

## 회전전자형 고온초전도 발전기의 이중계자 권선 개념 설계

박상호\*, 김영일\*, 이세연\*, 이지영\*, 김우석\*, 이지광\*\*, 최경달\*  
 한국산업기술대학교\*, 우석대학교\*\*

### Dual Field Coils Conceptual Design of Rotating Armature type High Temperature Superconducting Generator

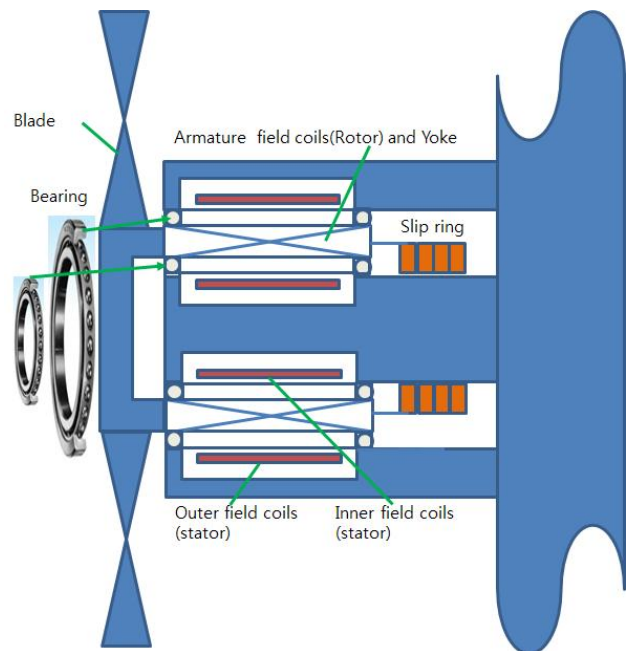
Sang Ho Park\*, Yungil Kim\*, Seyeon Lee\*, Ji-Young Lee\*, Woo-Seok Kim\*, Ji-Kwang Lee\*\*, Kyeongdal Choi\*  
 Korea Polytechnic University\*, Woosuk University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 회전전자형 고온초전도 발전기의 이중 계자를 제안하고 설계를 하였다. 기존의 동기발전기는 회전자가 계자이지만, 본 논문에서는 전기자를 회전자로 설계하였다. 고정자인 계자는 전기자의 내측과 외측에 위치하게 설계하여 이중계자라고 하였다. 초전도 선재는 제조사에 의해 규격이 정해져있다. 계자에 대전류를 사용하기 위해서는 적층등의 방법들이 있다. 적층하여 구리 권선으로 계자를 권선시 저항과 인덕턴스의 불균등을 제거하기 위하여 구리 권선을 일정한 간격으로 위치를 변환시키는 전위의 방법이 사용된다. 하지만 초전도 선재의 경우는 꺾기, 비틀기등의 방법이 불가능하므로 이 방법을 사용할 수 없다. 그래서 선재를 편칭하여 선재를 전위시키는 CTCC(Continuously Transposed Coated Conductors) 등의 방법을 사용한다. 본 연구에서는 CTCC 형태의 초전도 권선을 사용하여 기본 모델과 이중계자 권선을 설계하고 특성을 비교하였다. 초전도 선재를 적층하여 사용함으로써 계자부의 면적은 증가하지만 인덕턴스, 길이등의 불균등을 제거할 수 있으며 적층 선재수가 증가할수록 계자부 면적은 감소하는 장점이 발생한다.

면적도 감소한다. 그러나 현재의 기술은 실험실에서 제작하는 수준으로 20가닥을 꼬아서 만든 CTCC 선재가 가능하다. 이 경우 계자권선이 차지하는 면적이 20% 증가하게 된다. 40가닥의 CTCC 선재를 적용할 경우 면적의 증가는 10%로 감소하게된다.

