

틈새를 낸 열전자 차폐막을 갖는 초전도 교류 발전기의 과도특성 해석

한 성진*, 한 송엽*

- 동아대학교 공과대학 전기공학과
- * 서울대학교 공과대학 전기공학과

Transient Characteristics Analysis of Superconducting Alternator with Slitted Electrothermal Shield

Sung-Chin Hahn*, Song-Yop Hahn*

- Dept. of Electrical Eng., Dong-A Univ.
- * Dept. of Electrical Eng., Seoul National Univ.

abstract - In this paper, the transient shielding characteristics of slitted electrothermal shield of superconducting alternator is studied. The field current and the armature currents variations during three phase short circuit fault are calculated and compared to those of the conventional one. And the response of the armature current due to step-up of the excitation voltage shows the feasibility of the quick response excitation system available for improving the transient stability.

1. 서 론

초전도 발전기는 효율 향상, 소형 경량화, 대형화 및 정태 안정도 향상의 가능성을 지니고 있지만 과도 안정도는 현용 발전기에 비하여 거의 비슷한 수준에 있기 때문에 이의 개선이 요구된다.¹⁻⁴⁾ 그중 한가지가 계자전압의 신속한 변화를 가능하게 하여 과도 안정도 향상을 도모할 수 있는 속응여자 방식의 채용이 요구된다. 지금까지 연구되고 있는 대부분의 초전도 발전기는 상온 탭퍼와 열전자 차폐막으로 된 이중의 차폐막구조로 되어 있는데 이 열전자 차폐막은 비동기 자계를 차폐하기 위하여 비교적 긴 시정수를 갖고 있다.⁵⁻⁶⁾ 따라서 외부자계를 차폐하는 것과 마찬가지로 계자전류 변화에 의한 변동자속 역시 열전자 차폐막에 의해 차폐되기 때문에 속응여자가 불가능하다.

초전도 발전기에 속응여자 방식을 채용하여 과도 안정도를 개선하기 위해서는 계자전류를 부하변동(예를 들면 단락사고 등)에 따라 급히 변화시켰을 때 이에 따르는 계자손실을 낮추어야 하며, 자속변화를 신속히 전기자에 전달하여야 한다.

본 논문에서는 직축에 틈새를 낸 열전자 차폐막을 갖는 초전도 발전기의 과도 차폐특성⁷⁾ 과 여자전압 제어에 따른 전기자 전압의 변화 특성을 해석하여 종래의 열전자 차폐막 초전도 발전기의 특성과 비교, 검토함으로써, 속응 여자가 가능하고 과도 안정도를 개선할 수 있음을 보이고자 한다.

2. 틈새를 낸 열전자 차폐막

초전도 발전기의 회전자에는 기본적으로 초전도 계자권선이 있고, 이것은 토오크관을 통하여 축과 기계적으로 결합되어 있다. 열전자 차폐막의 자기차폐 특성을 개선하면 전기자 권선에서 발생한 비동기 자속이 초전도 권선으로 침입하는 것을 막을 수 있으나, 초전도 권선에 의하여 발생한 과도 계자자속이 전기자 권선에 도달하는데 많은 시간 지연을 주게 된다. 즉 발전기의 직축 과도 특성을 저해하게 된다. 이와같이 서로 상반되는 효과를 조절하여 종래의 초전도 발전기에서는 이 열전자 차폐막의 전기적 시정수를 1 - 2초 정도로 하고 있다. 그리고 이 정도의 시정수를 갖는 초전도 발전기의 과도 안정도는 종래의 상전도 계자권선 발전기와 비슷한 수준이 된다.

그림 1 은 종래의 열전자 차폐막에 틈새를 낸 경우를 보여주

고 있다. 우선 중앙에 종방향으로 틈새를 내고 다음에 와전류의 흐름을 줄일 수 있도록 직축에 횡방향으로 틈새를 낸 형태이다. 이렇게 되면 열의 흐름은 종전과 변함이 없으면서 와전류는 크게 감소하게 된다. 따라서 전차차폐는 종전과 큰 차이를 보이게 될 것이다.

3. 유한요소 정식화

본 논문에서는 틈새를 낸 열전자 차폐막을 갖는 초전도 교류발전기의 과도 차폐특성과 속응여자 가능성을 검토한다. 틈새가 있는 구조이기 때문에 집중 정수법에 의한 모델링을 할수없으며 유한 요소법에 의해 모델링⁸⁻⁹⁾ 하고 이의 차폐 효과를 계산한 후, 이의 과도특성을 기존의 열전자 차폐가 있는 발전기의 과도 특성과 비교하여 초전도 발전기에 속응여자 적용 가능성을 검토하고자 한다.

