



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

풍력단지 변동출력 보상용 1 MJ급
SMES의 설계 및 운전특성 해석

濟州大學校 大學院

風力工學部 風力電氣·制御시스템專攻

朴 士 日

2015 年 2 月

풍력단지 변동출력 보상용 1 MJ급 SMES의 설계 및 운전특성 해석

指導教授 金 鎬 民

朴 士 日

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 2 月

朴士日의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 世 鎬



委 員 李 開 明



委 員 金 鎬 民



濟州大學校 大學院

2015 年 2 月

A Study on the Design and Characteristic
Analysis of the 1 MJ Class SMES for Variable
Electric Power Compensation of Wind Farm

Sail Park

(Supervised by professor Ho Min Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

MAJOR OF WIND POWER ELECTRICITY AND CONTROL
SYSTEM ENGINEERING
FACULTY OF WIND ENERGY ENGINEERING

2015. 2.

목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
SUMMARY	vi
1. 서 론	1
1.1 연구배경	3
2.2 연구목적 및 내용	4
2. SMES 시스템(1 MJ) 설계	5
2.1 SMES의 원리	5
2.2 마그넷 형상 최적화 설계	8
2.3 마그넷 3차원 전자장 해석	19
2.4 SMES 시스템 구조 설계	25
3. 풍력단지 출력보상용 SMES 시스템 운전특성 분석	27
3.1 충방전 특성 분석	28
3.2 교류손실 분석	33
3.3 열적 안정도 분석	42
4. 결 론	48
참 고 문 헌	51

그림 목 차

Fig. 1 Positioning of energy storage technologies	2
Fig. 2 Global annual installed and cumulative installed wind capacity	3
Fig. 3 Critical surface of the superconductivity	6
Fig. 4 Structure figure of superconducting coil	6
Fig. 5 Schematic diagram of SMES system	7
Fig. 6 Types of superconducting wires	8
Fig. 7 Structure of the 2G HTS conductor	11
Fig. 8 Anisotropic characteristic of 2G HTS wire	10
Fig. 9 Shape of the SMES magnet (a) Multiple pancake, (b) Toroid	11
Fig. 10 In-field property of REBCO wire ($B_{\perp} - I_c$)	12
Fig. 11 Geometric parameters of the single pancake coil	13
Fig. 12 Geometric parameters of the multiple pancake coil	14
Fig. 13 Method for analyzing the inductance pattern of pancake coil	16
Fig. 14 Results of inductance pattern of multiple pancake coil	16
Fig. 15 The total length of superconducting wire in terms of optimal shape ratio at each inner radius	18
Fig. 16 Magnetic flux density distribution at the SMES magnet	20
Fig. 17 The magnetic flux density distribution in the perpendicular direction at the SMES magnet	20
Fig. 18 Stability according to the magnetic field in the under perpendicular direction the variable cooling temperature conditions	21
Fig. 19 The magnetic flux density distribution in the parallel direction at the SMES magnet	22
Fig. 20 Distribution of electromagnetic force at the SMES magnet	22
Fig. 21 Conceptual design of the 1 MJ SMES magnet	23
Fig. 22 Basic conceptual design of the 1 MJ SMES system	26
Fig. 23 Comparison of EES's output according to the charging and discharging velocity	28
Fig. 24 Block diagram of the wind power system with EES	29
Fig. 25 Simplified wind farm model as current source	30
Fig. 26 Control method to compensate the fluctuation output	30

Fig. 27	Current requirements at each instantaneous time to compensate the wind farm	32
Fig. 28	Comparison of the output power of the grid with SMES and without SMES	32
Fig. 29	Current variation at an unit SMES system	32
Fig. 30	Section positioning to analysis magnetization loss of the SMES coil	35
Fig. 31	Section positioning to analysis eddy current loss and total eddy current loss of adjacent parts of SMES magnet	37
Fig. 32	Eddy current density distribution calculated at the center ring part	38
Fig. 33	Eddy current density distribution calculated at the cooling plate part	38
Fig. 34	Eddy current density distribution calculated at the conduction bar	39
Fig. 35	Ohmic loss distribution at adjacent parts of SMES magnet	39
Fig. 36	Modeling to analysis the slitting effect in the cooling plate	41
Fig. 37	Comparison of total eddy current losses of adjacent parts of SMES magnet with slit and non slit model	41
Fig. 38	Modeling to compute the thermally conduction and radiation losses	42
Fig. 39	Temperature distribution of the SMES system during the operation of 1 MJ class SMES magnet	45

표 목 차

Table 1 Specifications of the 2G HTS wire	9
Table 2 Shape ratio distinguished by a difference of the inner radius	17
Table 3 Maximum lorentz force density each layer of the SMES magnet	23
Table 4 Specifications of the 1 MJ class SMES system	24
Table 5 Maximum magnetic flux density in the perpendicular direction and the critical current density of each coil	36
Table 6 Eddy current losses of each component parts	40
Table 7 Generating losses during the operation of SMES	44

SUMMARY

In wind power farm, the output fluctuation is strongly influenced by the change of weather condition. In case of the wind power energy output exceeds the critical margin of the total power generation sources ($\pm 10\%$), it will surely disturb the stability of the electric power system, as a result, the electric power system's quality will be debased. In consequence of this reason, the research has focused on improving the performance of wind power energy output by compensating the fluctuation power. It means the output energy will be emitted or absorbed by electrical energy storage (EES) whenever it is either insufficient or superfluous, respectively.

Among various kinds of EES, Superconducting magnetic energy storage (SMES) is widely used nowadays since it can quickly charge and discharge high density energy. It also has a very profitable performance to compensate the output energy fluctuation because of surpassing charging and discharging characteristics. However, the current variation of superconducting magnet, which is generated during charging and discharging period, will provoke electromagnetic losses. These losses is composed by the two main losses: magnetization loss within superconducting wire and eddy current loss in the surrounding metallic components. They finally lead to the heat disturbance which is a decisive effect on SMES stability performance when SMES operates in cryogenics condition. In this paper, the optimal design of HTS magnet for 1MJ SMES system was carried out. The electric power output fluctuation in wind farm was effectively improved by applying SMES system application instead of conventional EESs. Moreover, the electromagnetic losses in SMES were calculated in term of numerical analysis method with current variation, and thermal characteristic of SMES was also analyzed by using 3D finite-element analysis (3D FEA).

1. 서 론

1.1 연구배경

1.1.1 초전도 자기에너지 저장장치

우리 주변의 물질들은 모두 고유의 전기저항을 가지고 있다. 전기저항의 값이 크면 동일전압에서 통전되는 전류가 감소하게 되며 이는 단위 체적에서의 에너지 밀도 감소 및 저항손실의 증가를 의미한다. 이는 대규모의 전력을 전달하는 전력설비의 측면에서는 에너지의 손실이 되어 전력설비의 효율을 감소시키는 주요 원인이 된다.

현재까지 광범위하게 사용되고 있는 구리 혹은 알루미늄 합금 소재로 제작된 전력설비는 인구밀집 지역 혹은 산업화지역에서 요구되는 고밀도의 에너지를 공급하는데 한계에 도달한 것으로 분석됨에 따라 전 세계적으로 소재의 개선을 통해 에너지 손실을 감소시키기 위한 연구가 진행되고 있으며 이러한 일환 중 하나로 초전도체를 이용한 기술에 대한 연구가 각광을 받고 있다. 초전도체는 특정 조건에서 전기적 저항이 0이 되어 에너지밀도를 매우 높일 수 있어 전기적 손실을 크게 감소시킬 수 있으며 고밀도, 고효율, 장시간 수명을 지닌 기기를 구현할 수 있어 전력 설비의 효율개선을 위해 매우 적합한 소재로 주목받고 있다 [1][2].

