 환산하여 시뮬레이션의 결과와 비교하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 각 파형의 최대값에서는 차이를 보이나 파형은 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 본 발전기의 계자는 극당 10개의 슬롯을 가지고 있는데 시뮬레이션과 실험 결과

모두 10개 슬롯의 자장값을 보여주고 있다. 단 그 크기에 대해서는 서로 차이를 보이고 있는데 이는 해석 시 와전류 효과를 무시한 것과 실제 발전기 제작 시 발생한 정렬권선상의 오류 등에 기인한 것으로 생각된다. 본 논문에서는 정상상태와 단락사고 시의 공극에서의 자속파형의 상대 비교를 통하여 회전자권선의 단락사고를 감지하는 데 목적이 있으므로, 측정파형과 해석파형사이의 전압의 절대치 비교 보다는 각 파형에서의 사고 시와 정상시의 크기차이에 의미를 부여하고 있다.



(a) 해석결과
(a) Simulation results



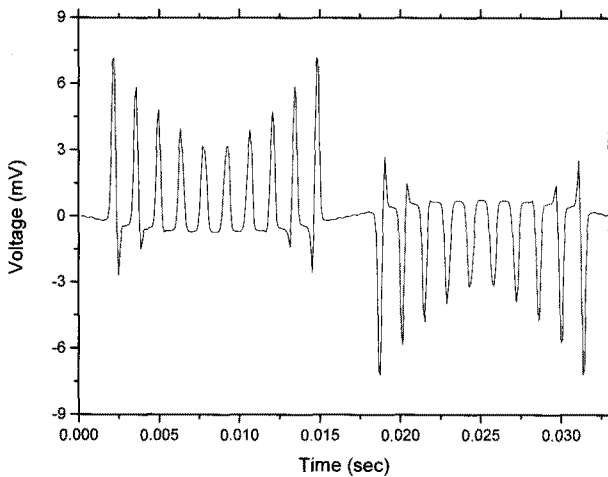
(b) 실측파형
(b) Experimental results

그림 5 발전기 출력전압
Fig. 5 Output voltages of generator

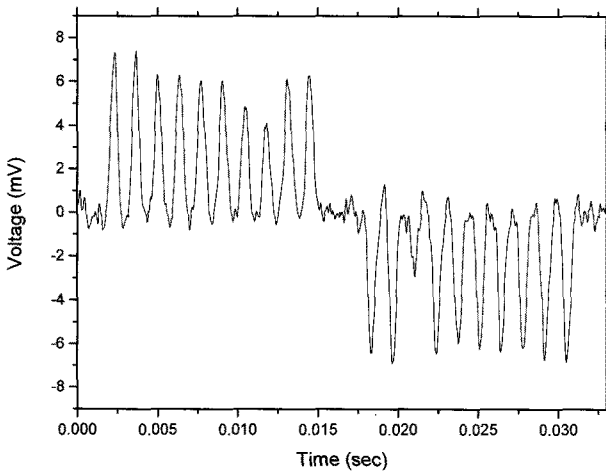
3.3 권선 단락 모의 사고 해석 결과

그림 7의 (a)는 그림 1에 나타나 있는 권선 구조에서 1번 슬롯의 2, 3번 레이어를 단락시킨 모의 사고 상태(S1C1)에서의 공극자속 파형을 그림 6 (a)의 정상상태파형과 비교한 결과를 나타내고 있다. 피크 부분을 확대시킨 점선 원 속에

나타냈듯이 정상 상태와 비교하여 중심에서 양쪽으로 1번째 전압값이 작아짐을 확인할 수 있었다. 이는 회전자의 단락으로 인한 권선수의 변화로 인한 결과이다. 단락 사고 발생 슬롯에 따른 데이터를 비교하기 위하여 3번 슬롯의 2, 3번 레이어를 단락시킨 모의 사고 상태(S3C1)의 해석 결과를 그림 7의 (b)에 나타내었다. 그림의 점선 원 속에 보이듯이 중심에서 양쪽으로 3번째 전압값에서 차이를 보이고 있다. 이 두 결과로 단락조건에 따라 영향을 받는 회전자의 단락 사고 발생 슬롯이 서로 다르다는 것을 알 수 있었다. 모든 슬롯의 단락 실험 결과, 각 정상값이 영향을 받는 단락 슬롯이 다를 수 있음을 확인하였고 이를 그림 8에 나타내었다. 이 결과를 바탕으로 어느 위치의 전압값이 정상 상태와 다르냐에 따라 어느 위치의 슬롯에서 단락 사고가 발생했는지를 확인할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 단락 사고 검출에 좋은 정보가 될 수 있다.

