Study on the Characteristics of Magnetic Field Distribution in AC Superconducting Generator Using Normalized Data

Young-Sik Jo, Ho-Jin Ahn, Jung-Pyo Hong, Ju Lee[a],
Young-Kil Kwon[b], Kang-Sik Ryu[b]
#9, Sarim-Dong, Changwon, Kyungnam, 641-773, Korea, Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University,
[a]*Division of Electric and Computer Engineering, Hanyang University,*
[b]*Korea Electrotechnology Research Institute*
Received 27 July 2000

Abstract

AC Superconducting Generators (ACSG) are featured by 3D magnetic flux distribution, which decreases in the direction of axis. For this reason, when ACSG is optimal designed, 3D magnetic field analysis is required. This paper proposes 2D Finite Element Analysis (FEA) results normalized by 3D FEA according to the position of armature coil and the ratio of field coil width to axial length in order to reduce the analysis time. By using the proposed data, the reasonable 3D FEA results of ACSG can be only predicted by 2D FEA results. The validity of the 3D FEA results is verified by comparison with the experimental results of 30kVA superconducting synchronous generator.

Keywords : AC Superconducting Generator(ACSG), 3D magnetic flux distribution, Normalized data

I. 서론

2000년대 국내 전력수요가 지속적인 증가추세에 있고 에너지 공급원인 화석연료의 97% 이상을 외국에 의존하는 국내 실정으로 볼 때 고효율·대용량의 발전기의 개발은 매우 시급한 문제이다. 미국을 위시한 일본, 유럽에서도 가까운 미래에 닥치게 될 에너지 문제에 대비하기 위해서 고효율·대용량화가 가능한 초전도발전기를 상용화하기 위한 많은 연구가 진행중이고, 최근에는 HTS(High Temperature Superconductor)의 개발이 가속화됨에 따라 이를 이용한 초전도발전기의 연구가 미국을 비롯한 여러 국가에서 2015~2020년경에 상용화를 목표로 하여 국가적 사업으로 진행 중에 있다 [1~3].

초전도발전기는 특정온도 이하에서 초전도상태가 되어 전기저항이 제로가 되는 초전도체의 특성을 이용하기 때문에 냉각·단열구조가 필수적이고 고자장을 사용하기 위해서 계자보빈이나 전기자보빈으로 비자성체를 사용한다. 이런 이유로 사용된 초전도체의 종류에 관계없이 초전도발전기의 자속밀도 분포는 일반적인 발전기와는 다르게 축 방향으로 저감하고, 전기자에서 매우 정현적인 분포를 가지는 특성을 나타낸다. 따라서 초전도발전기는 3차원 전자장 해석이 필수적이다. [4].

본 논문에서는 초전도발전기의 3차원적인 자속밀도 분포특성을 고찰하기 위해서 2차원 전자장 해석결과를 기준으로 3차원 해석결과를 표준화시켜 검토하였다. 먼저 레이스트랙 형태인 폐회로의 선 전류 분포(L-Model)를 임의로

Fax: +82 55 262 5966
e-mail: gkstkso@cosmos.changwon.ac.kr

설정하여 (z 축 방향길이)/(x 축 방향길이) (*l/w*)의 비에 따른 자속밀도 분포특성을 해석적인 방법을 사용하여 자장분포를 계산하였으며, 두 번째로는 제작된 30kVA 초전도발전기를 대상으로 2차원, 3차원 FEA를 사용하여 자장분포를 계산하였다.

제작된 30kVA의 실험결과와 3차원 FEA 전자장 해석결과를 비교하여 해석결과의 정도를 검증하였다.

II. 전자장 해석이론 및 해석모델

먼저 레이스트랙 형태를 가진 폐회로의 선 전류 분포를 임의로 설정하여 *l/w*의 비에 따른 자속밀도 분포특성은 해석모델이 수학적으로 모델링하기 쉽기 때문에 FEA와 같은 수치 해석적인 방법보다는 해석적 방법이 해석정도나 해석시간의 단축 면에서 매우 유용하다. 따라서 2차원, 3차원 전자장 해석은 Biot-Savart의 법칙인 수식 (1)을 사용하였다.