초전도체로 권선된 코일에 전류를 통전하고 폐회로를 구성하면 자기에너지 형태로 에너지를 저장할 수 있어 에너지 저장장치(EES: Electric energy storage)로의 활용이 가능하며 이러한 초전도 자기에너지 저장장치(SMES: Superconducting magnetic energy storage)는 다른 에너지 저장 매개체로의 에너지 변환과정 없이 전류형태로 에너지의 전달이 이루어지기 때문에 매우 빠른 속도로 대전력을 효율적으로 전달할 수 있으며 저항에 의한 소손이 없어 반영구적인 수명을 가진다. 미국 에너지성 (DOE: Department of energy)에서 발표한 보고서에 따르면 Fig. 1과 같이 단주기의 대전력을 빠르게 보상해야 하는 EES로 SMES가 적합한 것으로 분석되어 있다 [3].

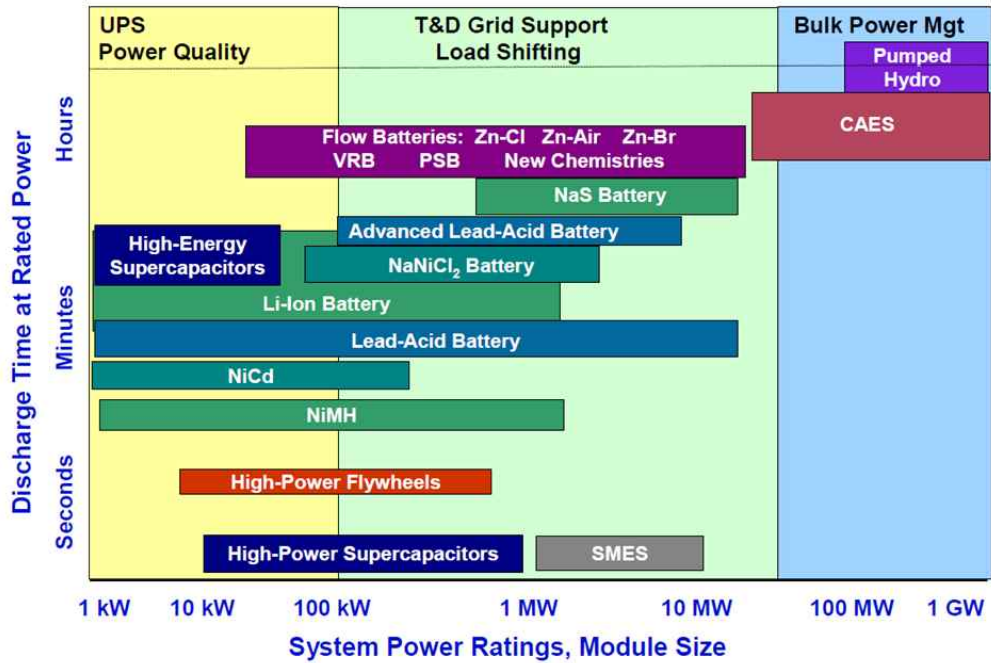


Fig. 1 Positioning of energy storage technologies

1.1.2 풍력발전단지

풍력발전기는 바람에너지를 이용하여 전력을 생산하기 때문에 에너지원이 무한하며 친환경적이다. 또한 신재생에너지 발전원 중 단위 면적당 전력 수급량이 뛰어나다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점에 힘입어 전 세계적으로 풍력발전 산업에 대한 관심이 증가하고 있고 GWEC(Global wind energy council)의 2014년 보고서에 의하면 Fig. 2에서와 같이 풍력발전산업이 전 세계적으로 지속적인 성장세를 나타내고 있으며 누적 풍력발전설비가 320 GW에 도달한 것으로 분석되고 있다 [4].

풍력발전산업에서의 최근 추세는 대규모의 해상풍력 발전단지 구축이며 현재 유럽 국가들을 중심으로 7 GW의 해상풍력 발전단지가 구축되어 있다. 해상풍력 발전은 단지확보가 용이하기 때문에 대단지 구축이 가능해져 풍력발전산업의 성장에 박차를 가해줄 것으로 전망되고 있으며 해상풍력 단지건설이 활성화 되면 전체 계통에서의 풍력발전의 비중은 더욱 커질 것으로 전망되고 있다 [5].

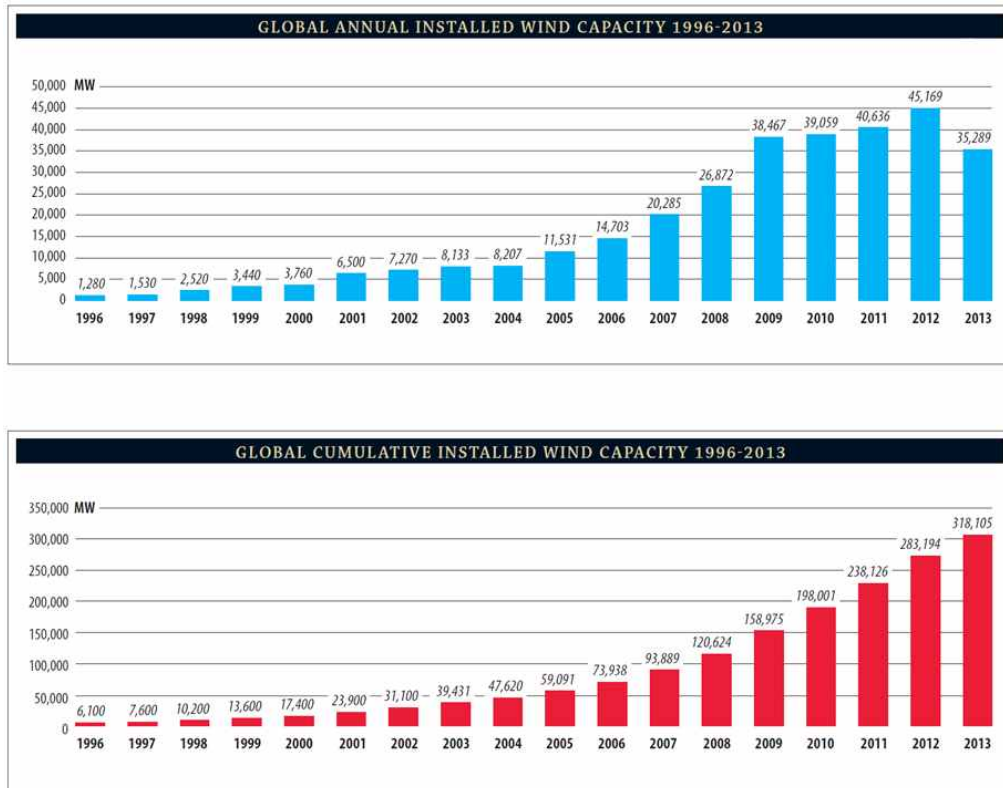


Fig. 2 Global annual installed and cumulative installed wind capacity

국내 풍력발전산업 또한 현재 제주지역과 강원지역을 중심으로 605.2 MW의 설비가 구축되어 있으며 신재생에너지 공급의무화제도(RPS: Renewable Portfolio Standards)의 도입으로 인해 그 규모가 더욱 확대될 것으로 전망되고 있다. 2014년도의 전력수급 기본계획에 따르면 2035년까지 풍력발전과 같은 분산형 발전시스템의 비중을 전체 전력설비의 15% 이상으로 확대할 것으로 예정되어 있어 국내에서의 풍력산업의 규모 또한 더욱 커질 것으로 예상할 수 있다.