전류가 흐르는 공간의 전기자적 현상은 변위전류를 무시한 맥스웰 방정식으로부터 다음과 같이 표현한다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J}_0 + \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \right) \quad (1)$$

혹은, Coulomb's Gauge $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ 를 적용하고 매질이 선형이라고 가정하면

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_0 + \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \right) \quad (2)$$

를 얻는다.

한편, 발전기는 송전선을 통하여 무한도선에 연결되어 있기 때문에 회로전류 역시 미지변수가 되어 통상의 전류원 유한요소법에 의해서는 해석이 불가능하다. 따라서 외부회로 방정식을 결합시킨 전압원 유한요소 정식화를 행하였으며, 계자 및 전기자 권선의 내부 저항과 유기 기전력, 그리고 송전선의 저항과 인덕턴스, 계자 및 무한 모선의 전압원은 다음과 같은 회로 방정식을 만족한다.

$$\frac{d}{dt} \{ \Phi \} + [L] \frac{d}{dt} \{ i \} + [R] \{ i \} = \{ v \} \quad (3)$$

단, $\{ \Phi \} = \{ \Phi_f, \Phi_a, \Phi_b, \Phi_c \}$

$[L] = \text{diag} [L_f, L_a, L_b, L_c]$

$[R] = \text{diag} [R_f, R_a, R_b, R_c]$

$\{ i \} = \{ i_f, i_a, i_b, i_c \}$

$\{ v \} = \{ v_f, v_a, v_b, v_c \}$

이며, 여기서 L 과 R 은 각각 고정점 까지의 인덕턴스와 저항이고 첨자 f, a, b, c 는 각각 계자 및 전기자의 a, b, c 상을 나타낸다.

여기서 식(2)를 갤러킨법(Galerkin scheme)에 의하여 이산화 하고 계자 및 전기자 3상의 회로방정식을 결합하여 얻어지는 계행 렬 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} r(G11) & (G12) & (G13) \\ (G21) & (G22) & (G23) \\ (G31) & (G32) & (G33) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(A) \\ (1) \\ (\partial\psi/\partial z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(F1) \\ (F2) \\ (0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

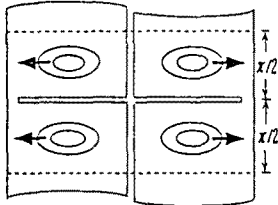


그림 1. 틱새를 낸 열전자 차폐막

4. 사례 연구

해석 모델은 2 GVA 발전기인데 연구 사례로는 3상 단락 사고 가 발생한 경우를 다루었다. 그리고 발전기는 단락 사고전에는 무부하 정상 상태로 운전되고 있고, 단락 사고 전후의 발전기 회전 속도는 변하지 않는 것으로 하였다.

그림 2는 슬릿이 있는 경우 (SES)의 해석 대상 모델의 2차원 단면도를 나타내고 있다. CES 모델은 슬릿 (slit) 부분이 없이 원통형의 도전통으로 되어 있는 형태이다.

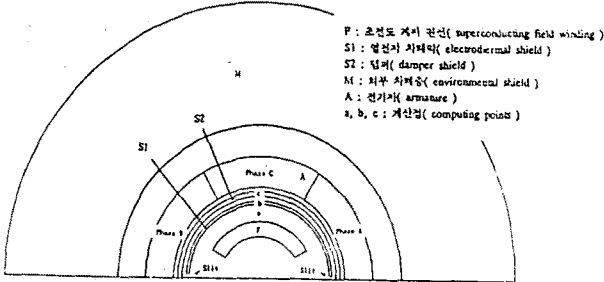


그림 2. 해석 모델

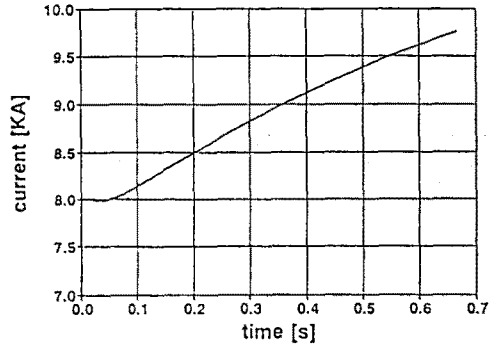
1. 계자 및 전기자 전류

3상 단락 사고의 경우 계자 전류의 변화를 보면 그림 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 제한된 모델 (SES)은 기존의 모델 (CES)에 비해 계자 전류가 급격히 변화하였다. 따라서 속응 여 자의 가능성을 볼 수 있다.

