

3차원 유한요소법을 이용한 초전도 발전기의 고정자 유효길이 산정

이종혁¹, 신판석, 박도영², 김용주

¹ 홍익대학교 전기공학과, ² 한국전기연구소 발전기 진단연구팀

An Estimation of Effective Stator Length of Superconducting Generator Using 3D FEM

Jong-Hyuk Lee¹, Pan-Seok Shin, Do-Young Park² and Yong-Ju Kim

¹Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik Univ., ²Team of Generator Diagnosis, KERI

Abstract - This paper has proposed a method to estimate effective length of a 30 KVA superconducting generator using 3-dimensional FEM program. Flux linkage of the stator coil is calculated by the FEM program and the induced voltage is computed using the simple Faraday's law.

1. 서 론

초전도 발전기는 기존의 상전도 발전기와는 달리 온도가 절대 온도 4 °K 근방에서 초전도 선재가 저항이 영(zero)이 되므로써 선재에 높은 전류를 흘릴 수 있다. 따라서 이러한 높은 계자 전류를 이용하면 고자계의 자장을 만들 수 있으므로 기존의 발전기보다 높은 효율을 얻을 수 있게 된다. 또한 회전자(계자)의 구조도 coreless화 할 수 있으며, 고정자(전기자)도 구조를 간단하게 형성할 수 있으므로 대용량화 및 소형화를 용이하게 할 수 있다.

본 논문은 3차원 유한요소법을 이용하여 30 KVA 초전도 발전기의 고정자 coil의 유효길이를 산정하는 방법을 제시하였다. 초전도 발전기는 일반 상전도 발전기와는 달리 공극의 길이가 매우 크기 때문에 고정자 coil의 유효길이를 어떻게 산정하느냐 하는 것이 큰 문제가 되므로, 전기자 coil의 여러 가지 형상으로 modelling 하여 유기전압을 계산하기에 가장 합리적인 coil의 형상을 찾아 전기자 coil의 최적의 유효길이를 산정할 수 있다. 또한 이러한 방법으로 산정한 coil을 실제 발전기의 설계에 적용할 수 있게 하며, 나아가서는 1 MVA 초전도 발전기를 설계하는데 기초자료로 삼는다.

2. 본 론

3차원의 해석은 2차원의 해석에 의한 만큼의 다양성이 없기 때문에 여러 가지 조건에 의한 simulation을 할 수 없지만 2차원으로 해석할 수 없는 축방향의 3차원 자속 분포, end coil 부분의 자속 분포 및 영향에 대해서 해석하며 분석할 수 있기에 3차원 해석의 필요성과 유용성을 충족시킬 수 있다.

2.1 초전도 발전기의 modeling

2.1.1 전체 사양 및 형상

30 KVA 초전도 발전기의 기본 사양은 3상 4극, 60 [Hz], 1800 rpm, 220 Volt이며, 계자 coil은 532 [turn]으로 권선 되어있으며, 200 [A]의 전류가 인가 된다. 전기자 coil은 60 [turn]으로 권선 되어있다. 해석 model의 단면도는 그림 2.1과 같다.

초전도 발전기에서의 계자 core와 전기자 core재질의

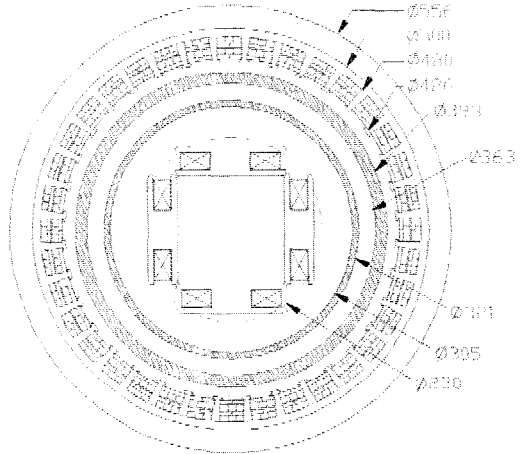


그림 2.1 30 KVA 초전도 발전기의 단면도

투자율은 공기와 같은 값을 가지므로 영역의 구분을 위해 형상을 modelling하였다. shield core의 부분은 비선형 재질을 사용하여 B-H curve를 입력하였으며 B-H의 특성 곡선은 그림 2.2와 같다.