하지만 풍력발전단지의 출력은 기상조건에 의한 영향을 크게 받기 때문에 지속적으로 안정적인 전력공급이 어려워 변동출력을 발생시킨다는 단점을 지니고 있다. 따라서 전체계통에서 풍력발전원의 비중이 커지면 풍력발전단지에서 발생하는 변동출력은 전체 전력계통의 안정도 및 전력품질을 감소시키는 원인이 될 수 있으며 정확한 발전수급계획을 세우는데 장애요인이 될 수 있다 [6].

1.2 연구목적 및 내용

풍력발전단지의 변동출력의 안정적인 제어를 위해 현재 기술로는 인위적으로 출력을 제한하는 방법을 사용하고 있지만 이는 이용률을 감소시키기 때문에 발전사업자의 입장에서는 큰 경제적 손실이 될 수 있다 [7]. 따라서 EES를 이용하여 풍력발전단지의 출력 상승률이 높은 구간에서의 에너지를 흡수하여 충전해두었다가 하락률이 높은 구간에서 방전하는 방법으로 풍력단지의 변동률을 감소시키는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 풍력발전단지의 변동출력보상을 위한 EES는 기상조건의 변화에 맞춰 지속적으로 대용량의 전력 에너지를 신속하게 전달할 수 있어야하기 때문에 SMES를 활용하면 대용량의 에너지를 효율적으로 빠르게 전달할 수 있다. 또한 지속적인 충방전에도 수명저하가 없어 풍력발전단지의 변동출력 보상용 EES로 활용하기에 매우 적합한 성능을 가지고 있는 것으로 분석된다 [8][9].

본 논문에서는 풍력발전단지에서의 SMES의 적용을 위해 풍력발전단지의 변동출력 보상을 위한 SMES를 사용시에 SMES의 안정도를 분석하게되며 다음과 같은 과정으로 분석을 수행한다.

2장에서는 풍력발전단지의 출력보상을 위한 1 MJ급 SMES 시스템을 설계한다. 이때 SMES의 경제성을 고려하여 SMES 시스템의 핵심 부품인 SMES 마그네틱의 최적화 설계를 수행하며 3차원 해석을 통해 설계된 SMES 마그네틱의 안정도를 분석하게 된다.

3장에서는 설계된 SMES를 계통에 적용하였을 때의 안정도를 분석한다. 계통 연계시 SMES의 충방전특성 분석을 통해 단지출력 개선효과 및 SMES 마그네틱 내의 에너지 변화량을 분석하게 된다. 이후 분석된 SMES의 에너지변화로 인해 발생하는 교류손실과 이로 인한 열상승 효과를 분석한다.

최종적으로 풍력단지의 변동출력 보상을 위해 설계된 SMES를 풍력단지에 적용하여 운전시에 SMES의 안정도를 분석하게 되며 이를 위해 수치해석과 PSCAD, 3D FEA(3D finite-element analysis) 전자장 해석 시뮬레이션을 사용하였다.

2. SMES 시스템(1 MJ) 설계

SMES는 풍력발전단지의 변동출력을 보상하기에 매우 적합한 성능을 지니고 있지만 추가비용을 발생시키기 때문에 풍력발전 사업의 경제성 문제와 직결된다. 따라서 SMES의 경제성을 높이기 위해 공간, 비용, 저장효율 측면에서 최적화된 SMES의 설계가 이루어져야 한다. SMES시스템의 구성품 중 SMES마그넷은 에너지 저장이 이루어지는 핵심 부품으로 전체시스템 중 가격 비중이 가장 크며 SMES마그넷을 권선하는 방법에 따라서 선재사용량, 냉각효율의 차이가 발생하게 될뿐만 아니라 전체 SMES시스템의 저장에너지 및 효율, 경제성이 결정되기 때문에 SMES 마그넷의 최적화 설계가 반드시 이루어져야 한다 [10].

2장에서는 풍력발전단지 변동출력 보상을 위한 SMES마그넷을 최적화설계 하였으며 최적화에 앞서 SMES마그넷에 사용될 초전도선재와 형상을 결정하였다. 결정된 형상에 대한 변수를 정의하여 정의된 변수의 최적화를 수행하였으며 설계된 마그넷에 대한 3차원 시뮬레이션 해석을 통해 전자기적 안정도를 분석하였다. 최종적으로 설계된 마그넷을 냉각하기 위한 냉각시스템을 설계하였다.

2.1 SMES의 원리

SMES는 초전도체로 제작된 마그넷을 활용하여 자기에너지 형태로 전력을 저장하는 장치이다. 초전도체는 임계온도 이하로 냉각되어 초전도상태로 상변위하게 되면 저항이 영에 가까워지는 완전전도성을 가지게 된다. 일반 도체는 전기저항을 가지므로 전류를 통전 시에 저항손실이 발생하게 되지만 초전도상태인 초전도체는 전기저항이 없어 높은 에너지밀도를 지닐 수 있게 된다 [1].

초전도체의 초전도상태를 유지하기 위해서는 Fig. 3에서와 같이 초전도체의 전류, 온도, 자기장이 임계값 이하로 유지되어야 하며 각 조건 중 임계값을 넘어서는 값이 발생 시 초전도 상태를 유지하지 못하고 높은 저항값을 가지는 퀘치 현상이 발생하게 된다. 따라서 초전도 기술을 활용한 초전도 응용기기에서는 퀘치 현상을 방지하여 지속적으로 초전도상태를 유지할 수 있어야 한다 [11].

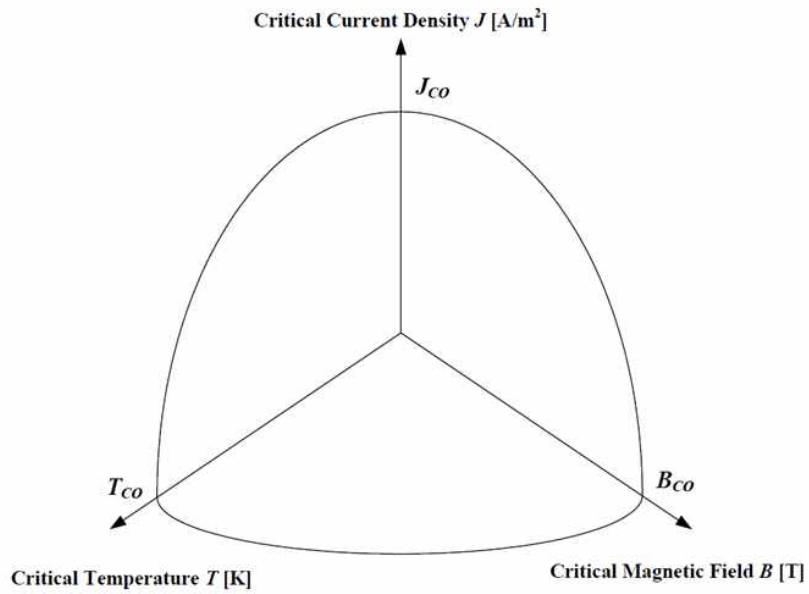


Fig. 3 Critical surface of the superconductivity

Fig. 4에서와 같이 tape형태로 제작된 초전도 선재를 코일형태로 권선하면 초전도코일은 고유의 인덕턴스를 가지며 이때 코일에 전류를 통전한 뒤 폐회로를 구성하면 인덕턴스가 있는 회로에 전류가 존재하게 되어 초전도마그넷에 전류에 의한 자기에너지 형태로 에너지를 저장할 수 있다. 이 때 초전도체의 고유특성에 의해 저항에 의한 에너지 손실이 없기 때문에 높은 효율로 에너지를 저장할 수 있게 된다 [12].

