

유한 요소법에 의한 속응 여자 초전도 발전기의 과도 특성 해석

Transient Characteristic Analysis of Quick Response Excitation Type Superconducting Generator by Finite Element Method

김정철* , 한성진**

Kim Jeong-Cheol* , Hahn Sung-Chin**

Abstract : This paper deals with finite element analysis of 2GVA superconducting generator which has slitted electrothermal shield in d-axis (SES). Three phase fault is considered to find the field current, armature current and torque of the S.C.G. Using the result, genertor parameters are calculated by F.E.M. The results are compared with superconducting generator having conventional electrothermal shield (CES). The result shows that quick response excitation could be applied to superconducting generator with slitted electrothermal shield.

Key Words : superconducting generator, slitted electrothermal shield(SES), conventional electrothermal shield(CES), F.E.M.

1. 서 론

전 세계적으로 전력 수요의 증가로 인해 발전기의 용량이 점점 대용량화 되어가고 있다. 그러나 현용의 발전기로는 기계적인 강도와 진동 때문에 제작에 한계가 있다. 여기에 용량이 점점 증가할수록 동기 리액턴스가 증가하는데 총래의 100만 KW급 발전기의 동기 리액턴스는 대략 1.5~2.0 pu 정도로 알려져 있다. 하지만 동급 초전도 발전기의 동기 리액턴스는 0.3~0.4 pu로 보다 낮다. 이처럼 동기 리액턴스를 낮추게 되면 계통의 안정도가 향상되어 송전 용량이 증가하게 된다. 이처럼 초전도 발전기는 일반 발전기에 비해 전력계통의 안정성 향상, 효율 면에서 약 1%향상, 크기와 무게 면에서 약 60%와, 50%감소를 이룰 수 있다. 이러한 초전도 발전기는 일반 발전기와는 구조가 다른 다중 원통 회전자 구조를 가지고 있으며, 또한 냉각 방식, 전기자 권선의 형상등이 다르다[1]. 초전도 발전기는 초전도 계자권선을 이용해 강한 자계를 발생할 수 있기 때문에 기계내부에 강자성 재료를 가지지 않는 구조의 것이 일반적이다. 그러나, 이러한 초전도 발전기의 과도 안정도는 현용 발전기와 비교하여 거의 비슷한 수준에 있기 때문에 이에 대한 대책의 하나로 계자 전압의 신속한 변화를 가능하게 하여 발전기의 과도 안정도 향상을 도모할 수 있는 속응여자 방식이 요구된다[2]. 지금까지 연구된 대부분의 초전

도 발전기는 이중 차폐막 구조를 사용하고 있다. 그러나 이중 구조의 차폐막은 계자 전류의 변화에 의한 자속의 변동분도 차폐되기 때문에 열만 차폐를 하고 전자 차폐는 하지 않는 구조의 발전기가 연구되고 있다. 본 논문에서는 d축에 틈새를 낸 열전자 차폐막(SES)을 갖는 초전도 교류 발전기의 과도 특성(3-5)을 해석하여 틈새가 없는 차폐막(CES)을 가지는 발전기의 과도 전자 차폐특성과 비교한다. 유한요소법을 이용하여 3상 개방전압을 구하였으며, 발전기의 정상 운전중에 전기자 단자쪽에 3상 단락사고를 가정하였다. 이 때 계자전류의 변화를 구하였으며, 3상 전기자 권선의 단락 전류를 구하였다. 이 들 결과를 이용하여 발전기의 과도 리액턴스(X_d') 및 차과도 리액턴스(X_d'')등의 발전기 정수를 구하고 시간에 따른 동기 리액턴스의 변화를 구한다. 이를 비교하여 d축에 틈새를 낸 초전도 발전기의 과도 차폐특성이 우수하여 속응여자가 가능함을 보이고자 한다.