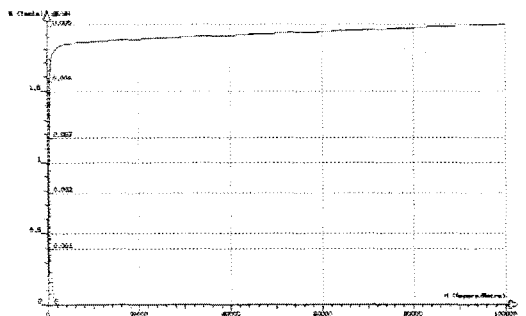


그림 2.2 shield core의 B-H 특성곡선

shield core의 초기 비투자율은 2500이라 가정하였으며, 각 부분의 재질 특성 값들은 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 재질의 특성

구분	재질
계자 core	SUS316
고정자 core	FRP
shield core	S23

해석코자 하는 model은 그림 2.3과 같이 경계조건을 적용하여 전체 형상 중 1/2을 modelling하였으며, 전기자 coil 및 계자 coil의 치수는 그림 2.4에 나타내었으며 전기자 coil의 직선부의 길이는 350 [mm]로 하여 해석하였다.

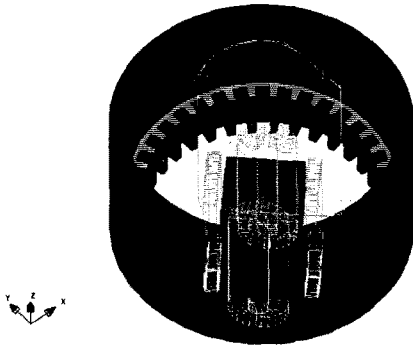


그림 2.3 초전도 발전기의 해석 model

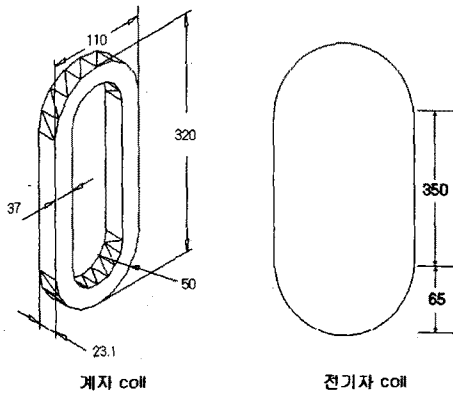


그림 2.4 계자 및 전기자 coil의 치수

2.2 초전도 발전기의 정자계 특성

그림 2.5는 일반 상전도 발전기와는 달리 공극의 크기가 큰 초전도 발전기의 계자 coil에서부터 전기자 coil까지의 공극에서 자속밀도의 평균값을 계산하였으며, 전기자 coil로 가까이 가면서 자속밀도가 작아지며 그래프의 기울기로 보아 계자 중심에서부터 반경(r)에 반비례(1/r)함을 알 수 있고 계산 결과 약 65%의 누설이 발생함을 알 수 있다.

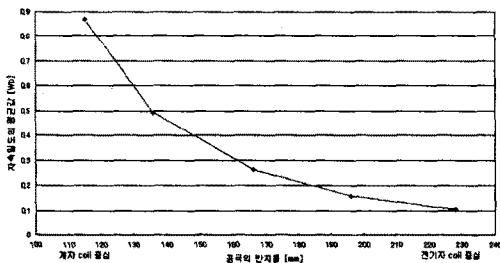


그림 2.5 공극에서의 자속 밀도의 변화

2.3 유기전압 및 고정자 유효길이 산정

2.3.1 유기전압의 계산식

계자 coil에 의한 전기자 coil에 유기되는 전압을 계산하기 위해서 여러 방법을 사용하였으며, 3차원 유한요소법으로 계산된 자속의 값을 가지고 식 2.1에 적용하여 유기전압을 구할 수 있다.