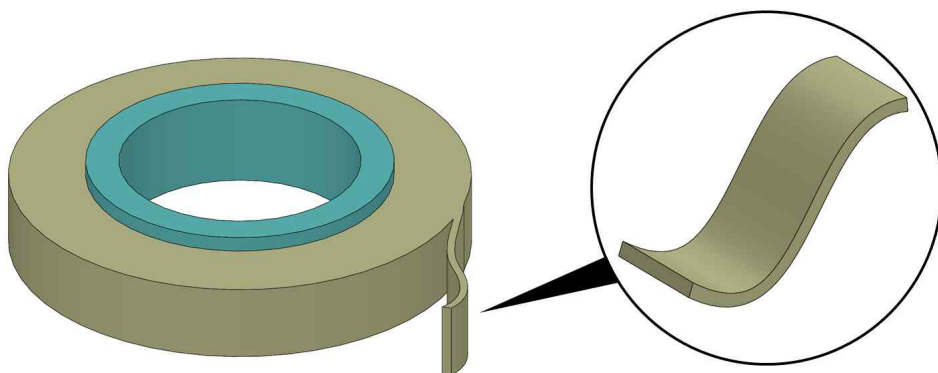


Fig. 4 Structure figure of superconducting coil

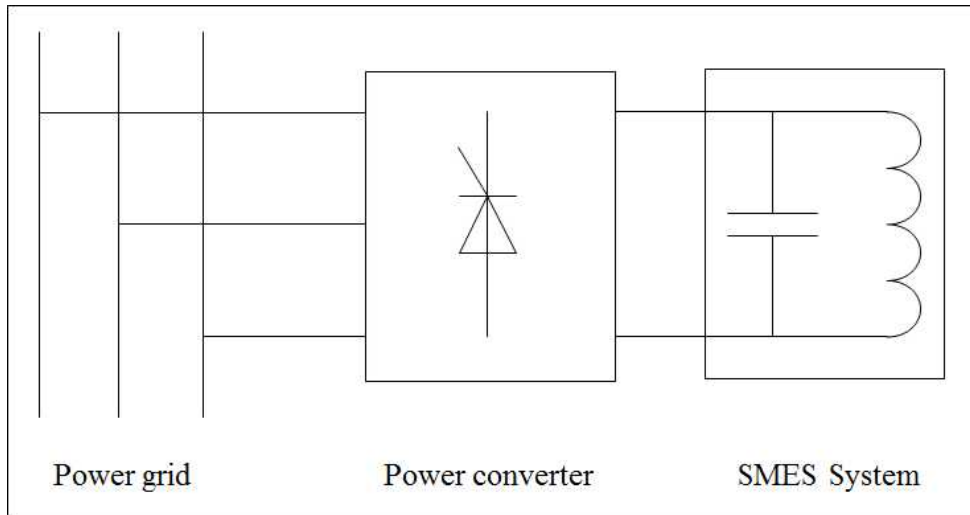


Fig. 5 Schematic diagram of SMES system

기존의 리튬이온, NaS전지의 경우 에너지 저장 및 변환 시 수반되는 전기 및 열적 손실과 늦은 충방전 응답속도로 인해 에너지 저장효율이 감소하게 되지만 SMES의 경우 전류에 의한 자기에너지 형태로 에너지가 저장되기 때문에 에너지의 충방전 시 에너지 매개체의 변환 없이 저장된 에너지를 전력계통과 직접적으로 연결할 수 있기 때문에 다른 EES에 비해 높은 효율과 속도로 에너지를 저장, 방출할 수 있다. 따라서 Fig. 5와 같은 형태로 계통에 연계 시 대규모의 전력을 신속하게 충방전할 수 있으며 반복적인 충방전에도 장치의 물리적 변화 없이 반영구적인 수명을 지닐 수 있게 된다. 이때 SMES 마그넷에 저장되는 에너지는 식 (1)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \text{ [J]} \quad (1)$$

여기서 E 는 저장에너지, L 은 인덕턴스, I 는 통전 전류를 각각 의미하며 저장 에너지는 인덕턴스에 비례하고 통전전류의 제곱에 비례하기 때문에 마그넷에 통전되는 전류 및 인덕턴스가 클수록 저장되는 에너지는 증가하게 되며 따라서 전류와 인덕턴스는 SMES 내의 저장에너지를 결정하는 중요한 지표가 된다. 이때 초전도 선재의 임계전류는 코일의 운전온도와 쇠교자속밀도에 따라 변화하므

로 초전도 코일의 허용전류 값은 SMES의 운전온도, 쇄교자속밀도값을 고려하여 선정하여야 한다. 인덕턴스는 코일의 형상에 의해서 결정되며 동일 인덕턴스를 가지는 코일이라도 초전도선재의 사용량이 달라질 수 있기 때문에 이를 최적화하는 설계가 필요하다. 또한 설계된 SMES 마그넷은 초전도 선재의 물리적 특성에 의해 전자기적 영향을 받기 때문에 전자장 해석이 이루어져야 하며 설계된 마그넷을 운전할 수 있는 적합한 냉각장치 또한 고려되어야 한다.

2.2 마그넷 형상 최적화 설계

2.2.1 초전도선재 및 형상결정

초전도체의 종류에 대해 Fig. 6에 나타내었다. 기존에는 SMES 마그넷을 제작하기 위한 초전도 선재로 금속계 초전도체인 저온 초전도체 (LTS: Low temperature superconductor)가 사용되었지만 현재는 산화물계 초전도체인 고온 초전도체 (HTS: High temperature superconductor)를 사용하고 있다. LTS는 HTS에 비해 상대적으로 가격이 싸다는 장점을 가지고 있지만 20 K 이하의 극저온에서의 운전만이 가능하기 때문에 냉각 비용을 증가시키게 된다. LTS를 사용하여 대용량의 SMES를 개발 시에 마그넷 제작비를 낮출 수 있지만 냉각 시스템의 운영비가 높아 전체 시스템의 경제성이 떨어지는 단점이 있다.

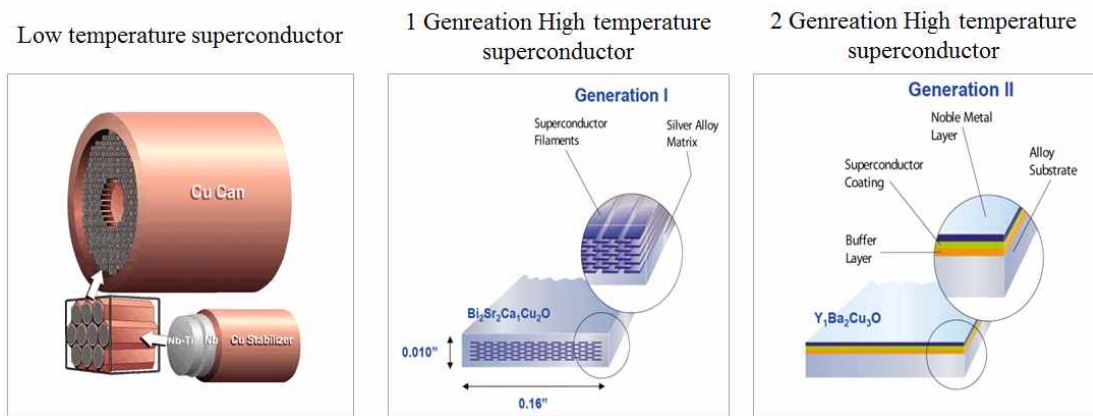


Fig. 6 Types of superconducting wires

HTS를 이용하면 액체 헬륨온도부터 액체질소 온도까지 넓은 영역의 온도에서 초전도 기기의 활용이 가능해져 냉각장치의 자율성이 증가하게 되며 LTS에 비해 열적 안정성이 우수하기 때문에 열적 외란에 대한 시스템 안정도가 향상된다는 장점을 지니고 있어 현재는 HTS를 이용한 SMES 시스템 개발 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. HTS는 크게 BSCCO (Bi-Sr-Ca-Cu-O)선재와 같은 1세대 고온 초전도체(1G HTS)와 YBCO (Y-Ba-Cu-O)와 같은 2세대 고온 초전도체 (2G HTS)로 나눌 수 있다. 1G HTS 는 2G HTS에 비해 장선화가 가능하다는 장점이 있지만 2G HTS에 비해 자기장-임계전류 특성이 좋지 않아 높은 자기장에서 선재의 임계전류 값이 크게 저하되어 고자기장 초전도 응용기기의 성능을 저하시킬 수 있다는 단점이 있다 [13].