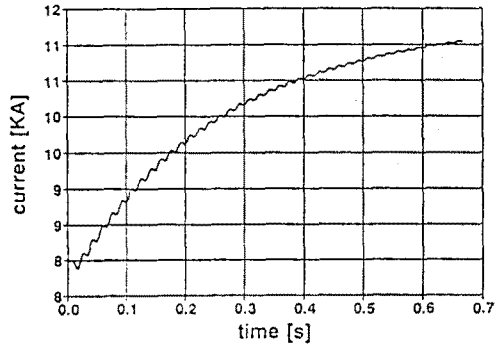
그림 4는 3상 단락 사고의 경우에 대한 전기자 전류의 변화 를 보여주고 있다. SES의 단락 전류의 포락선(envelope)은 CES에 비해 빨리 줄어 드는 것을 볼 수 있는데, 이는 슬릿이 직 축 특성에 미치는 효과가 열전자 차폐막이 없는 것과 같음을 보여 주고 있으며 직축의 슬릿은 직축 과도 특성을 개선하고 있음을 보여준다. 그리고 그림 4로부터 동기 리액턴스의 시간변화를 구 해보면 그림 5와 같이된다. 시간이 0 - 0.1 초 사이에서는 두 모델이 같은 동기 리액턴스값을 갖는데 이는 동일한 상온 덤퍼를 사용하기 때문이고, 시간이 0.1 초 이후는 두 모델이 각각 다른 동기 리액턴스값을 갖는데, 이는 열전자 차폐막의 특성이 다르기 때문이다. 따라서 SES를 갖는 발전기의 직축 과도특성은 틱새 가 없는 발전기에 비해서 개선 될 것으로 예상된다.

2. 외전류 밀도

3상 단락 후 약 0.2초가 경과하였을 때의 열전자 차폐막 에서의 전류 밀도 분포를 그림 6에 나타내고 있다. SES의 경우가 열전자 차폐막의 양 끝 부분을 제외하고는 전체적으로 전류 밀도 가 적게 나타나고 있다. 따라서 SES의 경우 단락 사고에 의한

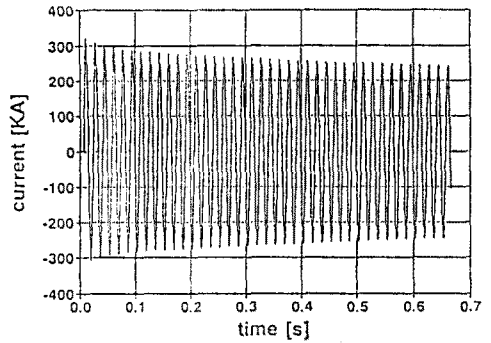


a) CES의 계자전류

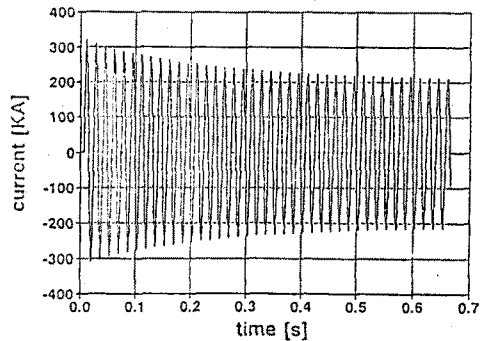


b) SES의 계자전류

그림 3. 계자 전류 (삼상단락)



a) CES의 전기자 a상 전류



b) SES의 전기자 a상 전류

그림 4. 전기자 전류 (삼상단락)

열전자 차폐막에서의 손실은 CES의 경우보다 많이 감소됨을 알 수 있다.

3. 여자전압 변화에 따른 전기자 전압변화

일정여자 방식의 초전도 발전기는 계자손실 때문에 계자전압

을 급격히 변화시킬 수 있다. 그러나 속응여자형 발전기는 여자 회로를 제어하여 계자전압을 변화시킬 수 있기 때문에 계동의 동요를 안정시킬 수 있다.

발전기가 무부하 정상 운전중에 계통에 연결한 후 여자전압을 step으로 상승시켰을 때 발전기 단자 전압의 포락선을 그려 보면 그림 7 과 같다. 계자전압을 변화시킨 후 SES의 단자전압이 CES에 비해 급히 증가함을 보여 속응여자가 가능함을 알 수 있다.