2. 유한요소 정식화 및 해석 모델

2.1. 해석 이론

2.1.1 지배 방정식

전류가 흐르는 공간의 전자기적 현상은 변위 전류(displacement current)를 무시할 경우 Maxwell 방정식과 보조 방정식으로부터 아래와 같이 표현된다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

한편 자속 밀도 \vec{B} 는 식 (3)에 의해 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 를 이용하여

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

와 같이 표현할 수 있고 식 (2)와 식 (6)으로부터

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (7)$$

이고 vector 공식으로부터

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\nabla \phi \quad (8)$$

또는

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (9)$$

* 학생회원 : 동아대 대학원 전기공학과 석사과정

** 정 회 원 : 동아대 대학원 전기공학과 교수

원고접수 : 2000년 10월 18일

심사완료 : 2000년 11월 15일

와 같이 된다. 또한 식 (5)의 유도 전류 \vec{J}_e 는 식 (9)을 이용하여 다시 쓰면

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} = \sigma \left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \right] \quad (10)$$

이 되고, 이상의 식에 Coulomb 게이지를 적용하면

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_s - \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \Phi \right) \quad (11)$$

와 같이 표현된다.

발전기가 축 방향으로 길다고 가정하면 z축에 따른 장의 변화가 없으므로 2차원장 식 (11)은

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} = J_s \quad (12)$$

과 같이 되며 $-\frac{\partial \Phi}{\partial z}$ 의 값은 하나의 도체 내에서는 하나의 값만이 존재하므로 지배 방정식은

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_s \quad (13)$$

과 같이 표현된다[6].

2.1.2 단락 전류

동기 발전기 삼상 돌발 단락사고는 계통에서 매우 드문 것이지만, 과도전류의 성질을 이해하는데 필수적이다. 유한요소 해석에 의해서 초전도 발전기의 단락 전류를 구하기 위해서는 단락 전류의 파형으로부터 동기 리액턴스, 과도 리액턴스, 시정수 등과 같은 발전기의 정수를 도출할 수 있다. 유한요소법에 의한 삼상 단락해석은 발전기의 정수와 발전기 모델의 성능을 잘 이해하는데 도움을 줄뿐만 아니라 정수의 예측과 설계시 이용 할 수가 있다.

3상 돌발 단락 전류의 형태는 그림 1과 같다[7].

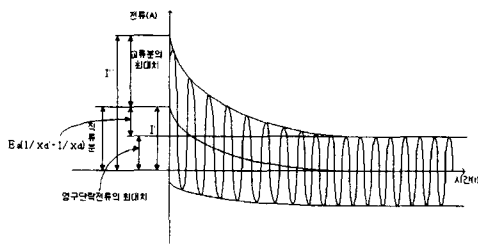


그림 1. 3상 단락전류
Fig. 1. Three Phase Fault Current

이때 과도 전류 i_a 는

$$i_a = \frac{E_0 \cos \alpha}{x_d''} \varepsilon^{-t/T_a} + \left[\left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d''} \right) \varepsilon^{-t/T_d'} + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) \varepsilon^{-t/T_d''} + \frac{1}{x_d} \right] E_0 \cos(\omega t - \alpha) \quad (14)$$

이다.

식 (14)에서 제 1항은 시정수 T_a 로 감소되는 직류분이며, 제 2항은 교류분이다. 제 2항의 괄호 내의 제 1항 및 2항에 해당하는 부분은 과도 전류를 나타내고 $T_d'' < T_d'$ 이므로 단락 순시의 값은 x_d'' 에 의해 제한

되고 시정수 T_d'' 로 급속히 감소하고 다시 x_d' 에 의해 제한되어 시정수 T_d' 로 점차 감소된다. 그리고 괄호내의 제 3항에 해당 부분은 영구단락 교류분으로 최종에는 이 값을 나타낸다[8][9]. 여기서 x_d' , x_d'' 의 계산은 그림 1의 단락 전류 파형으로부터 구해진다. 차과도 전류의 최대치를 I'' 라하고 과도 전류의 최대치를 I' 라 두면 과도 리액턴스 x_d' 와 차과도 리액턴스 x_d'' 는

$$I' = \frac{E}{x_d'} \quad , \quad x_d' = \frac{E}{I'} \quad (15)$$

$$I'' = \frac{E}{x_d''} \quad , \quad x_d'' = \frac{E}{I''} \quad (16)$$

이다.

마찬가지로 여기서 시정수도 구할 수 있는데 시정수를 구하는 식은 다음과 같다[10].

$$T_d'' = T_d' \cdot \frac{x_d''}{x_d'} \quad (17)$$

2.1.3 발전기의 출력 토크

철극기의 출력은 2 반작용법 벡터도에서 구한다. 그림 2는 전기자 저항 r 을 무시한 벡터도이다.