SMES 마그넷은 대전류를 통전하기 때문에 고자기장을 발생시키게 되며 초전도 선재의 특성으로 인해 채교되는 자속밀도에 의한 임계전류의 감소가 불가피하게 발생하게 된다. 따라서 자기장-임계전류 특성이 우수한 2G HTS 선재를 사용하여 SMES를 제작할 시 고자기장 내에서도 높은 전류를 통전할 수 있기 때문에 마그넷을 소형화, 고효율화 시킬 수 있게 된다. 또한 2G HTS를 사용하면 운전온도가 비교적 높기 때문에 기타 구조물의 저항값이 높아 결합손실과 전류손실, 냉각손실을 크게 감소시킬 수 있는 것으로 분석되고 있다. 따라서 본 논문에서는 자기장-임계전류 특성이 우수하고 93 K 이하 온도에서 활용이 가능한 2세대 고온초전도체인 REBCO 선재를 SMES 마그넷의 소재로 사용하였다. REBCO 선재는 Fig. 7에서와 같이 얇은 초전도박막과 안정화 층으로 이루어진 tape형태의 구조이며 선재의 사양은 Table 1과 같다 [14].

Table 1 Specifications of the 2G HTS wire

Specifications	Value	Comments
Conductor type	REBCO	
Width (폭)	12 mm	
Thickness (두께)	0.38 mm	with insulation
Superconducting layer	1 μ m	
Critical current	300 A	@77K, Self field
Critical Bend Diameter	11 mm	

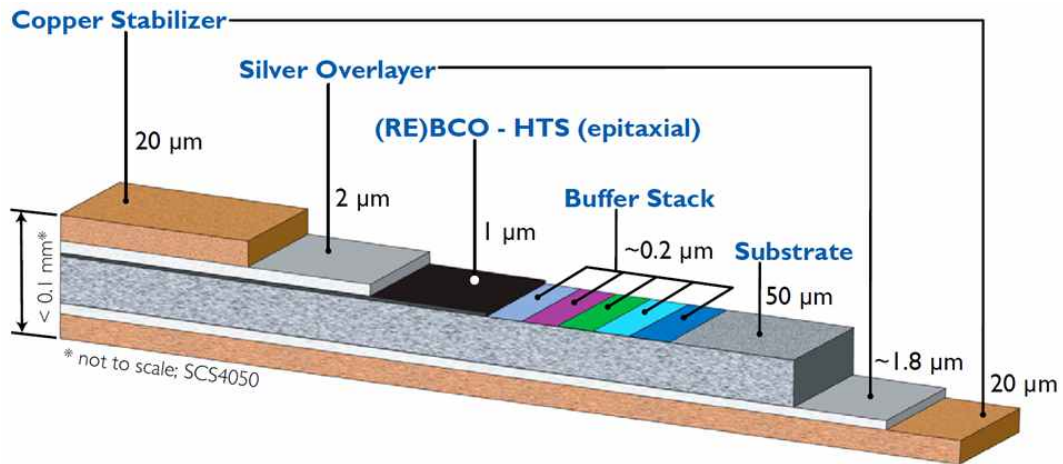


Fig. 7 Structure of the 2G HTS conductor

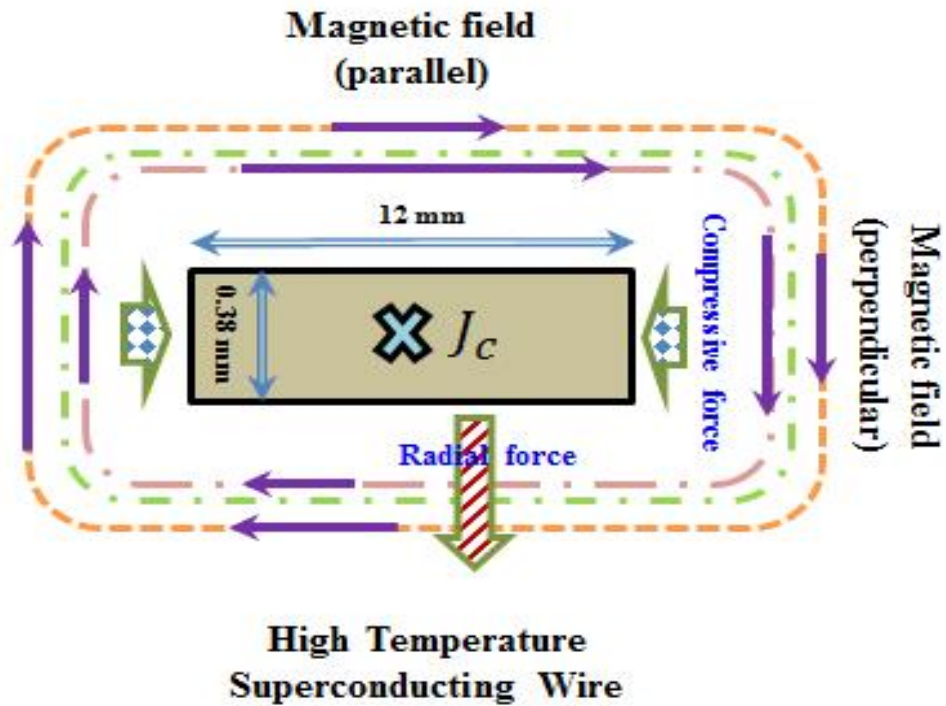


Fig. 8 Anisotropic characteristic of 2G HTS wire

Fig.7과 같이 tape형태로 제작된 박막형 초전도 선재에서 실제로 초전도 특성을 가지는 부분은 $1 \mu\text{m}$ 의 얇은 초전도 층이다. 따라서 선재의 단면을 수직과 수평 방향에서 보면 각 방향별로 초전도 층이 차지하는 비중이 달라 외부로부터 자기적 물리력이 가해질 때 각 방향별로 물성적 특성 차이가 발생하게 되는데

이를 초전도 선재의 이방성 이라 하며 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다 [15]. 예를 들어 초전도선재의 임계전류는 선재에 쇄교되는 자속밀도의 영향을 받게 되는데 선재의 이방성으로 인해 수직방향으로 가해지는 자기장에 의한 영향은 매우 크지만 상대적으로 수평방향으로 가해지는 자기장에 의한 영향은 작다. 따라서 2G HTS선재를 초전도기기에 활용하기 위해서는 선재의 이방성 특성을 고려한 분석이 이루어져야 한다.