### 1. 서 론

풍력발전은 원자력의 의존도를 줄이고 이산화탄소를 발생시키지 않는 이상적인 에너지원이다. 현재의 풍력발전기는 높은 자기장을 얻기위하여 철을 사용함으로써 부피는 크고 중량은 무겁고 철심의 자기포화등으로 인하여 대형화에 한계에 있다. 기존의 철심 코어를 제거한 에어코어 방식과 회전자인 계자를 초전도 선재로 대체하는 회전계자형 초전도풍력발전기 연구가 진행중이다[1]. 대부분의 초전도 풍력발전기 연구는 기존의 풍력발전기의 코어에 철심을 사용하지 않고 초전도 계자 코일을 냉각 장치와 함께 회전하는 방식이었다. 그림 1과 같은 이중 계자를 갖는 회전 전자형 풍력발전기는 전기자가 회전하고 내측과 외측의 계자는 회전하지 않는다[2].



<그림 1> 이중계자를 갖는 회전전자형 풍력발전기 개요도

초전도 선재는 구리선에 비하여 대전류를 통전할 수 있지만 초전도 선재 한가닥이 흘릴 수 있는 전류량은 선재 폭과 임계전류로써 한정되어 있다. 대전류를 통전시키기 위해서는 여러가닥의 선재를 적층하는 방법등을 사용한다. 구리선의 경우는 저항과 인덕턴스, 길이등의 불균등을 제거하기 위하여 구리선을 일정한 간격으로 꺾기등을 통하여 위치를 변경시키는 전위의 방법을 사용하지만 초전도 선재의 경우 꺾거나 비틀기 등이 불가능하므로 위의 방법을 사용할 수 없다.

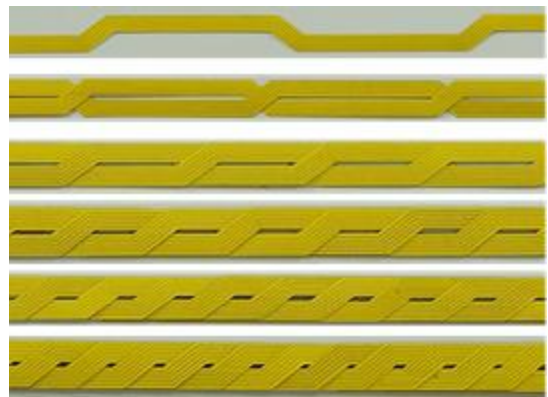
본 연구에서 기본모델과 이중 계자의 권선방법을 초전도 선재를 편칭한 후 이를 꼬아서 사용하는 CTCC 형태의 권선으로 계자권선을 설계하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 구조

그림 1과 같이 풍력발전기의 내측 계자와 외측 계자는 오른쪽의 지지물에 고정되어 있으며 이곳에서 전류와 냉각에 필요한 선로들이 냉각장치를 고정하고 있는 내함, 외함을 통해 공급받는다. 전기자는 계자의 내함과 외함과는 베어링으로 접속되어 있어 회전하게 된다. 그림 1의 왼쪽처럼 전기자 외함과 풍력발전기 날개가 연결되어 회전하여 풍력에너지를 전기에너지로 변환시키게 된다. 전기자에 발생된 전압은 슬립링을 통하여 발전기 후단으로 에너지를 전달하게 된다.

그림 2는 본 연구진에서 개발한 CTCC 선재로써 구리선의 전위 방법을 초전도 선재에 적용한 연구이다. CTCC 선재로 권선할 경우 적층 선재들간의 길이의 차이와 선재별 인덕턴스 불균일 등을 제거할 수 있다. 그림 2의 제일 위의 1가닥 권선은 12mm 폭의 초전도 선재를 편칭하여 제작한다. 이것을 기본으로 그림 2의 위에서부터 1가닥, 2가닥, 4가닥 8가닥, 12가닥 16가닥을 꼬아서 제작할 수 있다. 대전류를 흘리기 위해서는 CTCC의 가닥수가 증가시키면 된다. 적층수가 많아질수록 대전류를 흘릴수 있고 CTCC 선재를 제작함으로써 인한 계자권선이 차지하는