$$e_{\text{peak}} = \omega N \Phi \text{ [V]} \\ = 2\pi f * N * \Phi \text{ (2.1)} \\ (f=60 \text{ Hz, } N=60 \text{ turn})$$

ω : 각속도

N : coil의 turn 수

Φ : coil에 쇄교하는 자속량 [Wb]

식 2.1에서 계산된 값은 1상에 유기된 peak 전압이기 때문에 3상 전체의 실효치 전압은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} * e_{\text{peak}} \text{ (2.2)}$$

2.3.2 유기전압의 계산

유기전압의 계산은 전기자 coil을 여러 가지 형상으로 modelling하여 유기전압을 계산하기에 가장 합리적인 coil의 형상을 찾아 전기자 coil의 최적의 유효길이를 산정할 수 있게 하였다. 각 model의 coil의 형태는 그림 2.6, 2.7, 2.8과 같은 형상으로 modelling 하였다. 그림 2.6은 일반적인 삼각 coil을 modelling한 것이고, 그림 2.7은 실제 구성되어지는 coil의 형상과 가장 유사하게 coil의 end-turn 부분을 round로 처리할 것이다. 그림 2.8은 전기자 coil의 유효길이의 산정을 용이하게 하기 위하여 전기자 coil의 직선길이를 유효길이로 가정하여 직사각형으로 형상화하였다. 계자 coil의 전류는 200 [A]와 일부분의 형상에 175 [A]를 인가하였으며, 각각의 경우의 전기자 coil에 쇄교하는 자속의 값들은 표 2.2에 표시하였다.

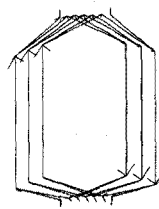


그림 2.6 coil model 1
[3 turn/pole · phase]

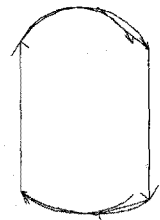


그림 2.7 coil model 2
[1 turn]

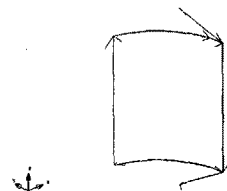


그림 2.8 coil model 3
[직사각형 형태로 가정]

표 2.2 3차원 해석의 자속
계자coil의 전류: 200 [A]

전기자 coil의 형태	자속	단면적	직선부	비교
coil model 1 [3 turn]	0.0259		350	
coil model 1 [1 turn]	0.0090	115619	350	
coil model 2 [1 turn]	0.0094	116109	350	
coil model 2 [1 turn]	0.0082	116109	350	175[A]
coil model 3 [1 turn]	0.0087	97510	350	

표 2.2에 계산된 자속의 값을 식 2.1과 2.2에 적용하여 전기자 coil의 유기전압을 계산한 값을 표 2.3에 명시하였다.

표 2.3 3차원 해석의 유기전압의 계산

전기자 coil의 형태	유기 전압
coil model 1 [3 turn] (그림 2.6)	239 [V]
coil model 1 [1 turn]	249 [V]
coil model 2 [1 turn] (그림 2.7)	259 [V]
coil model 2 [1 turn] (175 A)	227 [V]
coil model 3 [1 turn] (그림 2.8)	241 [V]
2차원 해석 (175 A, 유효길이 : 250 mm)	220 [V]

설계치 : 220 [V] 실험치 : 250 [V]
(계자 전류 : 200 [A])