SMES 마그넷은 에너지의 저장이 이뤄지는 핵심 부품이며 일반적으로 SMES에 사용되는 초전도마그넷은 Fig. 9에서와 같이 2가지 형태로 제작된다. 다중 팬케이크 형태는 누설자속을 감소시킬 수 있고 형상이 간단하지만 적층구조 방식으로 인해 냉각이 어렵고 팬케이크 마그넷 간에 전기적인 조인트가 존재하게 된다. 토로이드 코일은 수직자장 영향을 감소시킬 수 있지만 구조가 복잡하고 수평자장에 의한 전자기력이 솔레노이드 형태에 비해 상대적으로 커지게 되는 특징을 지닌다. 하지만 동일 용량의 SMES를 설계할 시 다중 팬케이크 코일의 공간적 활용도가 높은 것으로 알려져 있다 [16].

본 논문에서는 풍력발전단지의 변동출력 보상을 위해 다양한 형태의 전력계통 운전조건에 적용할 수 있는 범용성 높은 SMES의 설계를 위해 1 MJ로 규격화된 다수의 SMES의 연계 운전을 통해 계통을 보상하는 방법을 고려하였으며 이때 SMES 시스템이 설치되는 공간을 최소화하기 위해 SMES 마그넷의 형상은 공간 활용도가 우수하며 소형화에 적합한 다중 팬케이크 형태를 선정하였다.

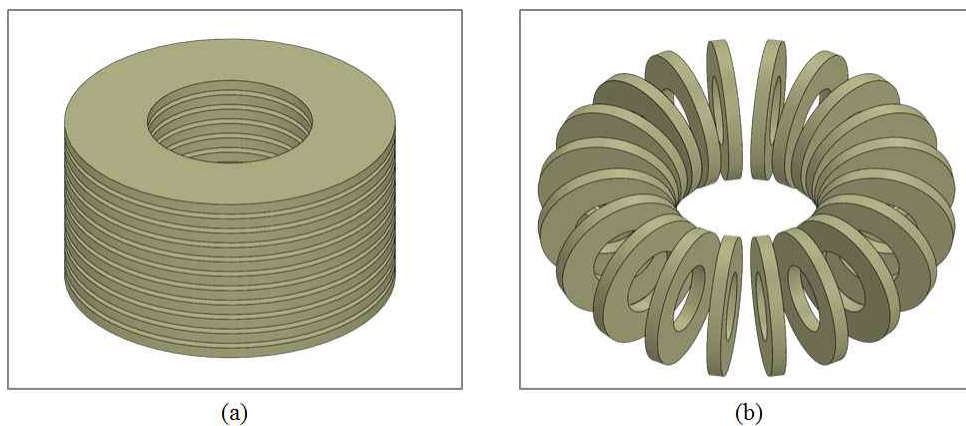


Fig. 9 Shape of the SMES magnet (a) Multiple pancake, (b) Toroid

2.2.2 마그넷 형상 최적화

2.2.1 절의 식 (1)과 같이 SMES 마그넷에 저장되는 에너지는 인덕턴스에 비례하며 통전 전류의 제곱에 비례한다. Fig. 10은 선정된 초전도선재인 REBCO 선재의 쇄교되는 자속밀도에 따른 임계전류 특성을 보여주고 있다 [17]. SMES의 운전전류는 선재의 자기장-임계전류 특성에 따라 SMES 마그넷의 열 및 전자기력에 대한 안정성을 검증하여 결정한다. 이때 2G HTS 선재는 이방성 특성을 가지기 때문에 선재에 인가되는 수직방향 자기장에 의한 영향을 고려하여 수직방향 자기장이 5 T 일 때의 임계전류 값을 허용전류로 선정하였다. 설계될 SMES는 20 K에서 운전되지만 충방전 운전 중에 발생하는 발열에 대한 안정도를 확보하기 위해 최대 30 K까지 운전이 가능하도록 하였다. 따라서 Fig. 10에서 운전온도 30 K, 인가 자기장 5 T의 조건일때 선재의 임계전류인 611 A에 10%의 안정도 여유를 고려하여 570 A를 SMES의 최대 허용 운전전류로 선정하였다.

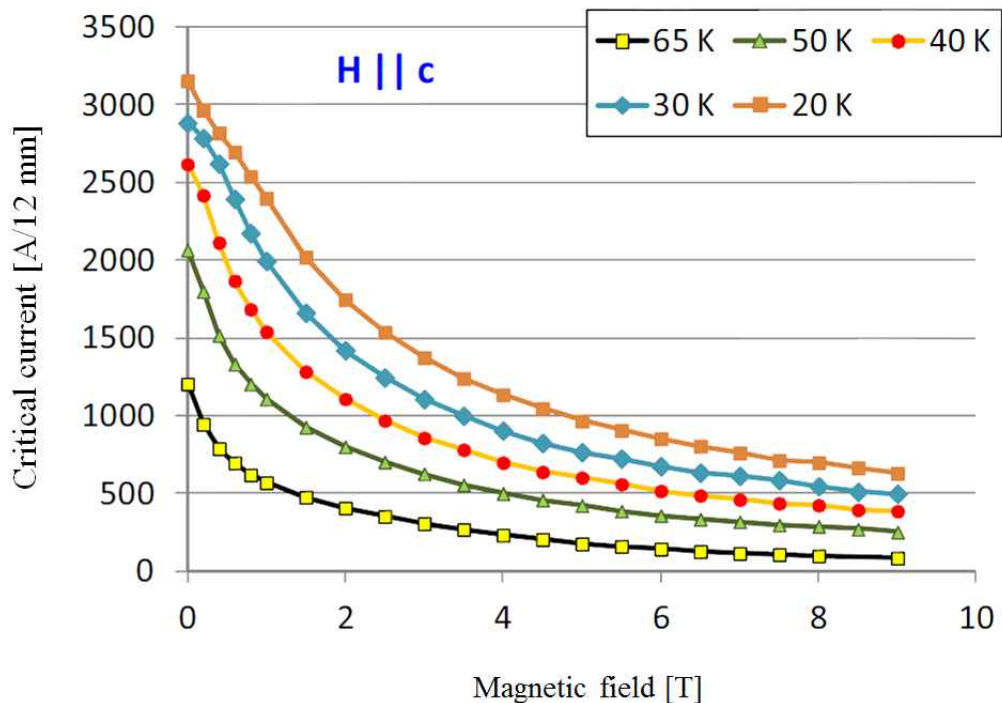


Fig. 10 In-field property of REBCO wire ($B_{\perp} - I_c$)

Parameter

a : Inner radius

b : Outer radius

h : Height of coil

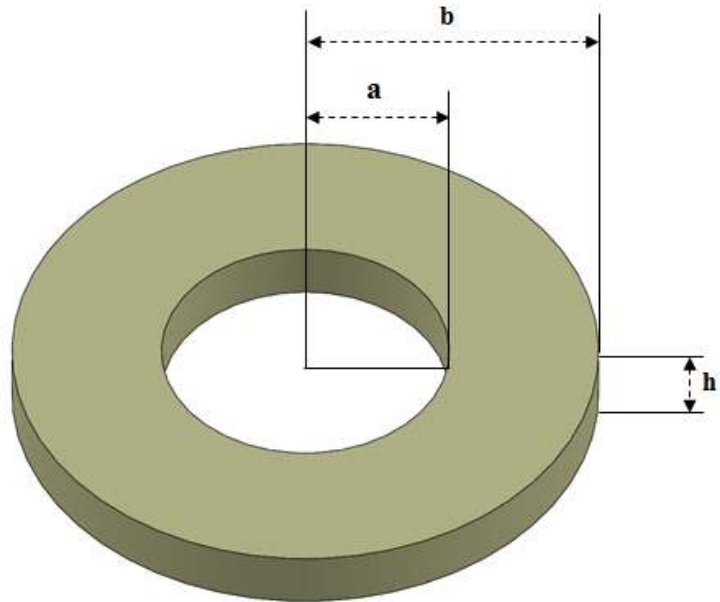


Fig. 11 Geometric parameters of the single pancake coil

이때 운전중 퀘치 발생시 마그넷의 보호를 위해 운전온도인 20 K에서 상온까지 도달하는 시간이 고려되어야 하며 구리 안정화층의 Z-Function과 선재의 임계전류를 고려하여 설계된 마그넷에서 퀘치가 발생할시 상온까지 도달하는 시간을 계산하면 9.92 초로 퀘치보호를 위한 충분한 시간을 지님을 확인할 수 있었다. 따라서 식 (1)에 의해 허용전류가 570 A일 때 설계된 SMES가 목표 용량인 1 MJ의 용량을 갖기 위해 필요한 인덕턴스는 6.2 H로 산정할 수 있다.

