

10MW급 초전도풍력발전기용 최적설계 및 계자코일 원천기술 개발

조영식¹, 김호민², 고태국³, 윤용수⁴

¹한국전기연구원, ²제주대학교, ³연세대학교, ⁴신안산대학교

1. 서 론

세계적으로 연간 풍력발전 설치량은 2011년 6% 성장했으며, 최근 15년간 평균성장률 27.5% 성장하고 있다 [1]. 2012년부터 해상풍력 시장은 본격적인 성장이 시작되고 있으며, 유럽 및 미국 등 자국산업 육성을 위해 해상풍력에 대한 정책 지원 확대할 전망이다 [2]. 이와 관련하여 풍력발전기의 용량을 증대하기 위한 연구가 세계적으로 진행되고 있으며, 대표적으로 UpWind program은 EU의 the Sixth Framework Programme의 지원을 받아 DTU의 Riso National Lab.이 주관으로 SIEMENS, GL Garrad Hassan, DONG energy power 등 풍력기술에 있어서 세계적인 기관이 망라되어 참여하였다 [3]. 연구내용은 한기당 용량을 얼마나 크게 할 수 있는가에 목표를 두고 발전기의 용량, 블레이드 등 풍력발전기 한기에 대한 이론적인 접근한 결과, 20MW가 가능하며 초전도풍력발전기가 유력한 대안으로 결론을 내렸다. 2012년 현재, UpWind 프로그램의 후속 과제라 할 수 있는 InWind program을 추진 중에 있으며, 연구내용으로 초전도풍력발전기 시험기를 개발하는 내용이 포함되어있다. 이외에도 ARPA-E (Advanced Research Projects Agency-Energy) 프로그램은 2010년부터 미국 DOE(Department of Energy)의 지원을 받아서 초전도풍력발전기 연구개발을 하고 있으며, GE wind에서도 NbTi 저온초전도선을 사용하여 10MW 초전도풍력발전기 설계결과를 2012년에 발표하였다 [4].

국내에서는 초전도풍력발전기 개발은 없었으나 교과부의 21세기프론티어연구개발사업 중 하나인 차세대초전도응용기술개발사업으로 지원받아서 초전도모터 개발이 10여년 동안 이루어졌다 [5].

우리나라는 2011년 12월부터 지경부의

지원을 받아서 풍력용 초전도발전기의 원천기술을 개발하는 사업이 시작되었다. 연구기간은 2년으로 2013년 11월까지이며, 한국전기연구원이 주관으로 제주대학교, 연세대학교, 신안산대학교가 참여기관이다. 본 연구개발 사업은 10MW급 대용량 초전도풍력발전기의 핵심기술인 전자기설계, 계자코일, 냉각시스템의 원천기술을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 10MW 초전도풍력발전기 설계

2.1 3차원 해석프로그램 개발

대부분의 초전도 회전기는 자기철드를 제외하고는 비자성체를 사용하는 공심형의 구조를 가지고 있다. 따라서 자기철드의 투자율을 표면자하로 바꾸면 다음과 같이 해석적 방법으로 자계를 구할 수 있다.

그림 1은 초전도 회전기의 구조를 자기철드와 계자코일만 단순하게 묘사한 것이다. 준정상 자계의 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad \mathbf{J} = k \mathbf{E} \quad (2)$$

만일 와전류가 유도되지 않는다면 식 (2)는 무시된다. 따라서 전체 자계는 전류에 의한 자계와 자화된 철심에 의한 자계를 중첩의 원리를 이용해서 더하여 구할 수 있으며 식(3)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_j + \mathbf{H}_m \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{H}_m = -\nabla \phi_m$ 이다.

우변의 첫 번째 항은 Biot-Savart의 법칙을 이용해서 구할 수 있고 우변의 두 번째 항은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.



그림 1. 초전도 발전기의 개략적인 구조.