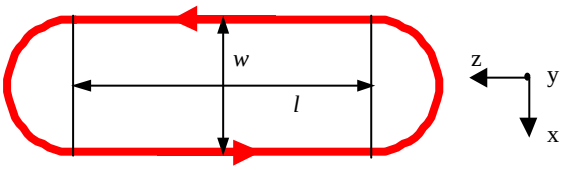

그림 1. 레이스트랙 형태의 선 전류 모델

표 1. ACSG의 주요사양

정격출력	30kVA
정격속도	1800rpm
극수	4
슬롯당 도체수	10
슬롯수	36
계자코일	NbTi
임계전류	580 A(5T, 4.2K)
계자코일턴수	532
입력전류	200 A

$$d\vec{B} = \frac{m_0 I}{4p}\left(\frac{d\vec{l}' \times \vec{R}}{R^3}\right) \qquad (1)$$

여기서 $d\vec{B}$는 미소전류소에 의한 임의의 점에서의 자속밀도, m_0는 공기중의 투자율, $Id\vec{l}'$는 미소 전류소, $\vec{R}$은 미소 전류소에서 임의의 점으로 향하는 벡터이다.

그림 1은 첫 번째 방법의 해석모델(L-Model)로 *l*은 레이스트랙 형태의 선 전류분포에서 직선부의 길이를 나타내고, *w*는 x 축방향의 길이로 선 전류분포에서의 폭을 나타낸다. L-Model의 앤드링은 *w*를 직경으로 하는 반원의 형태이며, y=0은 선 전류와 같은 단면상에 있음을 나타낸다.

표 1은 제작된 발전기의 주요사양을 나타내고 계자코일은 레이스트랙 형태를 사용하였다.

그림 2는 3차원 FEA 전자장 해석모델을 나타내며 계자의 중심에서 전기자 중심 반경까지의 거리는 142 mm이다.

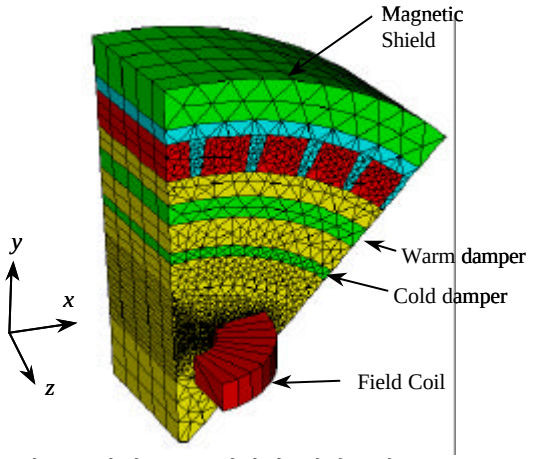

그림 2. 3차원 FEA 전자장 해석모델

III. 해석결과 및 검토

3-1. L-Model의 해석결과 및 검토

그림 3과 4는 L-Model의 정 중앙에서 y가 변할 때의 2차원 결과를 기준으로 3차원 결과를 표준화한 결과이다. 여기서 *w*는 54 mm로 고정하고 *l*을 변화시켰다. *l*/*w*의 비가 1일 때 높이가 커질수록 3차원 결과가 작아지며, *l*/*w*의 비가 커질수록 각각의 결과가 비슷한 값을 나타낸다.

