전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

발전기 회전자의 층간단락에 대한 특성 해석

김선자*, 전윤석*, 이승학**, 최규하*
건국대학교 전기공학과*, 대덕대학교**

Characteristic Analysis of Shorted-turn for Generator Rotor

S.J. Kim*, Y.S. Jeon*, S.H. Lee**, and G.H. Choe*
Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University*, Taedok College**

ABSTRACT

Shorted-turns can have significant effects on a generator and its performance. Shorted-turn sensor for synchronous generator's field winding have been developed. One of effective method detecting inter-turn short circuits on round rotor winding is a method using sensor detecting. But the method needs duplicate design of sensor for characteristic change according to types and forms of generator. Thus sensing skill without sensor depend on change of electric property in generator. For the reason, this paper presents shorted-turns phenomenon and the characteristic analysis of shorted-turns in synchronous generator by using 2-D finite element method(FEM).

1. 서 론

최근 복합화력 발전소의 가스터빈 또는 스팀터빈 발전기 회전자 권선의 층간단락은 출력제한, 진동증가 및 성능저하 등 비정상적인 운전의 원인을 제공하며 심한 경우 발전기의 불시정지 및 장기간 정비를 요하는 고장을 일으키기도 한다. 특히 발전기의 회전자 권선은 각각의 슬롯내에 적층된 개별권선사이에 층간단락이 발생하면 자속의 불평형과 비대칭적인 발열로 인한 진동의 변화를 일으킨다. 따라서 이로 인한 비정상적인 운전의 예방과 고가의 권선교체 비용이 요구되는 심각한 절연파괴가 발생하기 이전에 회전자 권선의 층간단락 감지를 진행하고 있다. 여러가지 감지기법중 감지센서를 이용한 발전기 운전 중 계자권선 층간단락 감지기술은 조기진단 및 발전기의 안정운전에 중요한 역할을 담당한다. 그러나 감지센서의 설계 시에 발전기 용량, 회전자와 계자의 공극크기, 권선 층수에 따라 감지센서의 크기 및 코일수 등이 결정되므로 각 발전기의 종류에 따른 전용 센서가 필요하게 된다. 따라서 센서에 대한 중복설계가 요구되며 이에 따른 비용이 증가하고 설계오류 발생시 재시공 상의 문제점이 발생하게 된다. 따라서 센서가 없는 형태의 감지기술은 전적으로 발전기 운전시 층간단락에 의한 전기적인 특성변화의 검출에 의존할 수밖에 없다. 이를 위하여 본 논문에서는 층간단락현상을 알아보고 그에 따른 동기발전기의 특성변화를 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

2. 층간단락 현상

2.1 층간단락 현상의 원인

층간단락을 일으키는 원인은 그림 1에서와 같이 동분발생과 층간절연지의 손상으로 인한 원인 두가지로 볼 수 있다.

대부분의 경우 발전기의 운전시간 경과 및 운전스트레스로 인하여 동도체 사이의 접동(摺動), 혹은 마모로 인하여 발생된 동분의 퇴적이 증가하여 회전자 개별권선 사이에 층간단락 및 접지사고 등이 발생한다. 동분의 발생은 원심력이 작은 터닝(turning)시에 발생하는 것으로 발전기 정지시에 turning gear에 의하여 저속으로 회전시키는 발전기에서 일반적으로 동분에 의한 오손이 발생된다. 동분의 대부분은 통풍구를 통하여 슬롯 밖으로 나가지만, 일부는 슬롯 측면 또는 상부에 남아있어 상당량의 동분이 축적되면 상부 turn이 회전자와 단락되어 접지가 발생한다. 발전기의 누계 터닝 횟수로부터 회전자 권선의 동분 발생량을 추정하는 일이 가능하며 슬롯 형상과 누계 터닝 횟수를 관찰하여 슬롯내를 점검할 필요가 있다.