<그림 2> CTCC 선재

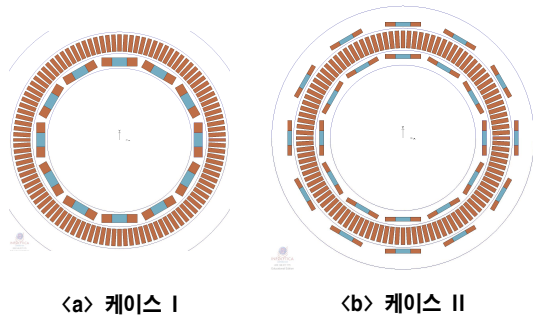
#### 2.2 설계 사양

표 1은 계자권선에 CTCC를 적용한 10MW급 고온초전도 발전기의 기본 설계 사양이다. 계자권선에 CTCC를 적용할 경우 계자권선이 차지하는 면적이 20%증가하게 된다. 계자의 면적이 증가함으로써 계자권선의 전류밀도는 20% 감소한다. 계자권선은 권선이 증가하는 방향인 원주방

향으로 20% 증가하여 길이가 126 mm에서 150 mm로 증가하였으며, 반경방향은 CTCC를 적용하지 않았을때와 동일하다.

**<표 1> 10MW급 고온초전도 발전기 기본 설계 사양**

파라미터	value
고온초전도 계자권선	
극수	12
전류밀도 [A/m <sup>2</sup> ]	1.4 X 10 <sup>8</sup>
운전온도 [K]	20
권선 크기 [mm] X [mm]	150 X 126
유효길이 [mm]	1500
최대 자속밀도 [T]	10.4
에어갭 자속밀도 [T]	2 ~ 3.5
전기자 권선	
극수와 상단 슬롯수	3
슬롯당 도체수	12
구리의 전류밀도 [A/m <sup>2</sup> ]	3
도체 크기 [mm] X [mm]	25 X 24
슬롯 크기 [mm] X [mm]	60 X 250



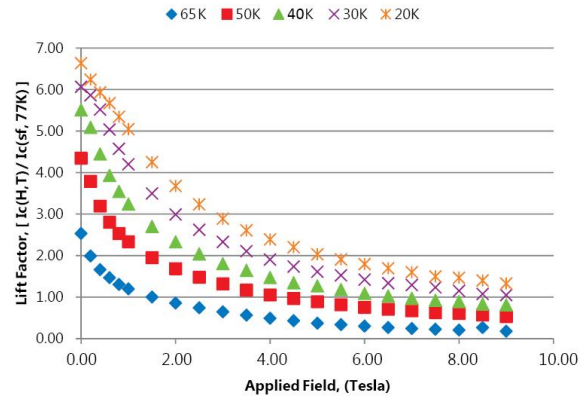
**<그림 3> (a)기본 모델 (b)이중계자 회전전자자형 초전도발전기**

표 1에 제시한 모델을 기본모델로 그림 3(a)와 같이 케이스 I으로 하고, 이중계자를 갖는 회전전자자형 초전도 발전기를 그림 3(b)와 같이 케이스 II로 설계하였다. 초전도 선재의 사용량은 동일하게 설계하였다. 기본모델의 내측 계자 권선의 초전도 선재의 절반을 외측 계자권선을 배치하였다. 이렇게 설계할 경우 전자 권선의 반경방향의 자기장은 평균적으로 증가하여 출력전압이 증가한다. 계자권선부의 최대 자기장과 수직자기장은 감소함으로 더 많은 전류를 흘릴수 있다.