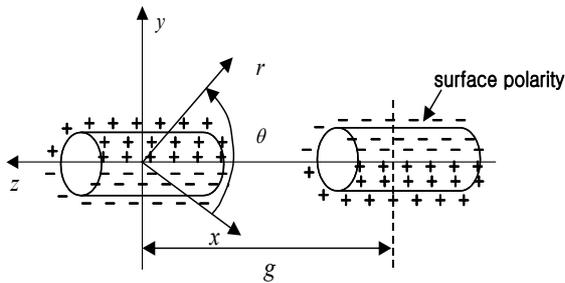


그림 2. 표면자하의 분포.

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \phi_m) = \nabla \cdot (\mu) \mathbf{H}_J + \mu \nabla \cdot (\mathbf{H}_J) \quad (4)$$

즉 자기 스칼라 포텐셜은 투자율의 변화가 있는 경우에만 값을 가지므로 자기철드의 자기포화가 없는 경우에는 내면에만 존재함을 의미한다.

자기철드가 단순한 모양의 동심 관 형상을 가지므로 표면자하를 수학적으로 표현할 수 있으며, 축 방향의 표면자하는 실제 유한하지만 무한히 긴 주기분포를 가진다고 가정하고 푸리에 급수(fourier transform)로 정리할 수 있다. 여기서 다음 주기와의 거리는 연속해서 존재하는 다른 자기철드에 의한 영향을 무시할 수 있도록 충분히 크게 하여야 한다. 그림 2는 이러한 표면자하의 분포를 도식화한 것이다.

전 해석영역에서 $\nabla^2 \phi = 0$ 이므로 표면자하는 경계조건으로 구할 수 있다. 원통좌표계에서 자기 스칼라 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

식(5)의 해를 풀면, 스칼라포텐셜 $\phi(r, \theta, z)$ 는 다음과 같다.

$$\phi = \cos(p\theta) \cdot \left\{ \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[AI_p \left(\frac{n\pi r}{g} \right) + BK_p \left(\frac{n\pi r}{g} \right) \right] \cdot \cos \frac{n\pi}{g} z \right\} \quad (6)$$

여기서, p 는 극쌍수, g 는 축 방향 주기, r 은 반경을 나타내며, 임의의 상수 A, B 는 경계조건에서 구한다. 자기철드의 내 반경 R_i 라 할 때, $r < R_i$ 에서는 $B = 0$ 이고, $r > R_i$ 에서는 $A = 0$ 이다. 따라서, 자화된 철심에 의한 자계는 식 (7)과 같다.

$$\mathbf{H}_m = -\nabla \phi = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (7)$$

그러므로, 경계조건을 풀어 라플라스 방정식의 일반해에서 상수를 결정하면 \mathbf{H}_m 을 구할 수 있고 계자코일에 의한 자계와 중첩하여 전체 자계의 분포를 구할 수 있다.

그림 3은 초전도회전기의 3차원 FEM 해석모델의 요소분할도를 나타낸다. 초전도회전기는 공심형 구조로 아래와 같이 매우 단순한 형상으로 3차원 FEM 해석을 위한 모델링이 가능하다. 초전도회전기의 자기적인 대칭성을 고려하여 1/16을 해석모델로 선정하였다.

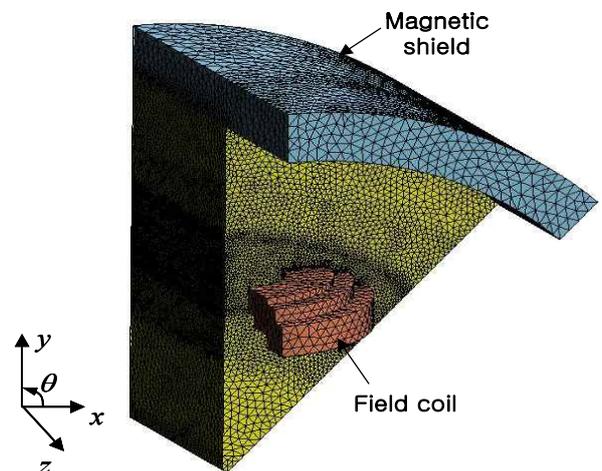


그림 3. 3차원 FEM의 요소분할도.