턴절연은 동도체 사이에 설치하고 절연재료 자체에는 양면 테이프가 있어 조립시 각 슬롯에서 동도체와 양쪽 끝(end) 부위에 고정 시킨다. 그러나 동도체는 원심력에 의한 응력하에서 열보다는 신축하기 위해 큰 압축강도가 필요하며, 회전자 권선의 열화와 파손에 미치는 주된 기계적 요인은 회전시 발생하는 연속적인 원심력과 기동, 정지의 반복에

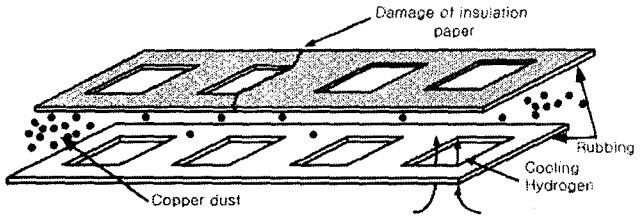

그림 1 층간단락 현상
Fig. 1 Generation of inter-turn short circuits

따른 주기적인 전자력에 의한 힘이다. 복합화력 발전기의 경우 일일기동정지 및 빈번한 출력 증감발로 인하여 회전자권선이 팽창, 수축을 반복함으로써 권선사이에 위치한 턴절연이 열응력이나 한쪽으로 밀리거나 끊어지는 현상 등에 의해 손상되어 층간단락이 발생한다.

2.2 층간단락현상에 의한 영향

발전기 회전자 계자권선의 층간단락은 회전자 슬롯내의 개별권선 사이의 접촉에 의해 나타난다. 비대칭적으로 발생한 층간단락, 즉 N, S극 중 어느 한쪽에서 단락이 발생되었을 경우 비대칭적인 발열이 회전자에서 발생되고 이로 인하여 회전자의 휘어짐 현상이 발생한다. 이러한 휘어짐 현상은 여자전류의 변화와 함께 회전자의 불평형, 즉 축진동의 변화를 일으킨다. 축진동 발생은 발전기의 운전정지로 이어지고 때로는 장기적인 고장을 불러일으키게 된다. 이처럼 층간단락현상은 그 현상 자체만으로 머무는 것이 아니라 연쇄적으로 고장을 파급하게 된다. 그림 2는 회전자 권선에 층간단락이 발생하였을 경우의 영향을 나타내 주는 것으로 단락 발생에 따라 전류가 권선 전체에 흐르는 것이 아니라 일부 바이-패스(by-pass)됨을 보여준다. 즉 이것은 회전자 권선 수의 감소를 의미한다.

발전기 회전자 계자권선의 층간단락은 드물게 일어나는 현상으로 이 경우 정비를 필요로 한다. 특별한 경우에 층간단락 현상이 자발적으로 사라지는 경우가 있는데 이것은 절연상태가 호전된 것이 아니라 더 나빠질 수 있다는 것을 의미한다. 특히 여러 지점에서의 단락발생은 회전자 권선의 경제수명이 다되었음을 의미한다.

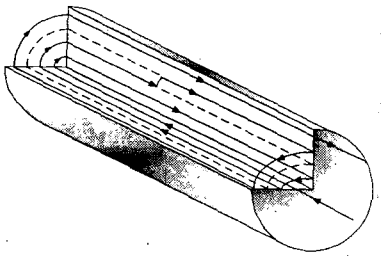

그림 2 단락에 의한 권선수의 감소
Fig. 2 Decrease in number of winding turns

3. 동기발전기의 수학적 모델링

발전기 회전자의 층간단락은 여자전류의 크기 및 계자자속의 발생량과 분포에 영향을 미치게 되며 동기발전기의 전압, 전류에 영향을 준다. 따라서 이에 대한 해석을 위해서는 수학적 모델링이 필요하며 단락 발생시 모델의 변화를 검토하는 것이 필수적이다.

3.1 동기발전기의 수학적 모델링

그림 3에서는 동기발전기의 계자권선과 전기자권선을 등가회로로 표현하였으며 그림 4에서는 이때 각각의 권선에 대한 자속의 축을 나타낸다.

이때 계자 및 전기자 권선에 의해 발생하게 되는 각각의 자속성분에 의한 전체 유기된 전압 $\overline{\mathcal{F}_R}$은 다음과 같다.

$$\overline{\mathcal{F}_F} + \overline{\mathcal{F}_A} = \overline{\mathcal{F}_R} \qquad (1)$$

여기서, $\overline{\mathcal{F}_F}$: 계자에 의한 기자력

$\overline{\mathcal{F}_A}$: 전기자에 의한 기자력

발전기에 유기된 전압은 계자전류 및 전기자전류에 의한 합성자속성분에 영향을 받게된다. 따라서 계자권선 및 전기자권선에 의한 자속성분을 분리할 필요가 있으며 발전기의 출력전압 V_t와 전기자 권선의 유기전압 $\overline{E_t}$은 다음과 같은 관계를 가진다.

