

## 자기에너지 계산을 통한 고온초전도 모터의 역기전력 산정

백승규\*, 권영길\*, 김호민\*, 이연용\*, 이재득\*, 김영춘\*\*, 문태선\*\*, 박희주\*\*, 이치환\*\*, 권운식\*\*  
한국전기연구원 초전도기기연구그룹\*, 두산중공업 기술연구원\*\*

### Excitation Voltage Estimation of HTS Motor via Magnetic Energy Calculation

S. K. Baik\*, Y. K. Kwon\*, H. M. Kim\*, E. Y. Lee\*, J. D. Lee\*,  
Y. C. Kim\*\*, T. S. Moon\*\*, H. J. Park\*\*, C. H. Lee\*\*, W. S. Kwon\*\*  
Korea Electrotechnology Research Institute\*, Doosan Heavy Industries & Construction\*\*

실험치

$\omega$  ; 각 주파수(= 2 $\pi$ f)

#### 1. 서 론

초전도 모터나 발전기는 자기회로의 대부분을 이루는 철심이 최외곽의 기계실드(기존 기기의 요오크)에만 존재하므로 2차원적으로 역기전력(Excitation Voltage or Back E.M.F)를 구할 경우 코일 단부의 영향이 고려되지 않으므로 실제의 값과 큰 오차를 지니게 된다. 따라서 정확한 역기전력 값을 얻기 위해서는 3차원적인 자장 해석이 필수적이다. 3차원적인 자장해석을 통하여 역기전력을 산정하기 위해서는 반드시 고정자 코일을 3차원적으로 모델링하여야 하며 쇄교되는 자속을 정확히 계산하여야 역기전력을 정확히 산정할 수 있다. 그러나 고정자 코일이 다이아몬드 형태로 3차원적으로 배치되기 때문에 계자의 자장에 의해 쇄교되는 자속량을 정확히 구하기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 코일에 의한 자기에너지를 3차원적으로 구하여 공심형의 구조를 갖는 초전도 동기기의 역기전력을 구하는 방법을 제안한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 기본 이론

자기장에 의해서 어떤 공간에 저장되는 에너지는 식 (1)과 같이 표시된다. 코일에 의해서 자기장이 발생할 경우 저장되는 총 에너지와 그 코일의 인덕턴스는 식 (2)와 같이 표시된다. 동기기에서 고정자 코일과 계자코일이 통전되었을 경우에 자기적으로 저장되는 에너지는 식 (3)과 같이 표시할 수 있다. 또한 동기기에서 발생하는 역기전력은 식 (4)와 같이 표시되므로 계자코일과 고정자 코일 간의 상호인덕턴스의 최대값만 구할 수 있으면 그 값을 산정할 수 있다. 본 논문에서는 최외곽의 기계실드만 원통형의 철심인 초전도 모터를 3차원적으로 자장 해석하여 자기에너지를 구하고, 이를 통하여 계자 코일과 고정자 코일의 자기 인덕턴스를 식 (2)에 의하여 구하였다. 그리고 구해진 자기 인덕턴스를 식 (3)에 대입하여 계자 코일과 고정자 코일의 상호인덕턴스의 최대값을 구하여 식 (4)에 의하여 역기전력을 산정하였다.

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \vec{B} \cdot \vec{H} dv \quad (1)$$

$$L = \frac{2W_H}{I^2} \quad (2)$$

$$W_{total} = \frac{1}{2} L_f I_f^2 + \frac{1}{2} L_a I_a^2 + M_{af} I_f I_a \quad (3)$$

여기서,  $W_{total}$  ; 총 저장에너지

$L_f$  ; 계자 코일 자기 인덕턴스

$I_f$  ; 계자 코일 통전 전류

$L_a$  ; 고정자 코일 한 상의 자기 인덕턴스

$I_a$  ; 고정자 코일 통전 전류

$M_{af}$  ; 계자 코일과 고정자 코일의 상호 인덕턴스 최대값

$$E_{0Phase} = \frac{\omega M_{af} I_f}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

여기서,  $E_{0Phase}$  ; 고정자 코일 상당 발생하는 역기전력

##### 2.2 해석 대상 고온초전도 모터(HTS Motor)

해석의 정확도를 검증하기 위하여 당 연구그룹에서 개발한 1 MW 급의 고온초전도 모터의 역기전력 실험 결과를 이용하였다. <Table 1>에 개발된 1 MW 급 고온초전도 모터의 사양을 보여주며, <Fig. 1>에 부하시험 모습을 보여준다.

