

발전기 회전자 권선의 단락사고 유형에 따른 공극자속 파형의 변형도 분석

김동훈*, 이강진*, 이일호*, 송명곤**,
*경북대학교, **벡터필드코리아(주),

Analyzing anomalies of air-gap flux patterns due to the short-circuit fault currents appearing in rotor windings of a generator

Dong-Hun Kim*, Kang-Jin Lee*, Il-HO Lee*, Myung Kon Song**,
*Kyungpook Univ. **VFK

Abstract - 본 논문에서는 대용량 동기발전기 회전자 권선의 다양한 단락사고 유형에 따라 발생하는 공극자속 파형의 변형정도에 대한 민감도해석을 수행하였다. 우선 정밀 전자장 수치해석도구를 이용하여 발전기 회전자 권선의 단락사고 유형에 대한 과도상태 해석을 수행하여 공극자속 파형에 대한 기본 데이터를 수집하였다. 이를 바탕으로 정상상태의 공극자속 파형을 기준으로 각 단락사고 유형별로 발생하는 공극자속 파형에 대한 최대 전압차에 다구찌법을 적용하여 Signal to Noise(SN) ratio 및 Percentage Contribution(PC) 등을 분석함으로써 단락사고 유형에 따른 공극자속 파형의 변형정도를 정량화하였다. 따라서 본 연구결과는 향후 대용량 발전기 회전자 단락사고 진단 및 감시 시스템 구축에 관련한 분야에 중요한 기초데이터로 활용될 것으로 사료된다.

1. 서 론

전력설비 용량의 증가와 기술의 진보에 따라 터빈 발전기, 수차발전기, 대형 전동기 등의 회전기가 대용량화, 고전압화 됨에 따라 발전기 고장 예방을 위한 진단 기술이 중요시되고 있다. 이들 회전기 고장의 대부분은 권선의 소손에서 발생하며, 전기 절연부 중에서 가장 중요한 부분은 고정자의 전기 권선과 회전자의 계자 권선이다. 고정자와 회전자의 절연 고장은 복구하는데 장시간이 요구되므로, 회전기의 예측진단에 따른 정비와 더불어 고장을 미연에 감지하여 불시정지에 따른 경제적인 손실을 막기 위해서는 상시 감시 및 진단 시스템이 요구된다[1,2].

기존 발전기 고장 진단 방법은 실제적인 고장 발생 후, 그 결과를 측정하여 진단하는 방법이거나 상시 감시 시스템의 경우에도 정상상태와 고장상태를 구분할 뿐, 고장의 종류 및 그 심각성을 알기는 어렵다. 이에 본 논문에서는 발전기의 회전자 고장에 대한 공극 자속패턴을 수치적으로 계산하여 실험으로 얻기가 불가능한 실제 고장 시 발생하는 여러 가지 종류의 자속형태를 구하고, 이를 정상상태의 공극 자속패턴과 비교하였다. 또한 다구찌법을 활용하여 각 사고유형 즉 인자별 SN비 및 PC 값들을 산출하여 사고 시 공극자속패턴에 변형을 주는 요인들의 기여도를 정량화하여 분석하였다.

2. 본 론

대용량 동기발전기에 대한 2차원 정밀 전자장해석은 해석도구의 신뢰성을 확보하기 위하여 상용 전자장 해석 도구 중 하나인 OPERA를 사용하였으며[3], 수치해의 정밀도는 발전기 무부하 정상상태에서의 공극 자속패턴의 실험치와 수치해석 결과를 비교하여 검증하였다. 이를 토대로 한 개의 회전자 슬롯 내에서 발생할 수 있는 다양한 유형의 회전자 단락사고에 대한 2차원 전자장 과도

해석을 수행하여 사고 시 발생하는 다양한 자속패턴을 도출하고 이를 다구찌법을 이용하여 분석하였다.