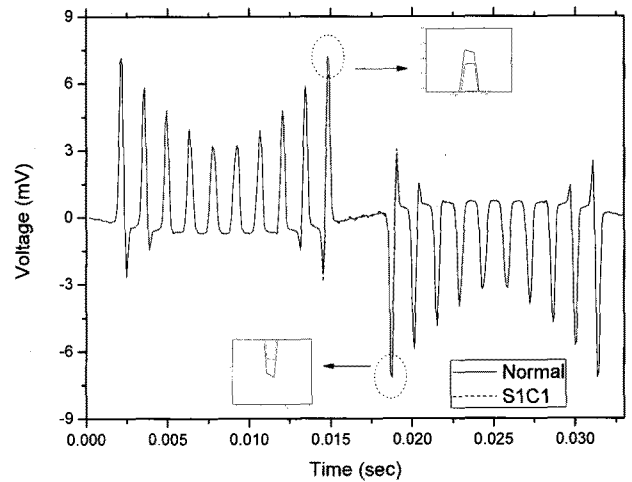


(a) 해석 결과
(a) Simulation results

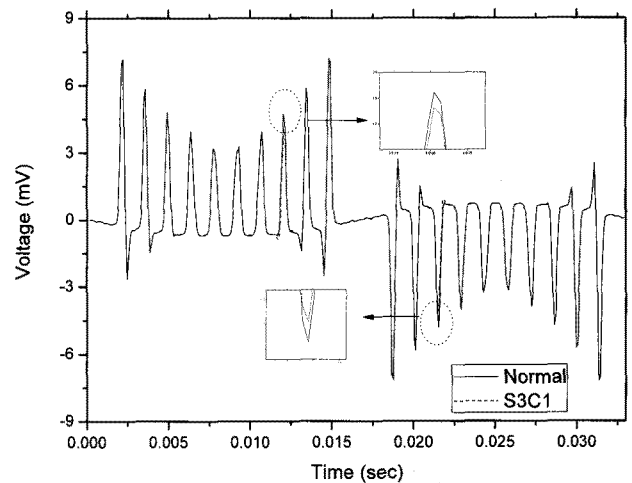


(b) 실험 결과
(b) Experimental results

그림 6 정상상태 공극자속 파형
Fig. 6 Air-gap magnetic flux at normal state



(a) 정상상태 vs S1C1
(a) Normal state vs S1C1



(b) 정상상태 vs S3C1
(b) Normal state vs S3C1

그림 7 정상상태와 모의사고 상태에 따른 공극자속 파형 비교
Fig. 7 Comparison of air-gap magnetic flux between normal state and simulated fault condition

단락 사고를 더욱 정량화된 값으로 검출하기 위해 각 슬롯에 의한 파형의 피크값을 모아 정상상태 피크값으로 정량화 하여 그림 9에 나타내었다. 이 정량화된 피크값들의 조합은 회전자의 단락 사고 검출에 범용적으로 사용될 수 있으며 이를 이용해 회전자의 단락 사고가 발생한 슬롯의 위치와 단락 권선수를 검출해 낼 수 있을 것으로 생각된다.