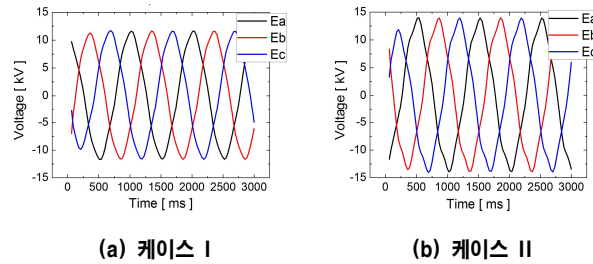
**2.3 결과**

케이스 I과 케이스 II를 수치 해석한 결과 케이스 I의 계자권선의 수직자기장의 최대값이 7.58[T]로 계산되었고, 케이스 II의 내측 계자권선의 최대값은 4.78 [T], 외측 계자권선의 최대값은 4.87 [T]로 계산되었다. 그림 4에서 케이스 I의 경우는 20 [K]에서는 77[K] self field 에서 임계전류보다 1.5배 전류를 흘릴 수 있으며, 케이스 II의 경우는 77[K] self field에서 임계전류 보다 2.0배의 전류를 흘릴 수 있다[3]. 즉 케이스 I보다 케이스 II가 전류를 25[%]이상 더 흘릴 수 있다. 기자력이 같을 경우, 턴수를 25% 감소시킬 수 있으므로 선재의 사용량은 턴수가 감소와 비례하여 사용량을 25[%]이상 줄일 수 있다. 같은 기자력을 발생시키기 위하여 케이스 I의 경우 325 [A], 8400턴이 필요하지만, 케이스 II의 경우 전류를 406 [A]를 흘릴 수 있으므로 6720턴으로 가능하다. 초전도 선재로 계산하면 기본모델은 537.8 [km]가 필요하지만 이중계자방식은 415.1 [km]로 23[%]의 초전도 선재를 절감할 수 있다.

케이스 I의 경우 전자 중심에서의 자속밀도가 2.31 [T]로 계산되었다. 케이스 II는 전자 중심에서의 자속밀도가 2.75 [T]로 계산되었다. 전자에서 발생하는 유도기전력과 자속밀도는 비례하므로 그림 5와 같이 케이스 I에 비하여 케이스 II가 20[%]의 출력전압이 높으며, 출력전류가 같을 경우 출력은 전압에 비례하므로 케이스 I에 비하여 케이스 II가 출력이 20[%] 높은 출력을 얻을 수 있다.



**<그림 4> 외부인가자기장에 대한 온도별 임계전류와 77[K], self field에서의 임계전류의 비**



**<그림 5> 출력전압**

**3. 결 론**

본 연구에서는 제한한 이중계자를 갖는 회전전자자형 고온초전도 발전기의 계자부분을 교류손실을 감소시킬수 있고, 전위시켜서 인덕턴스와 선재의 길이를 분균일을 제거할 수 있는 CTCC 선재를 사용하여 설계하고 기본 모델과 비교하였다. 본 논문에서 제시한 이중계자방식의 경우 기본모델에 비하여 수직자기장이 25% 감소되므로 25%의 전류를 더 흘릴 수 있다. 기본모델의 경우 325 [A] 8400턴이 필요하지만 이중계자방식은 406 [A]를 흘릴 수 있어서 6720턴으로 가능하다. 초전도 선재의 사용량은 턴수가 감소로 인한 감소분과 반경의 감소분을 반영하면 25[%] 이상 줄어들게 된다. 초전도 선재의 감소는 제작단가의 감소와 권선부의 부피도 감소되는 장점이 있다. 추후 풍력발전기의 대형화를 위한 전자 권선을 초전도 선재로 사용하는 전초전도 풍력발전기의 연구를 진행할 것이다.

**감사의 글**

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A2058788)

**[참 고 문 헌]**

[1] S. Fukui, J. Ogawa, Takao Sato, O. Tsukamoto, N. Kashima and S, Nagaya, "Study of 10 MW-Class Wind Turbine Synchronous Generators With HTS Field Windings", IEEE TRANS. ON APP. SUPERCON., Vol. 21, No. 3, pp. 1151-1154, 2011

[2] 최경달, 박상호, 김영일, 이세연, 이지영, 김우석 and 이지광, "이중계자 권선을 갖는 회전전자자형 풍력발전기의 계자권선 설계", 2014년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문화 추계학술대회 논문집, 시흥, 경기도, 대한민국, 2011.

[3] SuperPower-inc homepage. [Online]. Available: [http://www.superpower-inc.com/system/files/SP\\_2G+Wire+Spec+Sheet\\_2014\\_web\\_v1\\_0.pdf](http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_2014_web_v1_0.pdf)