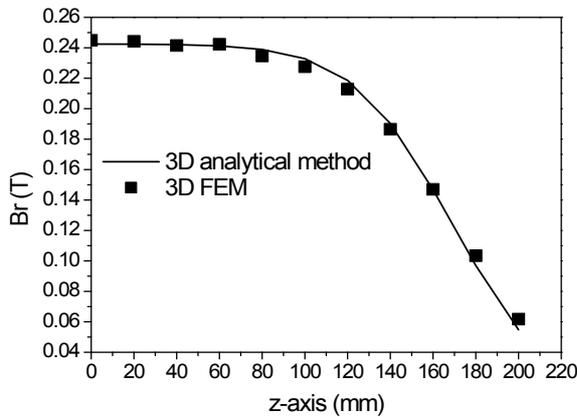


그림 4. 3차원 FEM과 해석적 방법에 의한 계산결과 비교.

그림 4는 B_r 의 최대값이 발생하는 $\theta = 90$ (deg.)에서 z 축 방향 변화에 따른 B_r 의 분포를 나타낸다. 초전도회전기의 자계분포는 z 축 방향으로 저감하는 특성을 나타내며, 3차원 FEM과 해석적 방법의 결과를 비교하면 약 2 (%) 정도의 차이로 매우 유사하였다.

3차원 FEM의 경우에 전체 해석시간은 약 16시간이 소요되며, 특히 초전도 코일의 층 간의 절연층을 묘사하여 정밀한 해를 구하는 것이 매우 힘들지만, 해석적 방법의 경우는 쉽게 층 간의 절연층을 묘사할 수 있으며 약 5분 정도의 해석시간으로 결과를 확인할 수 있었다.

2.2 10MW 초전도풍력발전기 설계 결과

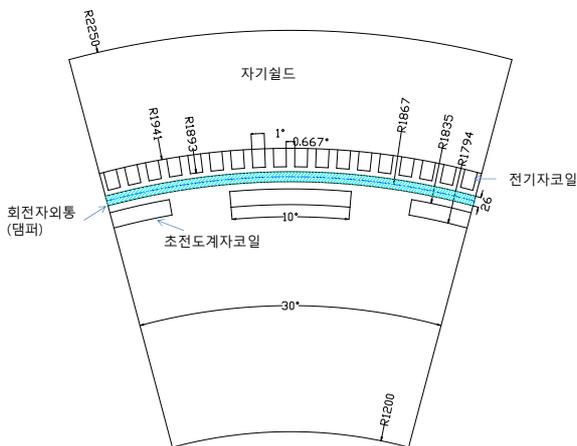


그림 5. 10MW 초전도풍력발전기 설계 단면도.

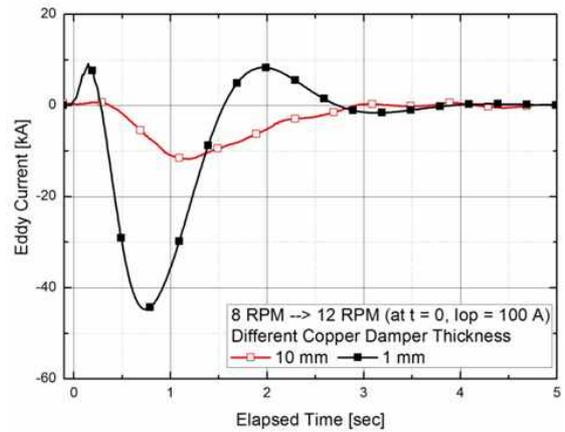


그림 6. 두께가 다른 댐퍼의 과도상태에서 계자코일에 유기되는 전류.

그림 5는 10MW 초전도풍력발전기의 설계단면도를 보여준다. 공심형 동기기로 설계하였으며, 초전도선의 사용량을 줄일 수 있는 방향으로 설계하였다.

FEM을 사용하여 플럭스댐퍼의 특성을 해석할 수 있는 기법을 개발하였으며, 그림 6과 같이 초전도풍력발전기 플럭스댐퍼의 전자기 특성을 분석하였다.