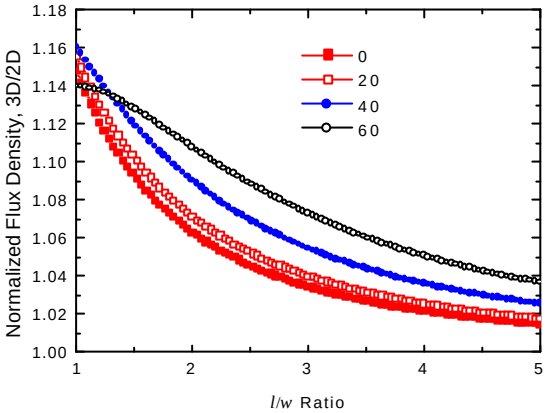

그림 3. 각각의 높이에서 *l*/*w* 의 비에 따른 2 차원 전자장 해석결과를 기준으로 3 차원 전자장 해석결과를 표준화한 결과

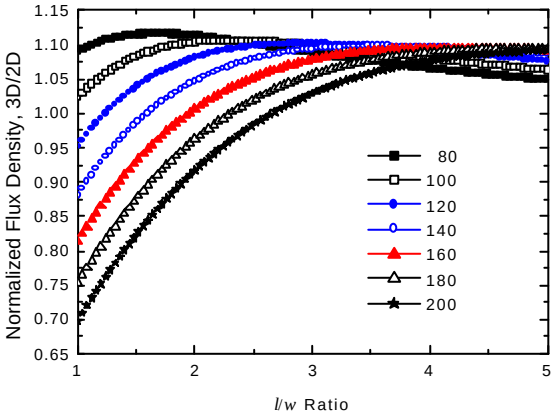

그림 4. 각각의 높이에서 *l*/*w* 의 비에 따른 2 차원 전자장 해석결과를 기준으로 3 차원 전자장 해석결과를 표준화한 결과

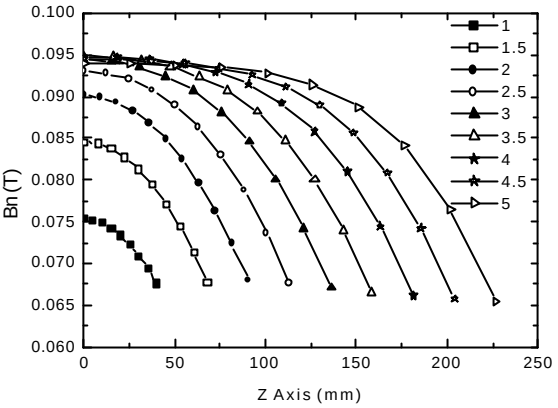

그림 5. y=142 mm인 점에서 z 축 길이변화에 따른 각각의 *l*/*w*의 비에 대한 Bn 특성

그림 5는 y=142 mm인 점에서 z 축 길이변화에 따른 각각의 *l*/*w*의 비에 대한 자속밀도의 반경방향 성분(Bn)의 특성을 나타낸다. Bn은 z 축 방향으로 저감하는 특성을 나타내며, Bn의 크기가 가장 큰 z=0에서 값이 z 축 길이에 비례하지 않음을 보여준다.

3-2. ACSG의 해석결과 및 검토

그림 6은 전기자 중심 반경에서 *l*/*w*의 비에 따른 2차원 FEA 전자장 해석결과를 기준으로 3차원 FEA 전자장 해석결과를 표준화한 결과이다. 제작된 ACSG 계자코일의 중심에서 전기자 중심 반경까지의 높이는 142 mm, 직선부의 길이는 192 mm, 그리고 계자의 폭은 54 mm로 *l*/*w*의 비는 약 3.6이다.

L-Model의 해석결과에서 보여졌듯이 y=142 mm인 점에서 *l*/*w*의 비가 1일 때 3차원 해석결과가 매우 적으며, *l*/*w*의 비가 커질수록 2차원, 3차원 결과가 비슷한 값을 가지게 된다.

그림 7은 전기자 중심 반경에서 z 축 길이변화에 따른 각각의 *l*/*w*의 비에 대한 Bn 특성으로 전기자의 앤드링도 포함하여 Bn을 도식화하였다. 초전도발전기는 계자의 전류분포, 4극 배치, 자기쉴드의 존재 등 많은 사항이 L-Model과 다름에도 불구하고 L-Model의 해석결과와 크게 다르지 않은 양상을 나타낸다. 초

전도발전기의 매우 중요한 특성인 z 축 방향으로 Bn이 저감하는 현상을 비슷하게 보여주고 있으며, 특히 Bn의 크기는 *l/w*의 비와 정 비례하지 않는다.