<Table 1> Major Spec. of the Developed 1 MW class HTS Synchronous Motor

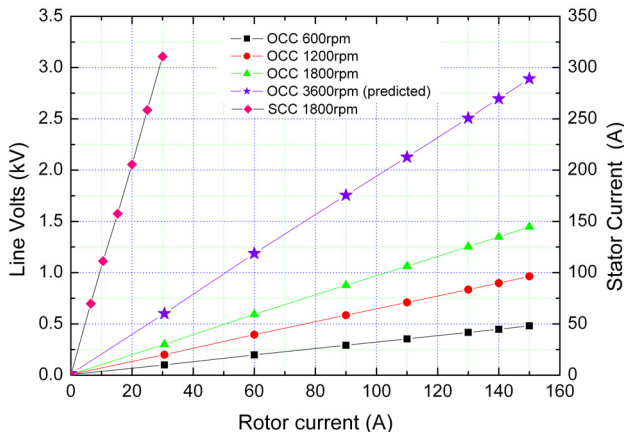
정격용량	1 MW	계자코일 턴 수	3348
정격속도	3600 rpm	계자코일 초전도체	Bi-2223
주파수	60 Hz	계자코일 동작온도	30 ~ 40 K
극수	2 극	축방향 길이× 높이	2.4 × 1.2m
정격 단자전압	3300 V	전기자 슬롯 수	36
계자 정격전류	150 A	전기자 코일 턴 수	48턴/상
계자도체 전류밀도	115 A/mm <sup>2</sup>	전기자 냉각방식	수냉식



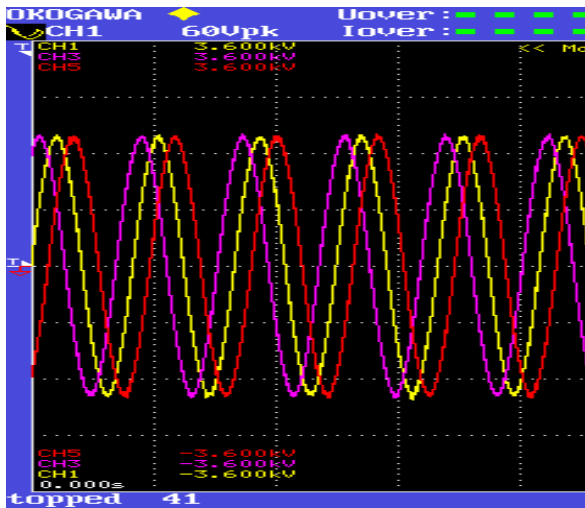
<Fig. 1> Appearance of 1 MW class HTS motor and load test facility

<Fig. 2>에 역기전력을 측정된 결과를 보여주며, <Fig. 3>에 역기전력의 측정 파형을 보여준다(한 상이 뒤집어진 것은 측정 기기의 결선 조건때문임). 초전도 동기기는 iron teeth가 없는 공심형의 구조이므로 고정자 코일을 단절권으로 하지 않아도 그림과 같이 매우 정현적인 파형을 얻을 수가 있다. 따라서 계자 코일과 고정자 코일 간의 상호 인덕턴스 최대값을 이용하여 역기

전력의 최대값을 구한 후 식 (4)와 같이 정현파의 실효값을 구하기 위해  $\sqrt{2}$ 로 나누어도 큰 오차는 발생하지 않을 것으로 보인다.



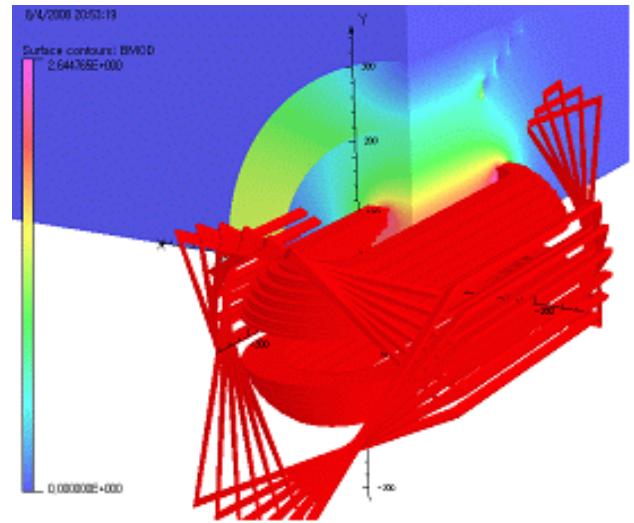
<Fig. 2> Open and short circuit characteristics test result