3. 계자코일 권선법 연구

3.1 계자코일용 초전도선 특성 평가

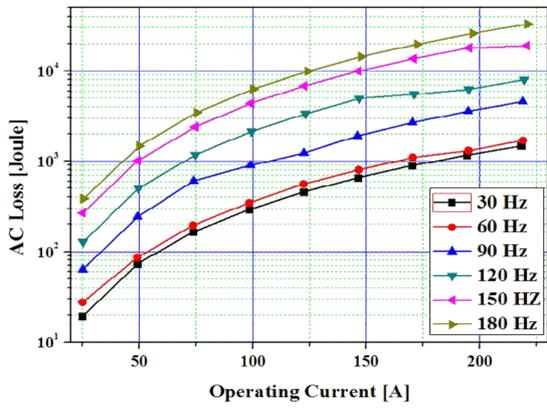
상용화된 고온초전도 (HTS) 선재에 대한 임계전류 특성 평가를 수행하였다. 77K 액체질소 냉각 및 self-field 조건에서 Superpower사의 SCS12050-AP선재와 AMSC사의 Amperium선재가 가장 높은 임계전류를 갖는 것으로 나타났으며, 이에 따라 해당 선재에 대해서 외부 자장 및 동작 온도에 따른 임계전류 특성, 교류손실 및 과전류 특성, 접합길이 및 접합압력 등에 따른 접합특성 평가 연구를 수행하였다.

그림 7은 절연한 것과 절연을 하지 않은 코일의 교류손실 특성을 나타낸다. 절연을 하지 않은 코일의 교류손실이 적음을 알 수 있다.

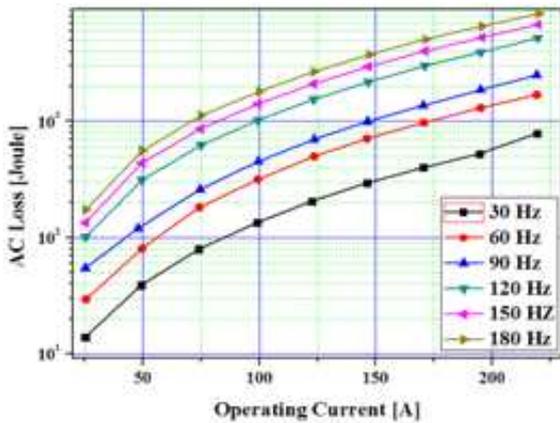
3.2 시험용 초전도계자코일 제작 및 평가

그림 8은 시험용 초전도 계자코일의 제작된 사진이다.

제작된 초전도 계자코일의 사양은 표1과 같다.



(a) Insulation 코일



(b) No-insulation 코일

그림 7. Insulation과 No-insulation 코일의 교류손실 특성.

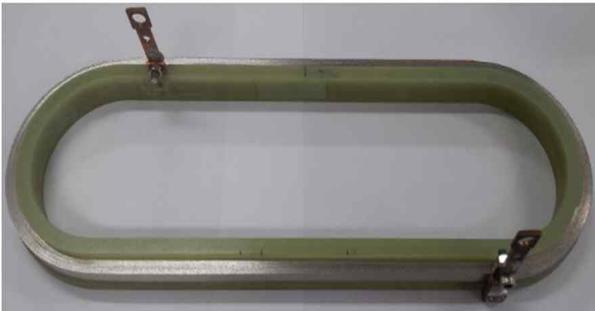


그림 8. 시험용 계자코일 제작사진.

표 1. 시험용 계자코일 사양.

분류	
초전도선	Amperium 12mm
턴수	40턴
초전도선 사용량	42m
운전전류	100A

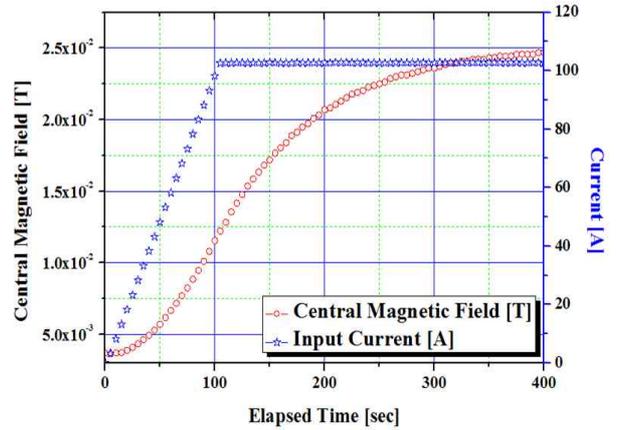


그림 9. 운전전류에 따른 중심자장 측정결과.