그림 2.7의 coil을 modelling 하여 200[A]의 전류를 인가한 경우 계산된 유기전압의 값은 259 [V]이며 이때의 유기전압이 실험치인 250 [V]에 가장 근사한 값을 가졌다. 전기자 coil에 175 [A]를 인가한 경우의 유기전압은 227 [V]이며, 이때 175 [A]를 인가한 2차원 해석에서의 유기전압은 220 [V]였다. 3차원 해석과는 약 3 %의 오차가 있으며 오차의 원인은 2차원 해석의 경우 공극자속밀도가 축방향이 중심에서만 계산되며, 3차원 형상으로 보면 가장 높은 부분에 해당되므로 유효길이가 3차원 형상보다 짧게 계산이 된다. 축방향 전체의 공극자속밀도 평균치는 피크 치에 비해서 약 $1/\sqrt{2}$ 이 되므로 3차원 해석시의 유효길이는 2차원 해석 보다 약 $\sqrt{2}$ 배정도 크게 될 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 따라서 2차원 해석에서의 직선길이 250 [mm]와 3차원 해석에서의 직선길이 350 [mm]를 실제로 동일한 값으로 보아도 될 것이다. 본 논문에 적용된 model의 가장 합리적인 coil의 형상 및 turn은 end-turn부분을 round지게 한 1 turn의 형상이 가장 알맞을 것으로 추측되며, 실제 coil의 단면적을 고려하여 end-turn의 arc를 변경한다면 좀더 정확한 유기전압을 구할 수 있을 것이다.

2.3.3 유효길이의 산정

유효길이를 산정하기 위해서는 coil model 2(round

처리된 end-turn)과 coil model 3(직사각형 형태의 coil)의 계산 결과를 이용하여 전기자의 유효길이를 산정하였다. 350 [mm]에서 선형적으로 전압이 변화한다고 하면 그림 2.9와 같이 나타낼 수 있으며, 설계사양의 220 V를 발생시키는 길이는 약 273.08 [mm]로 계산되었다.

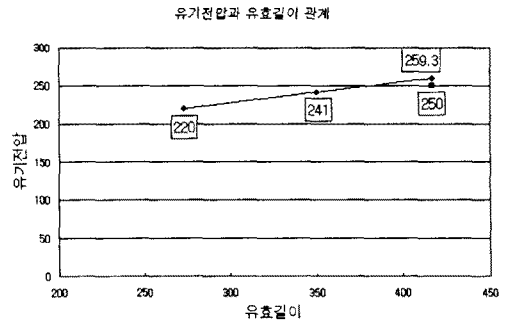


그림 2.9 전기자의 직선길이의 유기전압

3. 결 론

본 논문에서는 30 KVA 초전도 발전기를 3차원 유한요소 해석 tool인 FLUX3D를 이용하여 전기자 coil에 유기되는 전압과 이때 전기자 coil의 유효길이를 산정하기에 알맞은 coil model을 제시하였다.

첫 번째는 전기자 coil을 여러 가지 형상으로 modelling하여 유기전압을 계산하기에 가장 합리적인 coil의 형상을 찾아보았다. 이 중 가장 합리적인 coil의 형상은 coil-end부분을 round 지게 한 1 turn의 형상이었으며, coil의 단면적을 고려하여 arc를 재설정한다면 좀더 정확한 유기전압을 구할 수 있을 것이다.

두 번째는 coil model 2(round 처리된 end-turn*1)과 coil model 3(직사각형 형태의 end-turn)을 선정하여 이 두 coil의 유기전압을 이용한 전기자 coil의 유효길이 산정이다. 설계사양의 정격 전압인 220 V를 얻을 수 있는 coil의 유효길이는 273.08 [mm]로 계산되었으며, 좀더 정확한 유효길이를 산정하기 위해서는 coil 2 형태에서 arc와 쇄교면적을 고려하여 계산한 후 유효길이를 산정하면 더 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

앞으로의 연구는 지금까지의 연구를 토대로 1 MVA 초전도 발전기에 알맞은 coil을 선정하여 유기전압과 고정자 coil의 유효길이를 산정하여 최종 설계안에 반영되도록 하는 것이며, 계자 전류와 유효길이와의 관계, 유효길이의 산정 실험식, coil 간의 여러 가지 인덕턴스 계산 등의 연구를 수행해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이종혁 외, "3차원 유한요소 프로그램을 이용한 30 KVA 초전도 발전기의 전자기장 특성 해석", 대한 전기 학회 학계학술대회, p250-253, 1998년
- [2] 하경덕 외, "개방회로 및 단락회로 특성시험을 이용한 30 KVA 초전도 발전기의 특성분석", 춘계합동학술 발표회 논문집, 1999
- [3] A. E. Fitzgerald 외, "Electric Machinery", McGraw-Hill, Fifth Edition, 1992