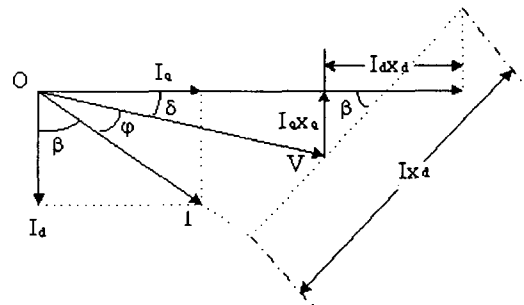


그림 2. 발전기의 페이스도
Fig. 2. Phaser diagram

이 벡터도에서

$$V \cos \delta = E - I_a x_d \quad (18)$$

$$V \sin \delta = I_a x_q \quad (19)$$

위의 두 식에서

$$I_d = \frac{E - V \cos \delta}{x_d} \quad , \quad I_q = \frac{V \sin \delta}{x_q} \quad (20)$$

발전기의 매상 출력 P는

$$P = VI_q \cos \delta + VI_d \sin \delta \quad (21)$$

그러므로

$$P = V \cos \delta \cdot \frac{V \sin \delta}{x_q} + V \sin \delta \cdot \frac{E - V \cos \delta}{x_d}$$

$$P = \frac{V^2}{x_q} \sin \delta \cos \delta + \frac{VE \sin \delta}{x_d} - \frac{V^2 \sin \delta \cos \delta}{x_d}$$

$$= \frac{E V \sin \delta}{x_d} + \frac{V^2 (x_d - x_q)}{x_d x_q} \sin \delta \cos \delta$$

$$P = \frac{EV}{x_d} \sin \delta + \frac{V^2(x_d - x_q)}{2x_dx_q} \sin 2\delta \quad (22)$$

제 1 항은 계자 전류가 0, 즉 $E=0$ 인 경우에는 없거나, 제 2 항은 E 에 관계없으므로 무 여자의 경우 선로에서 여자를 받아 그대로 존재한다. 이것을 리액션 토크(reaction torque)라 하며, 직축 리액턴스 x_d 와 횡축 리액턴스 x_q 가 같지 않은데서 생기는 특징이다[11].

2.2. 해석 모델

초전도발전기의 기본 구성은 기존의 발전기와 다르다. 그림 1은 일반 초전도 발전기의 단면도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 발전기의 회전부는 액체 헬륨에 의해 냉각되는 저온 초전도 계자 권선을 가지기 때문에 단일 강철 덩어리가 아닌 다중 원통으로 되어있다. 그 구성은 계자권선, 댐퍼 철드, 열전자 차폐막 등으로 되어있다[12].

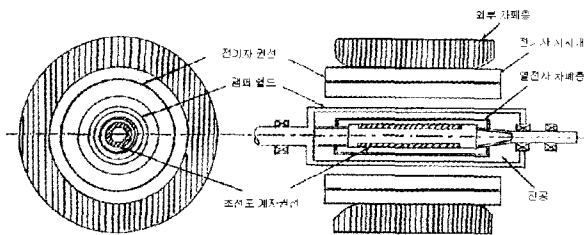
본 논문에서 제안하는 SES는 이러한 이중 원통 구조의 발전기에서 열전자 차폐막에 d축으로 5°가량 슬릿을 낸 것이다. 이렇게 열전자 차폐막에 틈을 낸 발전기의 구조는 그림 2에 나타났다. 그림 2는 2GVA 초전도 발전기[13]로 유한요소 해석을 위해 모델링한 것이다. 모델링한 형상은 극의 대칭성과 해석의 용이성을 위해 한 극만을 해석하였으며 2차원 해석이 가능하므로 상용 2차원 해석 프로그램인 Flux2D를 이용하여 해석하였다. 운전시 회전자 위치변화와 외부회로 소자에서 계산되는 전압 및 전류의 시간에 따른 변화는 moving air gap 기법을 활용하여 계산하였다. 이 발전기의 상세 제원을 표 1에 나타내었다.