그림 8 은 *l/w* 의 비에 따른 계자코일에 발생하는 자속밀도의 최대치(Bmax)를 2 차원 FEA 전자장 해석결과를 기준으로 3 차원 FEA 전자장 해석결과를 표준화한 결과이다. Bmax를 *l/w* 의 비가 1일 때와 5를 비교하면, 2차원 해석결과와 3 차원 해석결과가 0.01285 Tesla 차이로 매우 적은 값의 차이를 나타낸다.

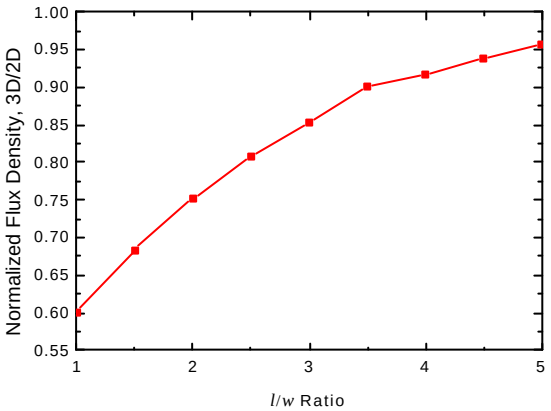

그림 6. 전기자 중심 반경에서 *l/w* 의 비에 따른 FEA 전자장 해석결과를 표준화한 결과

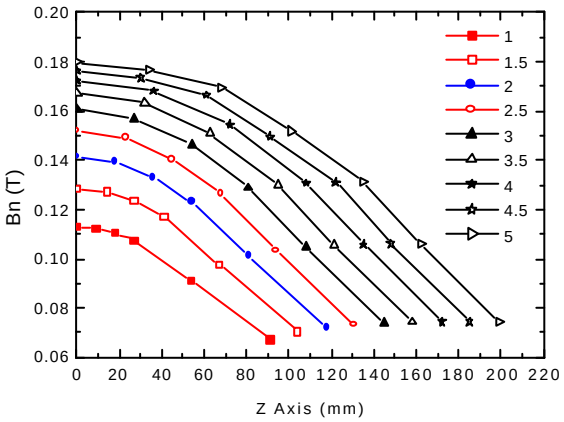

그림 7. 전기자 중심 반경에서 z 축 길이변화에 따른 각각의 *l/w*의 비에 대한 Bn 특성

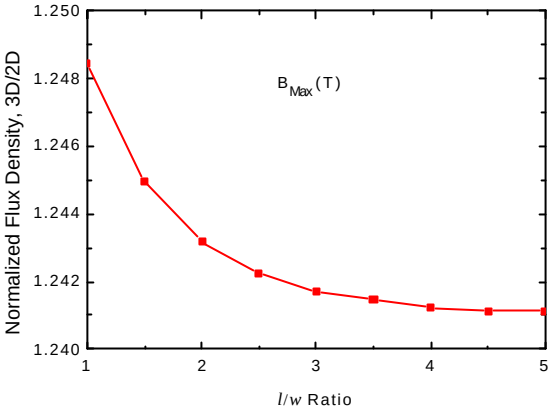

그림 8. *l/w* 의 비에 따른 Bmax

IV. 실험결과 및 검토

그림 9 는 30kVA 초전도발전기의 선간전압에 대한 실험결과와 해석결과를 나타낸다. 실험결과 312V, 해석결과 343V 였다. 선간전압의 왜형율은 실험결과와 해석결과 모두 1% 미만으로 매우 정현적이었다.

그림 10 은 제작된 30kVA 초전도발전기를 나타낸다.