그림 10은 회전자 단락 사고별 정량화된 상전압 최대값을 표현한 그림이다. 이 그림에서 확인할 수 있듯이 단락 권선수에 따른 상전압 최대값은 단락 권선수가 증가할수록 작아지고, 단락 슬롯에 따른 상전압 최대값도 다를 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 각 슬롯의 단락 권선수에 따른 데이터를 확보하여 단락 권선과 단락 권선수를 유추할 수 있으나 이 값만으로는 어떤 슬롯에서 발생한 단락에 의한 결과인지를 정확

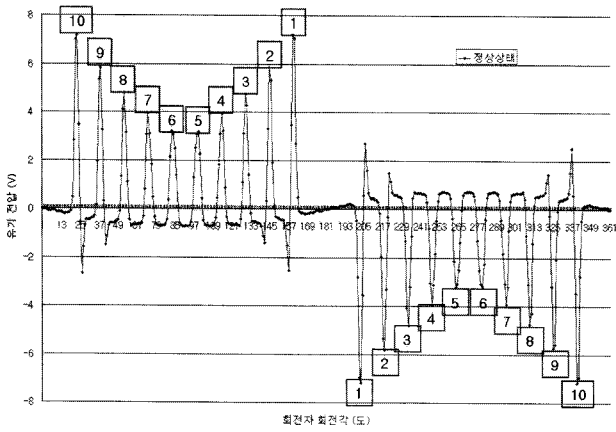


그림 8 단락된 슬롯에 따른 변형된 파형의 위치
 Fig. 8 Distorted wave position according to faulted slot

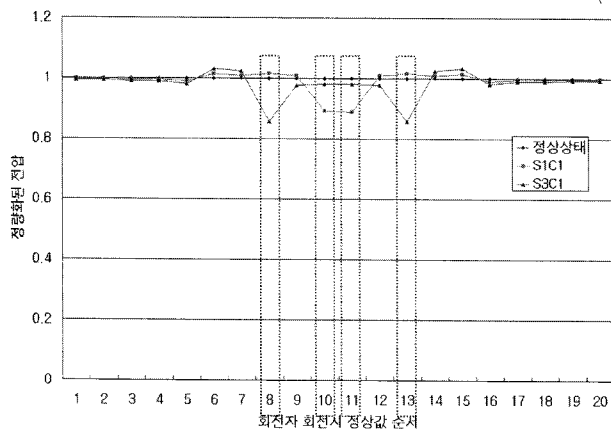


그림 9 단락조건에 따른 정형화된 공극자속
 Fig. 9 Normalized air-gap magnetic flux according to fault condition

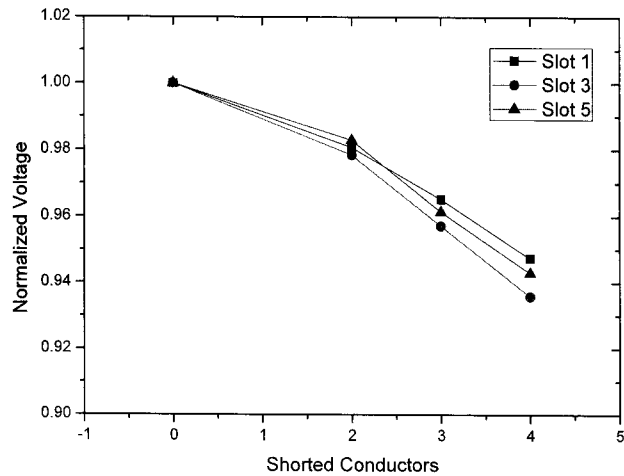


그림 10 단락된 권선수에 따른 정형화된 상전압의 최대값
 Fig. 10 Normalized peak value of phase voltage according to number of shorted conductor

히 알 수는 없다. 즉, 회전자의 단락 사고 검출의 경우 각 사고별 상전압의 최대값을 비교하는 것보다는 각 상에서 측정된 유기 전압을 비교하는 것이 더욱 정확한 검출을 할 수 있다.

3.4 권선 단락 모의 사고 실험 결과

그림 11은 회전자 1번 슬롯에서 단락사고를 모사 했을 때 공극 자속 파형이다. 3.2의 해석결과와 비교하여 단락권선 수 및 단락위치에 따라 1번 슬롯에 해당하는 자속 파형의 변화가 측정되었다. 그림 12는 회전자 5번 슬롯에서 단락사고를 모사 했을 때 공극 자속 파형이다. 3.2의 해석결과와 비교하여 공극 자속 파형에서는 슬롯 1번에서의 단락사고와 마찬가지로 단락권선 수 및 단락위치에 자속 파형의 변화가 측정되었다.