표 1. 2GVA 발전기의 제원
Table 1. Dimension of 2GVA SCG

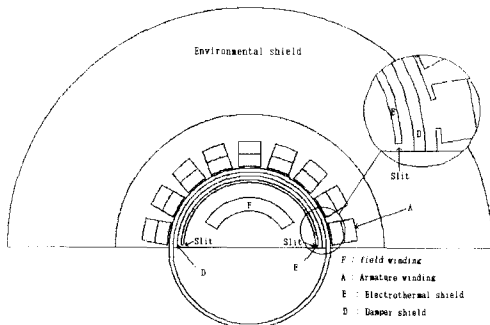
계자	정격전류	8000[A]
	권선수	680[turn]
	내/외반경	277/377[mm]
열전자차폐	전도도	5.8E8[1/Ω · m]
	내/외반경	490/510[mm]
댐퍼차폐	전도도	5.8E7[1/Ω · m]
	내/외반경	540/570[mm]
전기자	권선수	28(turn/상)
	내/외반경	600/800[mm]
외부차폐	내/외반경	1000/1800[mm]

3. SES의 유한요소 해석

해석 영역은 앞의 그림 3(b)이다. 여기서 전기자 권선은 2층권으로 하여 아래층은 한 칸씩 밀어서 외부 회로와 연결을 하였다. 그리고 이 영역과 연결된 외부 회로는 그림 4에 나타났다. 그림 4에서 보는 것과 같이 전기자 권선 하나하나에 코일을 각각 연결하였고 3상 Y 결선을 하였다. 계자 권선의 전압원은 시동초기에는 전류원으로 운전을 하고 정상상태에 이르렀을 때 과도상태해석을 위해 전압원으로 교체를 한다. 이는 전압원 보다 전류원이 정상상태에 빨리 도달하기 때문이며, 정상상태에 도달 후 전압원으로 교체하는 이유는 과도상태에는 계자 권선의 전류가 일정한 값이 아니라 변하기 때문이다. 그리고 전기자 권선 단부 저항과 인덕턴스는 슬릿의 외부에 노출된 권선의 격인 각도를 30°로 하여 단부 길이와 도전율을 고려하여 계산하고 외부 회로에 연결하였다.



(a)일반 초전도 발전기의 구조
(a)structure of CES



(b)슬릿을 낸 발전기의 단면도
(b)Cross-Section of SES

그림 3. 초전도 발전기의 단면도
Fig. 3. Cross-Section of SCG

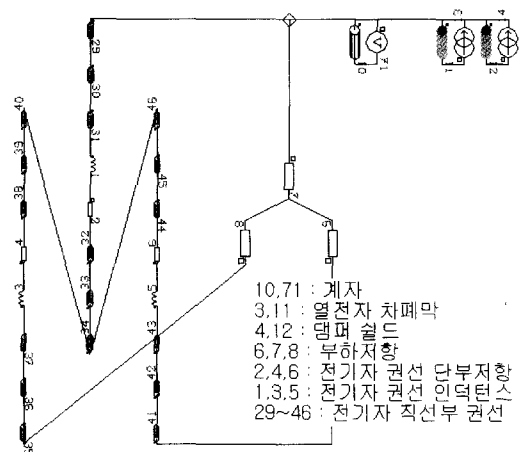


그림 4. 유한요소 해석 영역과 결합된 외부회로
Fig. 4. External circuit coupled with finite element regions

3.1 Open EMF

전기자에 유기된 3상 무부하 전압을 그림 5에 표시하였다. 각 상에서의 전압을 계산하면 그림 5에서 보는 것과 같은 대칭 3상 무부하 전압 파형을 얻을 수가 있다.

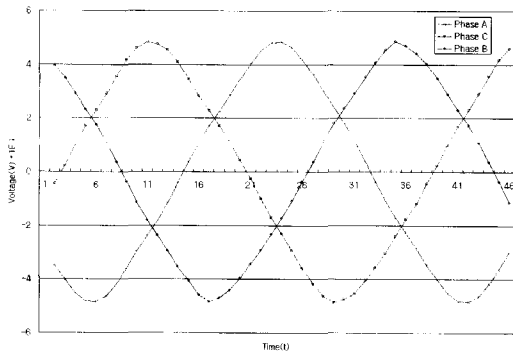
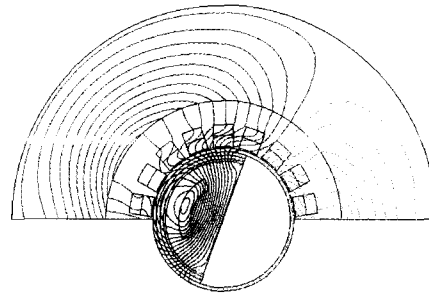