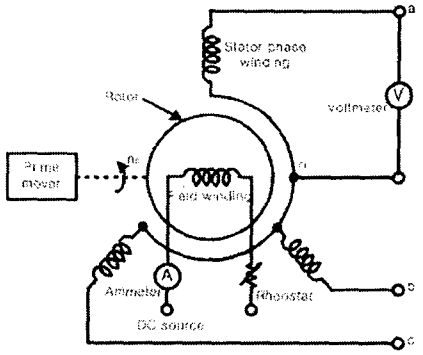

그림 3 동기발전기의 등가모델
Fig. 3 Equivalent model of synchronous generator

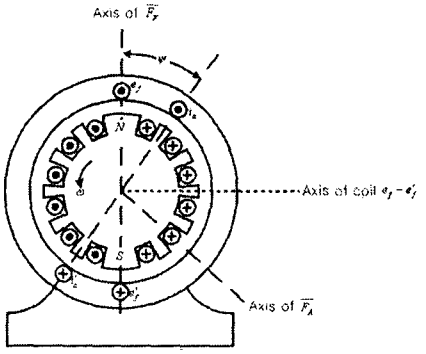

그림 4 동기발전기의 자속축
Fig. 4 Axis of flux in synchronous generator

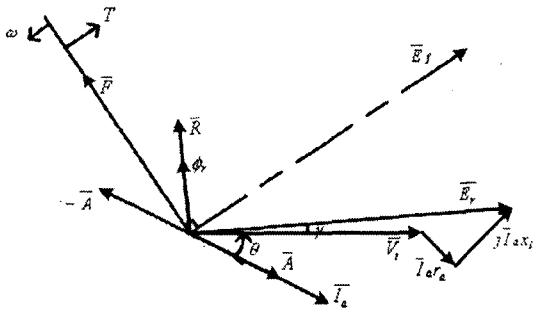

그림 5 동기발전기의 벡터선도
Fig. 5 Phasor diagram of a synchronous generator

$$\overline{E_r} = \overline{V_t} + \overline{I_a}(r_a + jx_l) \quad (2)$$

$$E_r \angle \gamma = V_t \angle 0^\circ + I_a \angle -\theta(r_a + jx_l) \quad (3)$$

이와 같은 관계를 이용해서 그림 5와 같은 벡터 선도를 나타낼 수 있다. 이때 전기자 권선의 유기전압 $\overline{E_r}$은 공극간의 자속 성분에 의해서 결정되며 이러한 성분을 자기회로의 R로서 표현하면 다음과 같다. 자속성분과 유기전압 $\overline{E_r}$은 그림 5에서 나타낸 바와 같이 90°의 위상차를 가지게 된다.

$$\overline{R} = R \angle (90^\circ + \gamma) \quad (4)$$

이때 R은 계자권선의 자속과 전기자권선의 자속의 합성성분이므로 다음 식과 같이 되며 이때 A는 전기자전류에 의한 자속성분이며 F는 계자권선에 의한 자속성분이다.

$$\overline{F} + \overline{A} = \overline{R} \quad (5)$$

여기에서 F의 크기와 방향은 계자의 위치와 계자전류의 크기에 따라서 결정되며 A는 전기자 전류와 권선수에 따라서 결정되며 방향은 고정으로 다음과 같이 표현된다.

$$A = \frac{1}{N_f} 0.9q \frac{N_2 K_{w2}}{p} I_a \quad (6)$$

여기서, q : 상수
p : 극수
$N_2 K_{w2}$: 상당 효율권수
I_a : 상당 전기자 전류

$$\overline{A} = A \angle -\theta \quad (7)$$

이처럼 전기자 전류에 의해서 A는 구할 수 있으므로 계자권선에 의한 자속은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{F} = \overline{R} - \overline{A} = R \angle (90^\circ + \gamma) - A \angle \theta \quad (8)$$

이와 같은 관계에 의해서 계자권선에 의한 자속은 추정될 수 있으며 이러한 자속 F에 의해서 발생된 전압을 excitation voltage라 한다.