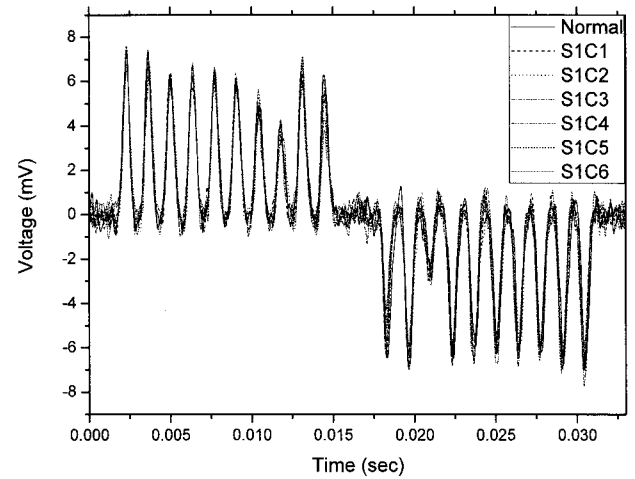


그림 11 슬롯 1에서 단락된 권선수에 따른 공극자속 파형
 Fig. 11 Air-gap magnetic flux according to number of shorted conductor at slot 1

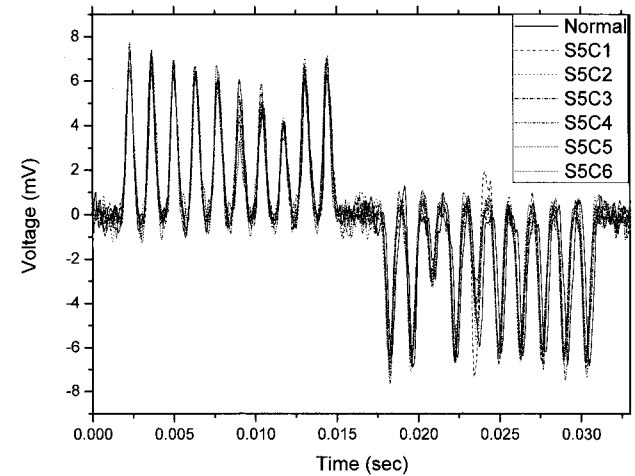


그림 12 슬롯 5에서 단락된 권선수에 따른 공극자속 파형
 Fig. 12 Air-gap magnetic flux according to number of shorted conductor at slot 5

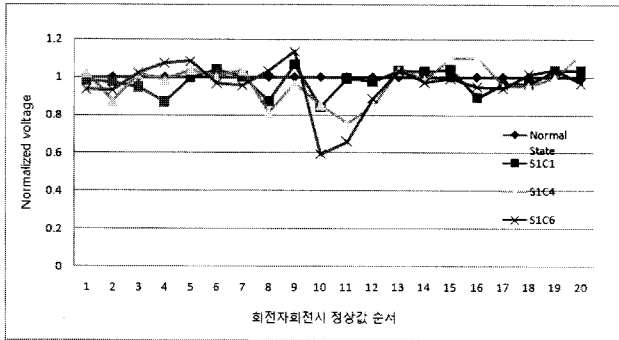


그림 13 슬롯 1에서 단락된 권선수에 따른 정상화된 공극 자속의 최대값

Fig. 13 Normalized peak value of air-gap magnetic flux according to number of shorted conductor at slot 1

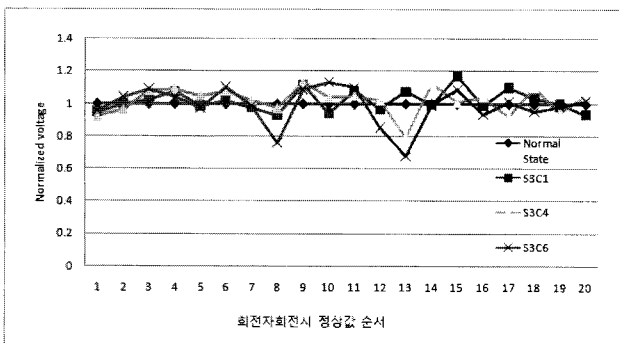


그림 14 슬롯 3에서 단락된 권선수에 따른 정상화된 공극 자속의 최대값

Fig. 14 Normalized peak value of air-gap magnetic flux according to number of shorted conductor at slot 3