$$L = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \left(\ln \frac{b}{a} \right) \quad (2)$$

Fig. 11은 단일 팬케이크 코일의 형상과 변수를 보여주고 있으며, 이때 코일에서의 인덕턴스는 식 (2)와 같다 [9]. 여기서 μ_0 는 진공중의 투자율, a , b , h 는 각각 내반경, 외반경, 코일의 높이를 의미한다. 앞 절에서 SMES의 저장에너지와 전류를 결정했기 때문에 인덕턴스 값은 고정 값을 가지게 되지만 식 (2)에서와

같이 코일의 인덕턴스는 코일의 내반경, 외반경, 높이와 같은 형상에 관련된 변수에 따라 비선형적인 관계로 변화하게 되므로 동일 인덕턴스를 가지는 코일이라도 각 변수에 따라 코일의 부피가 달라지게 되며, 이는 권선에 필요한 초전도 선재의 사용량을 변화시키게 된다. 초전도 선재의 사용량은 SMES의 경제성을 결정하는 매우 중요한 요소이기 때문에 반드시 고려되어야 한다. 인덕턴스는 코일에서 발생하는 쇄교자속과 비례하기 때문에 코일의 형상에 따라 인덕턴스가 변화하면 코일의 자기장 분포가 달라지며 이는 자기장-임계전류 특성에 의해 SMES 마그넷의 성능을 저하시킬 수 있으므로 형상 결정 단계에서 반드시 고려되어야 한다. 따라서 SMES 마그넷의 형상은 SMES의 경제성과 안정도를 결정하는 중요한 요소가 되며 SMES 시스템의 제작에 앞서 최적화가 이루어져야 한다. 따라서 SMES 마그넷의 설계 목표순위를 다음과 같이 선정하였다.

1. 경제적인 설계를 위한 최소 선재사용량 사용
2. 수직방향 자기장에 의한 임계전류 감소현상 방지

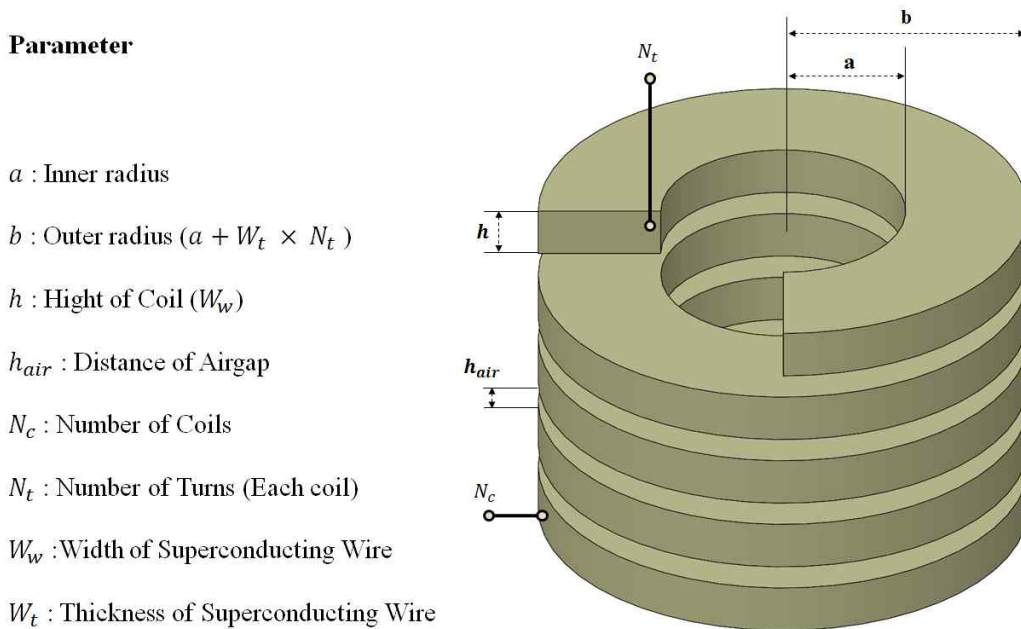


Fig. 12 Geometric parameters of the multiple pancake coil

단일 팬케이크 코일에서의 인덕턴스는 식 (2)를 통해 구할 수 있지만 다중 팬케이크형 마그넷에서 코일의 수가 늘어나게 되면 코일의 자기인덕턴스 외에 각 코일간의 상호인덕턴스가 고려되어야 하며 이는 각 코일에서 발생하는 자기 인덕턴스와 코일간의 간격에 영향을 받게 된다. 코일에서의 인덕턴스 값은 비선형 특성을 지니고 있으며 최적화를 위해서 목표순위에 따라 여러 가지 조건을 만족시킬 수 있어야 하므로 다중팬케이크 코일의 최적화설계는 비선형 다수 목적함수의 최적화가 되므로 SMES 마그넷에 요구되는 인덕턴스를 최적의 선재사용량으로 구현하는 설계안을 찾는 것은 복잡한 과정을 거쳐야한다.

따라서 형상 최적화에 앞서 형상 최적화과정을 간략화 시키기 위해 다중 팬케이크 형태의 SMES 마그넷의 인덕턴스 패턴을 분석한 뒤 패턴을 규격화시켜 설계변수를 최소화 시켰다. 요구되는 인덕턴스를 얻기 위한 최적의 형상을 계산하기 위해 다중 팬케이크 형태의 SMES 마그넷의 각 변수들을 Fig. 12와 같이 지정하였다. 초전도선재가 결정되면 단일 코일의 높이는 선재의 폭과 동일하게 되며 한 턴 당 늘어나는 반경은 선재의 두께와 동일하게 되기 때문에 두 값은 고정 값이 된다. 마그넷의 총 높이는 단일코일의 높이, 코일의 개수의 변화, 코일간 공극의 길이에 의해 결정되게 되며 코일의 최외각 반경은 내반경과 단일코일에서의 턴수의 변화에 의해 결정되게 된다.

사전 분석을 통해 목표 인덕턴스인 6.2 H의 코일을 구성하기 위해서는 일반적으로 5~7 km의 선재가 사용됨을 확인하였다. 따라서 이 구간에서의 인덕턴스 패턴분석을 위해 총 5~7 km 길이의 선재를 사용하여 마그넷을 제작할 때 각 선재 사용량별로 코일의 내반경과 코일수를 변수로 지정하였을 때 인덕턴스 변화 패턴을 분석하였다. 이때 선재의 사용량이 고정되기 때문에 코일수가 변화하면 단일 코일에서의 턴수 또한 종속변수로 변화하게 된다. 이때 내반경은 초전도선재의 최소 굽힘강도인 11 mm를 고려하여 50 mm부터 700 mm까지 50 mm단위로 증가 하도록 하였으며 코일 수는 1개부터 20개까지 1개단위로 증가하도록 지정하였다. 분석방법을 도식화 하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다.