3.2 유한요소정식화

동기발전기의 자계해석을 통하여 각 위치별 또는 단락 등의 현상 발생시의 자속분포를 구함으로써 발전기의 특성변화를 살펴볼 수 있으며 이때 가장 많이 사용되는 방법은 유한요소법(Finite Element Method)이다. 동기발전기의 2차원 유한요소법을 풀기 위하여 Maxwell의 전자계방정식으로부터 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - \sigma\left(\frac{dA}{dt} + \varphi_z\right) = -J_s \quad (9)$$

여기서 μ는 투자율, A는 자기벡터포텐셜, φ_z는 도체내의 전기스칼라포텐셜의 미분값 그리고 J_s는 총전류밀도에서 전류원에 의한 전류밀도이다. 지배방정식을 유한요소법에 의한 정식화를 한다. 해석영역 전체에 대한 요소 matrix를 구성하여 자기포텐셜을 미지수로 하는 계방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$[S_{ij}][A_i] = [F_i] \quad (10)$$

$[S_{ij}]$는 해석영역 전체의 요소 matrix이고 $[A_i]$는 각 절점에서의 자기벡터포텐셜, $[F_i]$는 구동벡터이다.

3.3 시뮬레이션

동기발전기의 자계해석을 통하여 각 위치별 또는 단락 등의 현상발생시의 자속분포를 시뮬레이션 함으로써 발전기의 특성변화를 살펴보았다.

표 1 동기발전기의 사양
Table 1 Specification of synchronous generator

정격출력	150MW	역률	0.9
정격용량	215,700KVA	회전자 권선수	8
정격전압	13,800V	공극길이	22.5mm
정격전류	9,024A	회전자길이	6,018mm
회전수	3,600rpm	회전자직경	989mm
극 수	2	Retaining Ring 직경	1,067mm