그림 9는 시험용 초전도 계자코일의 운전 전류에 따른 중심자장의 특성을 보여준다. 절연을 하지 않은 것으로 time-delay가 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 극저온 냉각장치 핵심기술 개발

초전도회전기용 냉각시스템은 크게 자연대류순환 냉각방식과 강제순환 냉각방식이 활용되고 있다. 본 연구에서는 냉각방식에 관계없이 냉동기의 전원공급이 중단되거나 냉동기 고장으로 인한 풍력발전기 가동 중단을 최소화 하기 위해 열 개폐스위치라는 새로운 기술을 이용한 고신뢰성의 냉각장치를 개발하는 것이 목표이다.

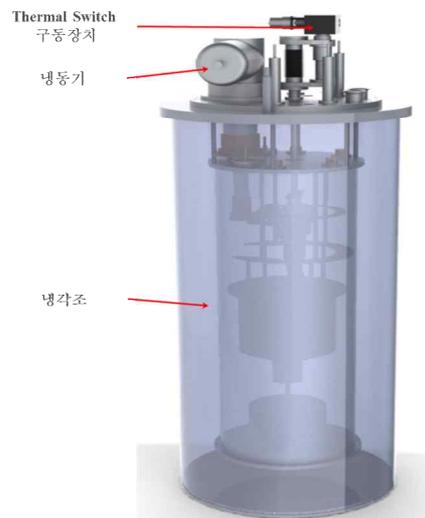


그림 10. 시험용 극저온 냉각장치 설계 결과.



그림 11. 시험용 극저온 냉각장치.

전류리드, 토크듀브 등에서의 열 손실량을 계산하여 냉각시스템용 열전도 개폐스위치를 설계하였다. 그림 10은 시험용 냉각장치 시스템의 설계결과를 보여준다.

그림 11은 초전도풍력발전기에 적용성을 시험하기 위해서 제작된 열전도 개폐스위치가 포함된 극저온 냉각장치를 보여준다.

5. 결론 및 향후 추진계획

본 연구개발 과제의 1차년도에서는 10MW 초전도풍력발전기의 특성평가 및 자기회로 설계, 계자코일 권선법 연구 및 냉각시스템 제작을 완료하였다.

2차년도에서는 풍력발전기에 적용할 수 있는 새로운 모델 설계 및 특성평가결과를 도출하고, 계자코일 상세설계 및 보호기술, 그리고 냉각시스템 특성평가를 결과를 토대로 10MW 대응량에 적용방안을 도출할 계획이다.

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원의 신재생에너지기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것입니다.(20113020020020)

참고문헌

- [1] GWEC, Global Offshore, Current Status and Future Prospects, Oct. 2012.
- [2] 2012년 풍력산업동향 및 전망, 한국수출입은행 해외경제연구소.
- [3] UpWind program, March, 2011.
- [4] Superconductivity for Large Scale Wind Turbines, DOE report, 2012.
- [5] 차세대초전도응용기술개발사업단 최종보고서, 교육과학기술부, 2011.

저자이력



조영식 (曹永植)

1970년 08년 20일생, 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 2002년~2003년 창원대학교 시간강사, 2003년~2004년 Kyoto 대학교 Post-doc., 2004년~2011년 차세대초전도응용기술개발사업단 기술팀장, 2011년~현재 한국전기연구원 선임연구원.



김호민 (金鎬民)

1970년 8월 23일 생, 2002년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(박사), 2002년~2004년 M.I.T Francis Bitter Magnet Lab. Post-Doc toral Research Associate, 2004년~2006년 LG산전(주) 전력연구소 선임연구원, 2006~2011년 한국전기연구원 초전도 연구센터 선임연구원, 현재 제주대학교 전기공학과 조교수.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (M.SC). 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (Ph.D). 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008~2010년 한국초전도·저온 공학회 회장, 현재 연세대 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장.



윤용수(尹庸銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 1985~1998년 대우전자(주) 개발팀장, 현재 신안산대학교 전기과 부교수.