그림 13과 14는 회전자 슬롯1과 슬롯3에서의 권선단락 사고를 정상사고 파형을 기준으로 정형화 하여 나타내었다. 3.2의 전자기해석을 통한 사고유형 데이터베이스와 비교하여 차이가 보임을 알 수 있는데 이는 동기발전기 모의사고 시스템을 제작함에 있어 실제 대용량 동기발전기에 사용되는 부스바 형태의 회전자 권선을 사용하는 것이 불가능 하여 일반 연선을 사용 하여 권선함으로서 발생하는 각 회전자 권선의 정확한 위치가 고정되지 못하여 발생하는 오차로 판단된다. 하지만 전자기해석결과와 비교하여 측정결과에서 상당한 유의성을 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 동기발전기의 전기적 안전 및 사용 상태를 파악할 수 있는 모니터링 및 사고상태 분석 기술을 개발하기 위한 연구의 일환으로 제작된 권선단락 사고 검증용 동기발전기의 회전자 및 고정자 슬롯 내에서 발생하는 다양한 단

락사고 유형에 대한 사고해석 결과를 도출하기 위한 실제 제작된 동기발전기에 대한 전자기 해석모델 구축 하였다. 이 해석 모델을 바탕으로 실제 실험 결과를 획득한 후, 이 결과를 구축한 전자기 해석 모델 결과와 비교 검증 하였다. 연구결과 각 슬롯에 따라 공극자속의 파형이 변하는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 모니터링되고 있는 공극자속의 파형으로 기기의 고장 유무 및 고장지점에 대한 예측을 할 수 있는 중요한 근거 자료로 활용될 수 있다. 본 연구는 신뢰성 높은 발전기 운전 및 전력 시스템의 전기안전도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] J.P. Sturgess, et al., "Finite-element simulation of a generator on load during and after a three-phase fault," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 7, pp. 787-793, Dec. 1992.
- [2] R. Wamkeue, et al., "Line-to-line short-circuit-based finite-element performance and parameter predictions of large hydrogenerator," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 18, pp. 370-378, Sept. 2003.
- [3] Markus Zahn, Electromagnetic Field Theory, John Wiley & Sons, pp.331, 1979

저 자 소 개



배 덕 권 (裴 德 權)

1971년 8월 16일 생, 1998년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 2005.9-2006.8 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 선임연구원, 2006.

10-현재 국립충주대학교 안전공학과 조교수

Tel : 043-841-5461

Fax : 053-853-6091

E-mail : dkbae@cjnu.ac.kr



김 동 훈 (金 東 勳)

1968년 2월 26일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1998.3~2001.2 LG전자 디지털어플라이언스 연구소 선임연구원, 2001.3~2002.2 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 연구교수, 2002.3~2002.8 기초전력원 특별연구원, 2002.9~2004.2 영국 Southampton 대학 ECS Research Fellow, 2004.3~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수

Tel : 053-950-5603
Fax : 053-940-8603
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr



박 중 신 (朴 重 信)

1956년 3월 3일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2005년~현재 위덕대 전기공학부 조교수

Tel : 054-760-1665
Fax : 054-760-1669
E-mail : parkjs@uu.ac.kr



이 동 영 (李 東 映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1990년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 삼성반도체통신(주) 사원, 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원, 1997년~현재 위덕대학교 전기공학과 부교수

Tel : 054-760-1300
Fax : 054-760-1075
E-mail : dyyi@uu.ac.kr



이 성 일 (李 聖 一)

1961년 7월 7일생, 1983년 2월 광운대학교 전기공학과 공학사, 1986년 2월 동 대학원 전기공학과 공학석사, 1994년 8월 동 대학원 전기공학과 공학박사, 1992년 4월 - 현재 충주대학교 안전공학과 교수, 1997년 7월-1998년 7월 일본 Meijo 대학 객원교수, 2007년 2월-2007년 12월 호주 Monash 대학 교환교수

Tel : 043-841-5334
Fax : 043-853-6091
E-mail : silee@cjnu.ac.kr