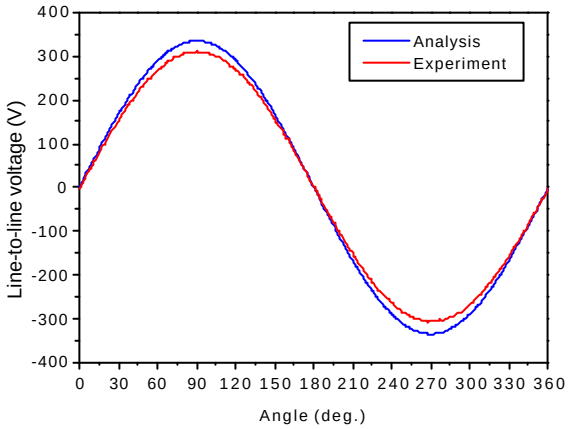

그림 9. 해석결과와 실험결과 비교

IV. 결론

본 논문에서는 초전도발전기의 자속밀도 분포특성을 고찰하기 위해서 L-Model 과 제작된 초전도발전기에서 각각의 2 차원 전자장 해석결과를 기준으로 3 차원 전자장 해석결과를 표준화시켜 그 특성을 검토하였다. 그 결과, 초전도발전기와 L-Model에서의 *l/w* 의 비에 따른 자속밀도 분포는 비슷한 양상을 나타내었는데 특히, y=142 에서 *l/w* 의 비에 따른 Bn 의 양상이 비슷하며, 2 차원 결과와 3 차원 결과의 차이가 큼을 확인할 수 있었다. 3 차원 전자장 해석결과는 실험결과와 비교하여 약 7% 큰 것으로 해석정도가 높은 것으로 판단된다.

References

[1] D. Bruce Montgomery, "The Future Prospects for Large Scale Applications of Superconductivity", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, pp. 134-145, 1997

[2] B.B. Gamble et al., "Prospects for HTS Applications", IEEE Trans. on Magn., Vol. 32, No. 4, pp. 2714-2719, 1996

[3] R. D. Blaugher, "Low-calorie, high-energy generators and motors", IEEE Spectrum, July, pp. 36~42, 1997

[4] Y.S. Jo et. al.,"An Approach to the Shape Optimum Design of Superconducting Synchronous Generator", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 10, No. 1, pp. 939-942, 2000

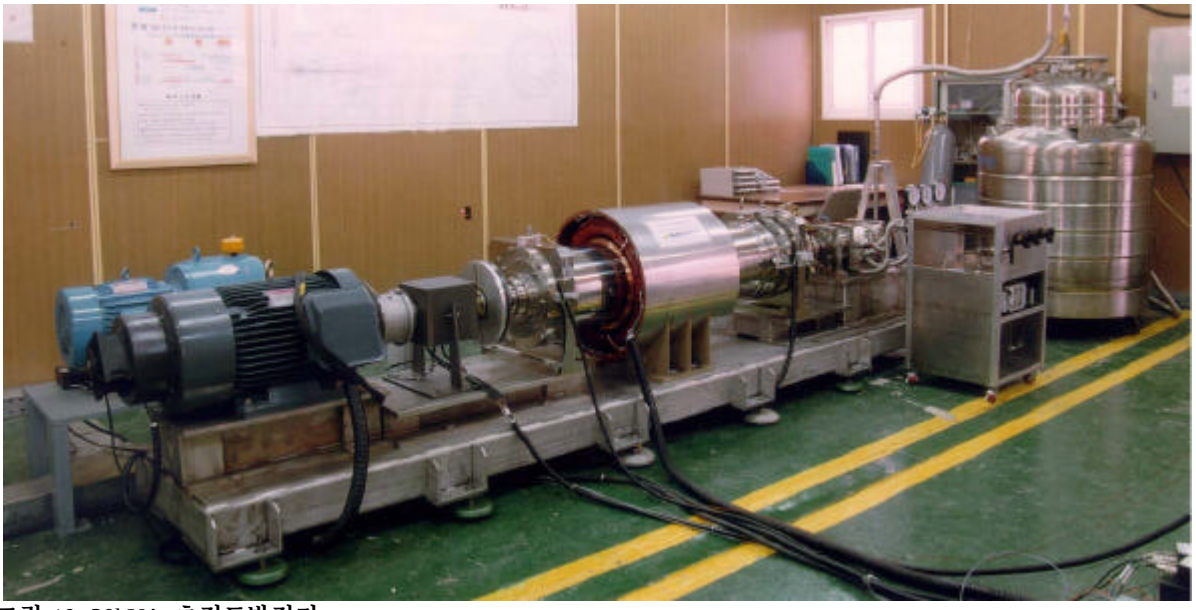

그림 10. 30kVA 초전도발전기