2.1 유한요소 모델링 및 검증

대용량 동기발전기에 대한 2차원 정밀 전자장해석을 수행하기 위하여 먼저 대용량 동기발전기의 기계적 치수 및 전기적 파라미터들을 표1에서와 같이 조사하였다. 해석에 사용된 발전기는 총 32개의 슬롯과 2극으로 구성된 회전자와 16개의 계자 권선과 2극으로 구성된 회전자 슬롯 수는 16이다. 또한 회전자 각 슬롯에는 8개의 권선이 한 묶음으로 1 turn을 구성하고 있으며 이러한 11개의 계자 권선이 절연층을 사이로 적층되어 있다.

각 계자권선에 공급되는 여자전류는 1594 A이며, 각 슬롯에 위치하고 있는 11개의 계자권선은 직렬로 연결되어 있다. 한편 전기자는 총 60개로 구성된 전기자 슬롯을 가지고 있으며, 3상 2극에 해당하는 전기자 권선 배치를 하고 있다. 해석에 고려된 동기 발전기의 대칭성을 고려하여 2차원 유한요소해석은 그림 1과 같이 전체 모델의 반을 취하여 수행하였다. 해석 시 회전자 및 고정자 철심의 투자율은 사용재료의 B-H 곡선을 입력하여 철심재질의 비선형성을 고려하였다

표 1 유한요소해석에 사용된 동기발전기 사양
Table 1 Specification of a synchronous generator considered for finite element analysis

사양	정격용량	245 kVA	정격전압	18 kV
	회전속도	3,600 rpm	공극	57 mm
	고정자내경	1072 mm	회전자외경	958 mm
고정자	전기자 슬롯수	60	전기자 총수	2 총권
	슬롯당 권선수	2 turns	극수	2 극
회전자	여자전류	1594 A	여자전압	355 V
	권선 수	11 turns, 8 group	축 길이	957.5 mm

우선 사용한 상용 전자장 해석도구의 수치해의 정밀도를 검증하기 위하여 발전기 무부하 정상상태 운전에서 전자장 수치해석을 수행하여 발전기의 공극에서 발생하는 자속밀도분포를 구하였다. 계산된 자속밀도분포는 실제 Flux Probe에서 검출되는 유도전압으로 환산하여 실제 시험을 통해 측정된 전압파형과 비교하였다. 그림 2에서는 실제 대용량 발전기의 공극 자속을 Flux prob

e를 통하여 측정된 측정치와 동일한 발전기 운전조건 하에서 전자장 수치해석에 의해 도출한 공극에서의 자속밀도의 파형을 보여준다. 그림 2에서 보는 바와 같이 측정 파형과 해석결과 파형은 측정된 전압의 최대치에서는 다소 차이를 보이나, 매우 유사한 파형 형태를 가짐을 알 수 있다. 이러한 차이는 실제 발전기를 단순화하여 2차원 해석을 수행함으로써 발생하는 수치오차에서 기인되는 것으로 판단된다.

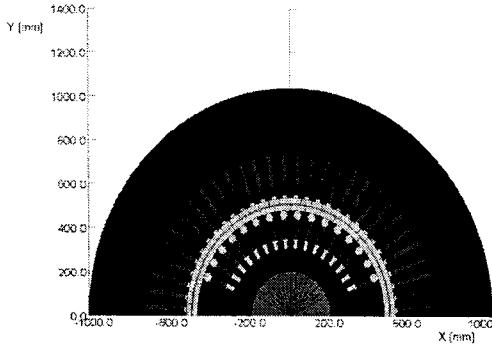
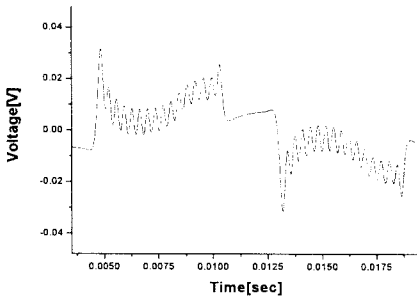
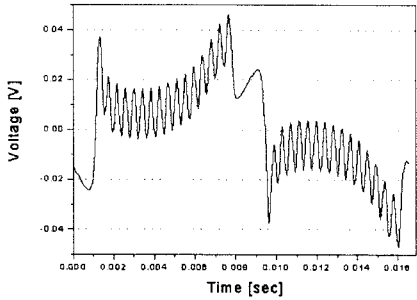