<Fig. 3> Generated voltage waveforms from open circuit characteristics test(1800 rpm, Field current 150 A)

### 2.3 3차원 자장 해석을 통한 역기전력 산정

1 MW 고온초전도 모터의 고정자 코일을 모델링하여 고정자 코일과 계자코일 간의 상호인덕턴스의 최대 위치에 배치시킨 후 3차원 자장해석을 통하여 저장된 에너지를 구하여, 상호인덕턴스 값을 산정하고 이를 이용하여 역기전력 값을 산정하고자 한다. 고정자 코일은 <Fig. 4>에서와 같은 형상으로 모델링하였고 설계된 정격전류 실효치와 동일한 직류 181.42 A 를 여자시켜 고정자코일 한 상의 자기인덕턴스를 구하였다. 고정자 코일 한 상만 여자하였을 경우에 해석 영역에 저장된 에너지는 3.87 J이고 총 저장에너지는 30.96 J이며 이를 이용하여 자기인덕턴스는 1.88 mH로 산정되었다. 계자 코일만 동작 전류 150 A로 여자시켰을 경우 해석영역에서의 저장에너지는 4331.4 J이며 총 저장에너지는 해석영역에서의 8배인 34,651 J이며 이를 이용하여 계산된 계자코일의 자기인덕턴스는 3.08 H이다. 고정자 코일과 계자코일을 모두 여자하였을 때 해석영역에서의 저장에너지는 4331.4 J이고 저장된 총 에너지는 해석영역의 8 배인 35,859 J이었으며 식 (3)을 이용하여 고정자 코일과 계자 코일의 상호인덕턴스 최대치를 구하였다. 계산된 상호 인덕턴스의 최대값은 0.04324 H이며 식 (4)를 통하여 고정자 코일 상단 발생하는 역기전력의 실효치를 구하면 1782.92 V였다. 따라서 선간 역기전력 실효치는 상당 역기전력의  $\sqrt{3}$  배인 2994.57 V였다. 1 MW 고온초전도 모터의 실험을 통하여 구하여진 3600 rpm에서의 역기전력은 2891.2 V이며, 계산된 2994.57 V는 3.57 %의 오차를 보였다.



<Fig. 4> 3D magnetic field distribution when field and one armature phase coils are excited with rated DC current

### 3. 결 론

본 논문에서는 역기전력을 정확히 구하기 위해서는 3차원적인 자장 해석이 필요한 초전도 동기기의 역기전력 산정 방법에 관한 것으로서 코일에 의해 저장되는 자기 에너지를 통한 방법을 소개하였다. 대부분의 회전기는 고정자 코일이 분포권의 형태를 가지며, 특히 초전도 동기기는 코일의 단부에 의한 영향이 상당히 크므로 채교되는 자속을 계산하여 역기전력을 산정하는데는 상당히 어려움이 있다. 하지만 본 논문에서와 같이 자기 에너지는 쉽게 전자기적으로 계산이 가능하므로 본 논문에서 제시하는 방법이 공심형 구조의 초전도 동기기의 역기전력을 쉽고 빠르게 산정할 수 있는 방법이라 여겨진다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

### [참 고 문 헌]

- [1] 백승규, 손명환, 이인용, 권영길, 문태신, 박희주, 김영춘, “수냉식 1MW 고온초전도 동기모터의 설계”, 한국초전도·저온공학회논문지, 7권 3호, pp.21~28, 2005년 9월
- [2] M. Frank et al., “Long-Term Operational Experience With First Siemens 400 kW HTS Machine in Diverse Configurations” IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 13, No. 2, pp.2120~2123, JUNE 2003
- [3] A.E. Fitzgerald et al., “ELECTRIC MACHINERY”, McGRAW-HILL, 5th edition, pp.216~259, 1991
- [4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., “IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines(IEEE Std 115-1995)”, pp.27~38, December, 1995