그림 5. 개방전압
Fig. 5. Open EMF



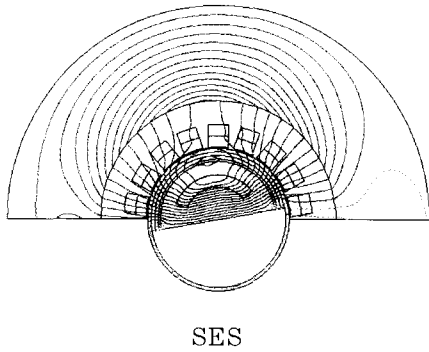
CES
(b) $t=0.17$ 초
(b) $t=0.17$ sec

그림 6. 자속분포
Fig. 6. Flux distribution

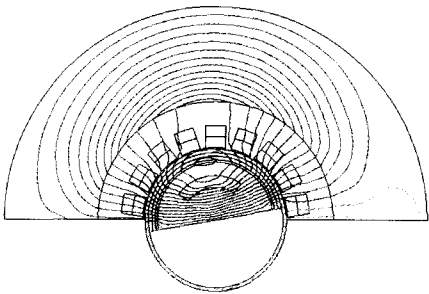
3.2 과도상태 해석

그림 6 (a), (b)는 각각 삼상 단락 직후의 발전기의 자속 분포도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 SES 와 CES의 자속 분포가 차이가 있음을 알 수가 있다.

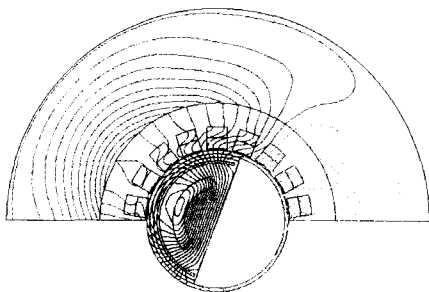
삼상 단락직후의 계자 전류의 변화는 그림 7에서 보는 것과 같다. 그림에서 보듯이 제안된 모델(SES)이 기존의 모델(CES)에 비해 계자 전류가 빨리 변하여 속응 여자가 가능함을 알 수 있다.



SES



CES
(a) $t=0.0046$ 초
(a) $t=0.00046$ sec



SES

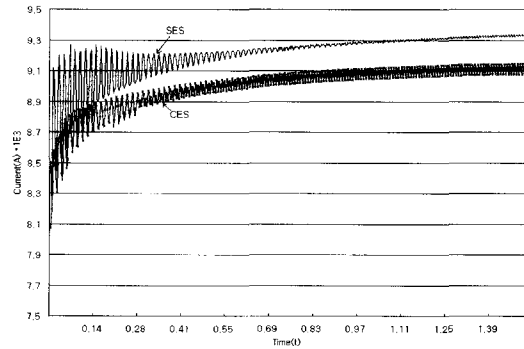
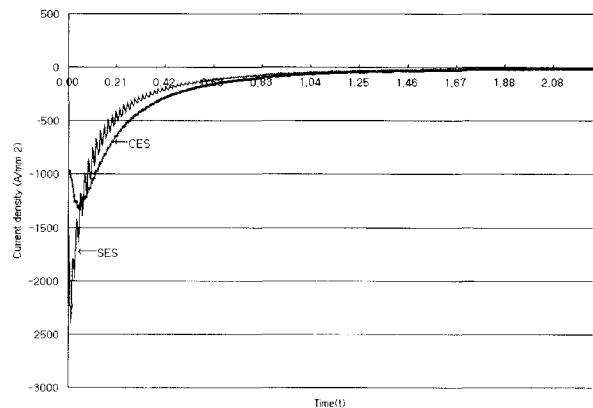
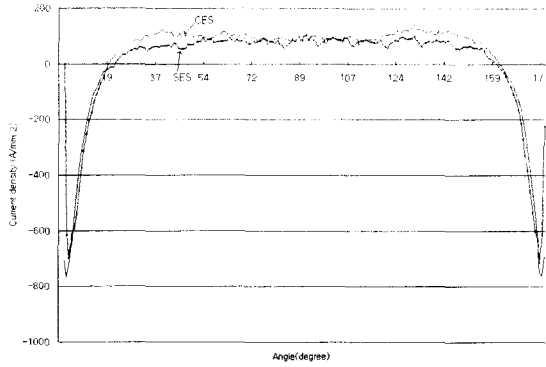


그림 7. 계자 전류의 변화
Fig. 7. The Variation of Field Current

그림 9의 (a), (b)는 각각 3상 단락후 열전자 차폐막의 한 점에서의 전류밀도와 $t=0.167$ 초 때 열전자 차폐막에서의 전류밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 모델에서 전류밀도가 CES보다 빨리 줄어들을 볼 수가 있다.