그림 1 1/2 유한요소 해석모델
Fig. 1 1/2 finite element analysis model



(a) 측정파형



(b) 해석파형

그림 2 공극 자속 파형의 비교
Fig. 2 Comparison of flux patterns in air-gap

2.2 단락특성 해석결과

회전자권선의 단락사고 유형은 일반적으로 수많은 경우의 수를 가지고 있으나 본 논문에서는 이러한 단락사고 유형을 데이터베이스화하기 위한 선행연구로서 우선 한 개의 슬롯 내에서 발생할 수 있는 다양한 단락사고에 대한 해석을 수행하였다. 그림 3은 그림 1의 회전자에 위치한 슬롯 중 반시계 방향으로 세 번째에 위치한 슬롯

내의 코일 분포도를 보여주고 있다. 우선 3번 회전자 슬롯 내에서의 11번 코일을 기준으로 나머지 10개의 코일 사이에 순차적으로 단락되는 코일의 수를 증가하면서 발생하는 단락사고들을 모사하였다.

그림 4에서는 슬롯 내의 단락권선의 수가 증가함에 따라 발생하는 공극에서의 자속패턴들을 무부하 운전 시 발생하는 공극 자속패턴과 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 단락권선의 개수가 순차적으로 증가함에 따라 공극 자속의 전압이 감소됨을 볼 수 있다. 그러나 단락 권선의 개수가 작은 경우(그림 3(a)), 전압 감소치가 정상상태의 전압에 비해 큰 차이 없는 것을 볼 수 있다.

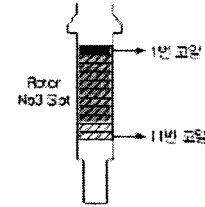
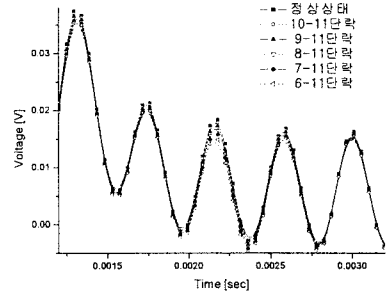
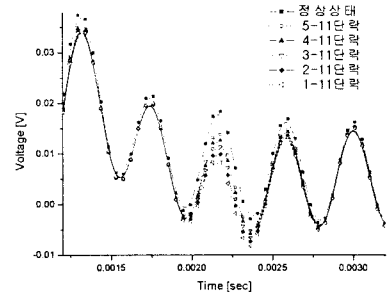


그림 3 회전자 권선의 코일 분포도
Fig. 3 Coil distribution of rotor winding



(a) 10번에서 6번 코일과 11번 코일사이의 단락



(b) 5번에서 1번 코일과 11번 코일사이의 단락

그림 4 단락권선 수 증가에 따른 공극 자속 파형 비교
Fig. 4 Comparison of flux patterns in air-gap when the number of short-circuited coils increases

2.3 단락 사고별 민감도 분석

슬롯 내에서 발생하는 다양한 단락사고 유형별 공극 자속패턴의 변형도 및 기여도를 정량화하기 위하여 본 논문에서는 다구적법을 도입하였다[4]. 고려된 설계인자 수 및 수준수를 고려하여 표준형 L4 직교배열표를 선택하여 표 2와같이 모의시험 조합을 구성하였다. 표 2에서 설계인자 A는 슬롯 내 단락이 발생하는 위치를, B는 단락 권선 수를 각각 의미한다. 각 인자는 2수준 수를

가지고 있으며 설계인자 A는 슬롯 내 상·하 위치 즉 그림 3의 코일 1번 및 11번 코일 근처, 설계인자 B는 2권선 및 4권선 단락의 경우를 고려하였다.