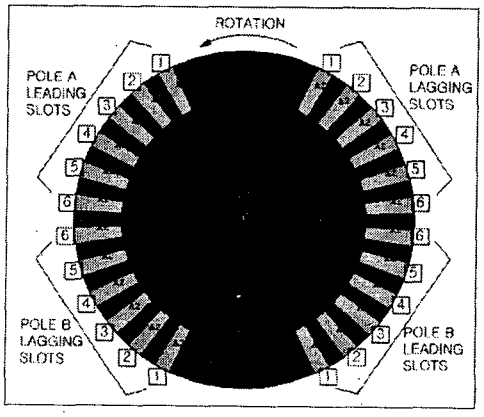

그림 6 동기발전기의 해석모델
Fig. 6 The analysis model

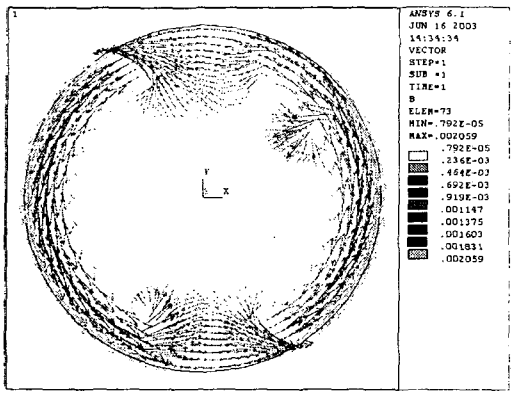

그림 7 자속벡터포텐셜 분포
Fig. 7 The magnetic vector potential

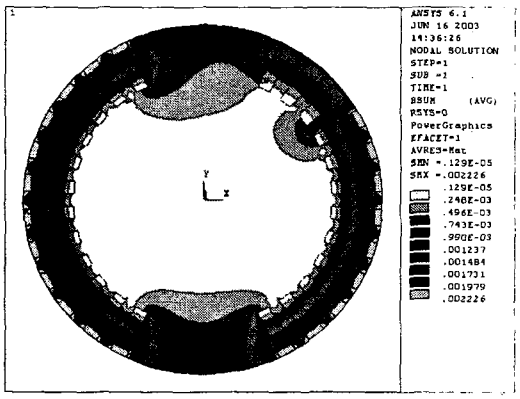

그림 8 자속밀도 분포
Fig. 8 The magnetic flux density

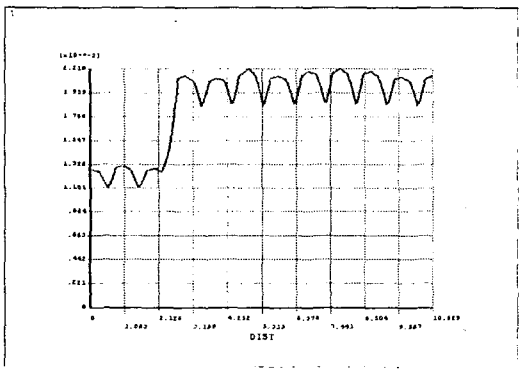

그림 9 경로에 따른 자속밀도의 변화
Fig. 9 The rate of change of the flux

본 논문에서 해석한 동기발전기는 정격출력 150MW인 서인천복합 가스터빈발전기를 모델로 하였다. 해석대상의 동기발전기 사양은 표 1과 같고 그림 6은 해석모델의 영역을 나타내며 회전자 슬롯이 24개이다. 그림 7은 회전자의 자기벡터포텐셜의 분포를 나타내고 있다. 슬롯 주변에서 회전하는 방향에 따라 자기포텐셜이 분포하며 1, 2, 3번 코일에서 벡터분포가 상이하게 나타나 층간단락이 존재함을 쉽게 알수 있다. 그림 8은 자속밀도의 분포를 보여준다. 그림 9는 그림 6의 해석모델에서 A극의 1번 코일부터 B극의 1번 코일까지의 자속밀도 분포의 그래프이다. 층간단락이 발생한 1, 2, 3번 코일에서 자속분포가 낮아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

동분발생이나 층간절연지의 손상에 의해 발생되는 층간단락 현상은 발전기의 심각한 고장의 원인이 된다. 이를 방지하기 위하여 먼저 층간단락 발생시 동기발전기의 특성 중 자속의 변화에 대해 알아보았다. 유한요소법을 이용하여 동기발전기의 전자장 및 회로방정식을 해석하고 단락현상 발생시 슬롯주변의 자속밀도와 그 변화를 분석 하였다. 따라서 본 연구의 결과는 동기발전기의 단락현상 특성의 변화에 따라 센서가 없는 형태의 층간단락감지기술 개발의 좋은 자료가 될 것으로 사료된다.

이 논문은 기초전력공학공동연구소의 전력 산업연구개발사업 지원에 의하여 연구되었슴

참 고 문 헌

[1] 남종하, 최규하, 이승학, 정석윤, 류벽우, 주영호, 이영준, "발전기 계자의 층간단락 감지기 개발", 대한전기학회 하계학술대회 산학특별위원회 특별 Session 및 전시회 논문집, pp. 121-124, 2001.7

[2] 이영준, 김희동, 박종정, 주영호, 조지원, 한상옥, "발전기 회전자 층간단락진단기법", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 1998.5

[3] 이영준, 김희동, 박종정, 주영호, 조지원, 이병하, "발전기 운전중 회전자 계자권선의 단락 진단기법에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회논문집, 1998.7

[4] 김영선, 이준호, 이복용, 이기식, "유한요소법에 의한 농형 유도전동기의 동특성 해석", 대한전기학회논문지, pp. 1154-1161, 1998.4

[5] M.P. Jenkins, "On-Line Monitoring of Rotor Shorted Turns", IEE Conference Publication No. 401, pp. 55-60, Dec. 1994.

[6] J. Penman, H.G Sedding, B.A. Lloyd and W.T. Fink, "Detection and Location of Interturn Shorted Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.9, No4, pp. 652-658, June 1994.

[7] Vincent Del Toro, "Basic Electric Machines", Prentice-Hall International Editions, 1990

[8] D. R. Albright, Intertrun Short-Circuit Detection, Generatortech. Inc., pp. 1-8, 1993

[9] E. Woxchnagg, "Turbogenerator Field winding Shorted Turn Detection by AC Flux Measuremint", IEEE Trans, on Energy Conversion, Vol. 9. No. 2. pp. 427-431, 1994.