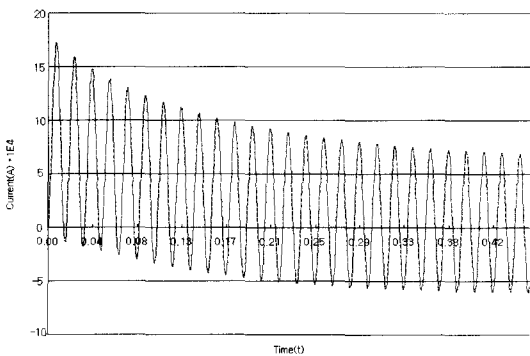
(a) 반지름 500mm, 각도 3°
(a) $R=500$ mm, $\theta=3^\circ$



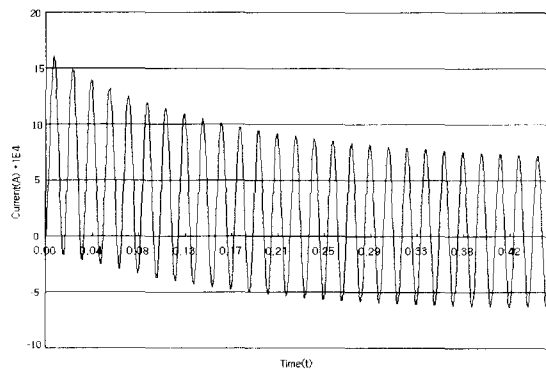
(b) 열전자 차폐막 ($t=0.16$ 초)
(b) Electro-Thermal Shield ($t=0.167$ sec)

그림 8. 전류밀도
Fig. 8. Current density

그림 9의 (a)와 (b)는 SES와 CES의 전기자 전류를 각각 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 단락 전류의 처음 부분은 SES가 약간 높지만 시간이 지날수록 SES가 빨리 줄어들어 영구 단락 전류는 SES가 작게 흐르는 것을 알 수가 있다. 그리고 이들 단락 전류의 결과들로부터 식 (15)(16)(17)을 이용하여 발전기의 정수들을 구하면 표 2와 같다.



(a) SES



(b) CES

그림 9. 3상 단락 전기자 전류
Fig. 9. Three phase fault armature current

표 2. 발전기의 정수
Table 2. Parameter of Generator

parameter	SES	CES
X_d	0.49	0.45
X_d'	0.198	0.23
X_d''	0.141	0.154
T_d''	0.077	0.08

3상 단락이 일어나는 동안 단자 전압이 0이기 때문에 선로에 전력을 전송할 수 없다. 그러므로 모든 입력토크는 회전자를 가속시킨다. 그림 10은 두 발전기의 출력 토크를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 토크 역시 SES가 CES에 비해 좀 더 빠르게 줄어드는 것을 볼 수 있어 과도 안정도가 증가함을 예측할 수 있다.