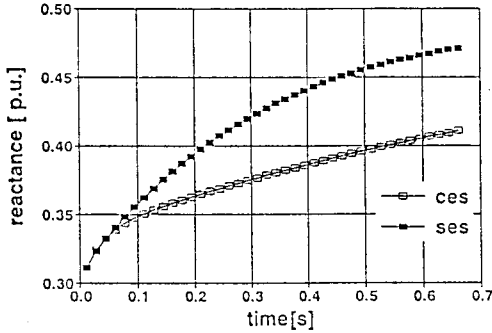


그림 5. 동기 리액탄스의 변화

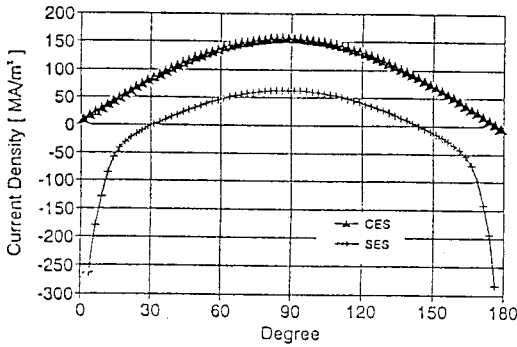


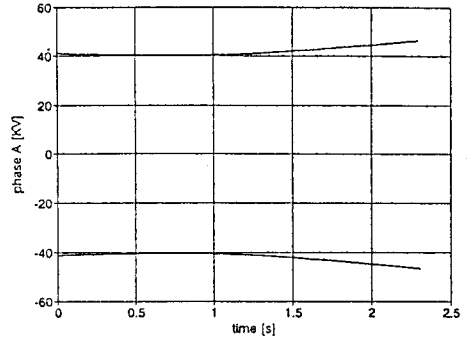
그림 6. 열전자 차폐막의 화전류 분포 (삼상 단락)

5. 결 론

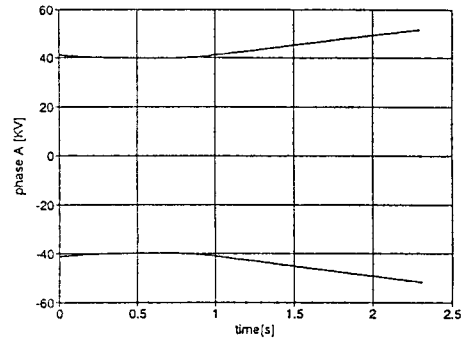
본 논문에서는 틸새를 낸 열전자 차폐막을 갖는 초전도 교류 발전기의 과도 차폐특성을 해석하였고 여자전압을 변화시켜 전기자 전압의 변화를 해석하여 속응 여자가 가능함을 보였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 발전기의 직축에만 틸새를 내고 3상단락 사고에 대한 계자전류 변화를 해석한 결과 직축 과도특성이 개선됨을 뜻하고 있다.
- (2) 한편, 자장의 변화를 해석한 결과는 완전 차폐를 한 경우와 비슷한 특성을 나타내고 있어 차폐가 없는 경우보다 초전도선의 보호가 잘 됨을 확인하였다.
- (3) 발전기의 여자전압을 변화시켰을 때 틸새가 있는 경우에 단자전압의 응답이 빠른 것으로 보아 속응 여자에 의한 과도 안정도가 개선될 수 있음을 예측할 수 있다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.



a) CES의 단자전압



b) SES의 단자전압

그림 7. 여자전압 변화에 따른 단자 전압의 변화 (step up)

참 고 문 헌

- 1) J. L. Kirtley, Jr., " Supercool generation, " IEEE Spectrum, pp. 28-35, April, 1983.
- 2) 한 송열, " 초전도 교류 발전기의 개발현황과 문제점, " 대한기계학회지, vol. 27., No. 3, pp. 180-186, 1987
- 3) A. Fevrier, " Latest news about superconducting ac machines, " IEEE Trans. on Mag., vol 24, No. 2, pp. 787-791, March, 1988
- 4) J. L. Kirtley, F. J. Edeskuty, " Application of superconductors to motors, generators, and transmission lines, " Proceedings of the IEEE, vol. 77, No. 8, pp. 1143-1154, August, 1989
- 5) J. R. Bumby, " Superconducting electrical machines, " Clarendon press, Oxford, 1983.
- 6) M. Furuyama, J. L. Kirtley, Jr., " Transient stability of superconducting alternators, " IEEE Trans. on PAS., vol. PAS-94, No. 2, pp. 320-328, March/April, 1975
- 7) S. Y. Hahn, A. Mailfert, A. Rezzoug, " Transient performance of superconducting alternator with damper winding, " IEEE PES Winter Meeting, paper A79, 1979
- 8) S. C. Hahn, S. Y. Hahn, et al., " Transient shielding effect of slitted electrothermal shield of superconducting generator, " IEEE Trans. on Mag., vol. 28, No. 1, pp. 295-298, Jan., 1992
- 9) A. J. Davies, " The finite element method, " Clarendon Press, 1980
- 10) T. Nakada, N. Takahashi, K. Fusiwara, " Physical meaning of grad ϕ in eddy current analysis using magnetic vector potentials, " IEEE Trans. on Mag., vol. 24, No. 1, pp. 178-181, Jan., 1988