표 2에서 제시된 모의시험 조합에 따라 유한요소 해석을 수행하여 각 사고 유형에 따라 발생하는 자속패턴을 정상상태의 자속패턴과 비교하여 두 패턴의 최대 전압 차 및 이에 대한 SN비를 표 3에 제시하고 있다. SN비는 사고 시 공극자속 패턴이 정상상태에서 벗어나는 정도가 크면 클수록 Flux probe에서 탐지되는 감도가 강하므로 망대특성을 나타내는 다음 식에 의해 계산되었다.

$$SN\ ratio = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum\frac{1}{y_i^2}\right) \quad (1)$$

여기서 n 은 반복시험 횟수, y_i 는 각 시험에서 측정되는 특성치 값을 나타낸다.

표 2에서 계산된 SN비를 바탕으로 특성치에 대한 각 인자별 영향과 상대적인 기여도를 살펴보기 위하여 그림 5와 같이 평균치(Analysis of Means) 및 분산분석(Analysis of Variance)이 그림 5와 같이 수행되었다. 그림 5(a)에서 단락사고 발생 시 슬롯 내 단락권선의 위치가 자속패턴의 변화에 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 5(b)에서 제시한 바와 같이 단락 권선의 수보다는 슬롯 내 단락이 발생하는 위치가 자속패턴 변화에 가장 크게 기여함을 알 수 있다.

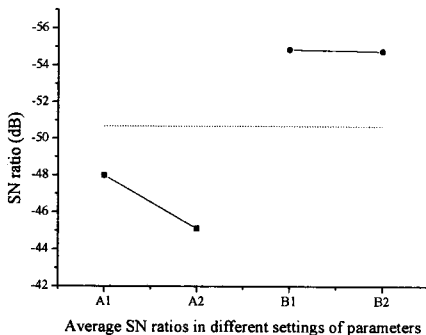
표 2. L4(2³) 직교배열표 및 설계인자
Table 2. Specification of pick-up coil

모의시험 순서	단락 위치	단락권선 수
1	A1	B1
2	A1	B2
3	A2	B1
4	A2	B2

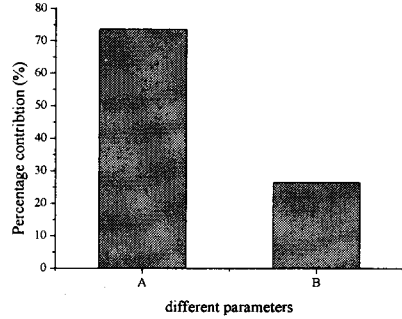
A1=상, A2=하, B1=2권선, B2=4권선

표 3. 수치해석에 따른 전압 차 및 SN비
Table 3. Voltage difference and SN ratio after numerical calculation

모의시험 횟수	전압 차 (mV)	SN ratio (dB)
1	3.99	-47.98
2	5.55	-45.11
3	1.81	-54.84
4	1.83	-54.75



(a) 민감도 분석



(b) 기여도 분석

그림 5 각 인자별 민감도 및 기여도 분석

Fig. 5 Sensitivity and PC of each parameter factor

3. 결 론

본 논문에서는 대용량 동기발전기의 회전자 슬롯 내에서 발생하는 다양한 단락사고 유형에 따른 공극 자속패턴의 변화를 정상상태의 공극 자속패턴과 비교하였다. 또한 다구찌법을 이용하여 계획된 모의시험을 수행한 결과, 단락사고 시 단락권선의 수보다 슬롯 내에서 발생하는 단락사고 위치가 공극 자속패턴의 변화에 가장 민감하게 기여함을 알 수 있었다.

이러한 연구결과는 향후 더욱 다양한 단락사고에 대한 해석결과를 데이터베이스화하여 발전기 회전자에서 발생하는 단락사고의 예측 및 진단에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] M. Touma-Holmberg and K. Srivastava, "Double winding high-voltage cable wound generator: steady-state and fault analysis," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 19, pp. 245-250, June 2004.
- [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual".
- [4] H.T. Wang et al., "Application of Taguchi method to robust design of BLDC motor performance," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 35, pp. 3700-3702, 1999.