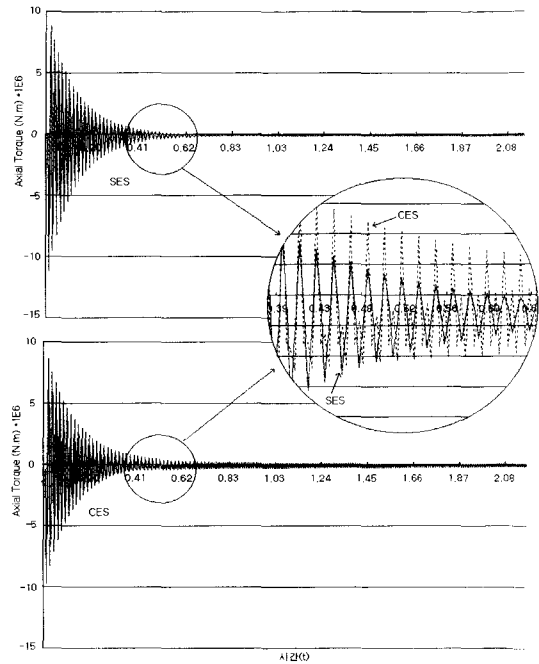


그림 10. 3상 단락 후의 토크곡선
Fig. 10. Torque curve after 3-phase fault

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 열전자 차폐막에 슬릿이 있는 초전도 발전기와 슬릿이 없는 발전기를 모델링 하였다. 그리고 초전도발전기의 삼상 단락 사고를 가정하여 열전자 차폐막에서의 와전류와 계자 전류의 변화, 그리고 각 상의 전류 및 발전기의 토크를 구했으며 이를 이용하여 발전기의 정수를 산정하였다. 삼상 단락 사고시 슬릿이 있는 차폐막을 가진 발전기는 완전 차폐막을 가진 발전기보다 계자 전류의 상승 기울기는 급했다. 그리고 각 상 전류의 기울기 또한 급했다. 즉 이는 직축 과도 특성이 개선되어 속응 여자가 가능함을 의미한다. 따라서 열전자 차폐막에 틈새를 낸 초전도 발전기가 속응 여자 방식적용 가

능성을 예측할 수 있다.
본 논문에서 구한 결과는 향후 여자 전압 변화에 따른 초전도 발전기의 과도 안정도 해석에 이용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] James L. Kirtly, Jr., "Large System Interaction Characteristics of Superconducting Generators", Proceedings of IEEE, Vol. 81, No. 3, pp. 449 - 461, March 1993

[2] S. C. Hahn, et. al, "Transient Shielding Effect of Slitted Electrothermal Shield of Superconducting Generator" IEEE Trans. Mag., vol.28, no.1, pp. 295-298, Jan. 1992

[3] 한성진, "틈새를 낸 열전자 차폐막을 갖는 초전도 교류 발전기의 과도특성 해석" 한국 전력 공사, 1993

[4] 하경덕, 황돈하, 박도영, 김용주, "30KVA 초전도 발전기의 정상상태 및 과도 상태 전자기 해석", 대한 전기학회 하계학술대회, pp. 91-93, 1998. 7

[5] 김성명, 한성진, "Finite Element Modeling of KERI 30KVA Superconducting Generator" ICEE Proceedings Vol. 2, pp. 155-158, July. 1998

[6] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff., "Analysis of Electric Machinery" IEEE PRESS. 1995.

[7] Dragan S. Petrovic, PH.D. and Sinisa S. Stojkovic, B.Sc, "A Numerical Procedure for Identification of Parameters of Synchronous Machine from 3-phase short circuit Test". SM'100, pp. 90-94, Aug. 1991

[8] J.P. Sturgess et. al, "Finite-element Simulation of Generator on Load During and After a Three-phase Fault" IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.7, No. 4, December 1992

[9] P.J. Turner, "Finite-element Simulation Turbin-Generator Terminal Faults and Appliation to Machine Parameter Prediction" IEEE, Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 1, March 1987

[10] 김성명, "유한요소법을 이용한 초전도 발전기의 정수산정", 동아대학교, 1998

[11] 이승완, 이윤종, "전기기기-직류기, 동기기, 정류기" 문운당, 1995.

[12] 배동진, "초전도 교류발전기의 설계이론 및 특성 해석" 서울 대학교, 1990

[13] I. Muta, "Equivalent Circuit Modeling of Superconducting Synchronous Generator with Double Electromagnetic Shields" Trnsient from Denki Gakkai Ronbunshi, vol. 100B NO. 10, pp. 593-600, Oct. 1980

부록 : 기호 설명

\vec{B} [Wb/m²] : 자속밀도,
 \vec{E} [V/m] : 전장의 세기,

\vec{J}_s [A/m²] : 전원 전류,
 \vec{J}_e [A/m²] : 유기된 전류,
 \vec{H} [A/m] : 자장의 세기,
 μ, σ : 매질의 투자율 및 도전율
 Φ : 전계 스칼라 포텐셜이다.
 $E_0 \cos(\omega t - \alpha)$: 전기자 한상의 단락전의 유기기전력,
 x_d : 동기 리액턴스, x'_d : 과도 리액턴스,
 x''_d : 차 과도 리액턴스, T_d : 과도 시정수,
 T'_d : 차 과도 시정수, T_a : 전기자 시정수
 E : 유기기전력, V : 단자 전압,
 $I_q x_q$: 횡축 리액턴스 강하이다.

저 자 소개



김정철(金正哲)
1971년 11월 7일 생, 1999년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 현재 동 대학원 석사과정.



한성진(韓聲鎭)
1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년 8월-1995년 8월 캐나다 Queen's 대학 방문교수. 1983년 3월 - 현재 동아대학 전기공학과 교수