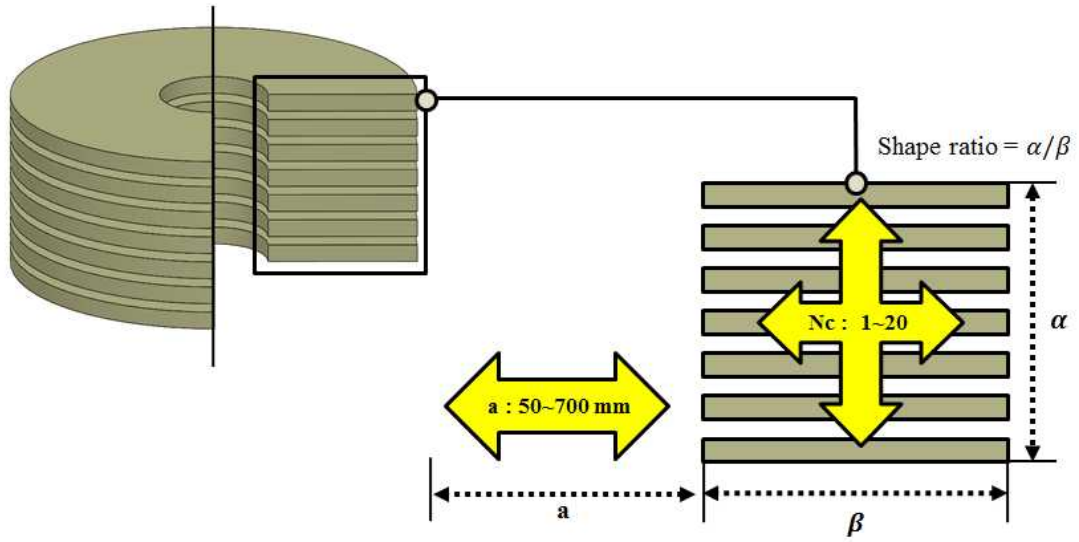


Fig. 13 Method for analyzing the inductance pattern of multiple pancake coil

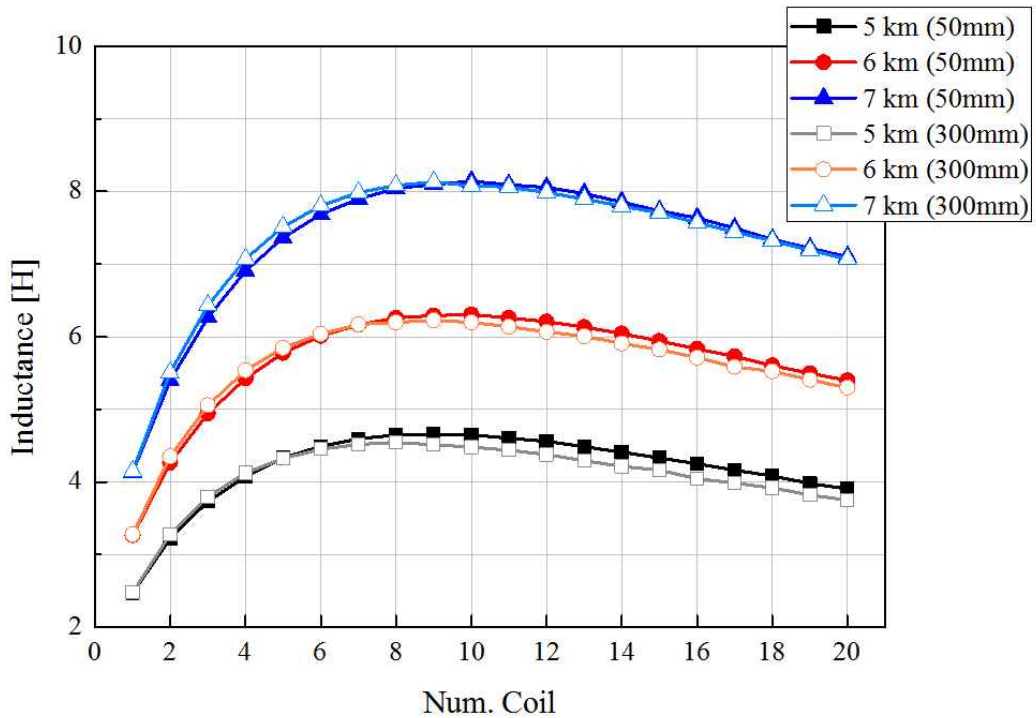


Fig. 14 Results of inductance pattern of multiple pancake coil

인덕턴스 패턴 분석 결과 중 내반경 50 mm와 300 mm에서의 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 유형분석 결과에 의해 동일 선재량에서도 내반경과 코일수에 따라 높은 인덕턴스를 발생시키는 구간이 있음을 확인할 수 있었다. 각각의 선재 사용량별로 최대 인덕턴스를 가지는 코일수와 내반경은 각기 달라 유형을 분석하기 어렵지만 Fig. 13과 같이 설계안의 형상을 구현하여 마그넷 단면의 폭과 높이의 비를 형상비로 정의할 때 각 설계안의 형상비를 비교해보면 선재 사용량과 무관하게 동일한 형상비에서 최대 인덕턴스를 지니는 것을 확인할 수 있었다. 최대 인덕턴스를 가지는 특정 형상비를 최적형상비라 정의 할 때 최적형상비는 내반경의 변화에 따라 각기 다른 것을 확인할 수 있었다. 따라서 분석결과에 따라 5~7 km 선재사용량 범위 내에서는 선재사용량에 무관하게 동일한 최적형상비를 지님을 확인할 수 있었으며 이는 내반경에 따라 변화함을 확인할 수 있었으며 이때 분석된 각 내반경별 최적형상비는 Table 2와 같다.

Table 2 Shape ratio distinguished by a difference of the inner radius

Inner radius [mm]	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700
Shape ratio	0.65	0.83	0.95	1.07	1.12	1.18	1.2	1.2	1.2	1.2

결과적으로 선재사용량이 고정 값일 때 최적형상비에서 최대 인덕턴스를 가지기 때문에 이는 반대로 해석하면 고정된 인덕턴스를 가지는 마그넷을 최적 형상비로 권선하면 최소 선재사용량으로도 목표 인덕턴스를 구현할 수 있음을 의미한다. 이는 5~7 km 범위의 선재사용량에서는 어느 구간에서든 적용 가능하기 때문에 본 논문의 설계에 적용할 수 있다. 따라서 최적 형상비를 이용하여 선재의 사용량을 최소화 하는 설계안을 간단하게 구할 수 있으며 이때 각 내반경 별로 최적 형상비가 다르기 때문에 각 내반경 별 최적 형상비의 설계안이 비교되어야 한다. 따라서 Table 2의 결과에 따라 각 내반경 별 최적형상비를 적용하여 목표 인덕턴스인 6.2 H를 가지는 다중 팬케이크형 SMES 마그넷을 구현했을 때

의 선재사용량을 비교하면 Fig. 15와 같다. 분석된 설계안 중 내반경 150 mm 일 때의 최적 설계안이 다른 내반경일 때의 최적 설계안에 비해 최소의 선재사용량으로 목표인덕턴스를 달성할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 이때 선정된 마그넷의 자기장분포에 관한 수치해석 결과 수직방향 자기장값이 마그넷의 임계전류에 영향을 미치지 않는 값을 확인할 수 있었다. 따라서 최종적으로 내반경 150 mm일 때 최적형상비를 적용하여 선재사용량을 최소화 한 설계안을 1 MJ급 SMES 마그넷의 최종설계안으로 선정하였다.

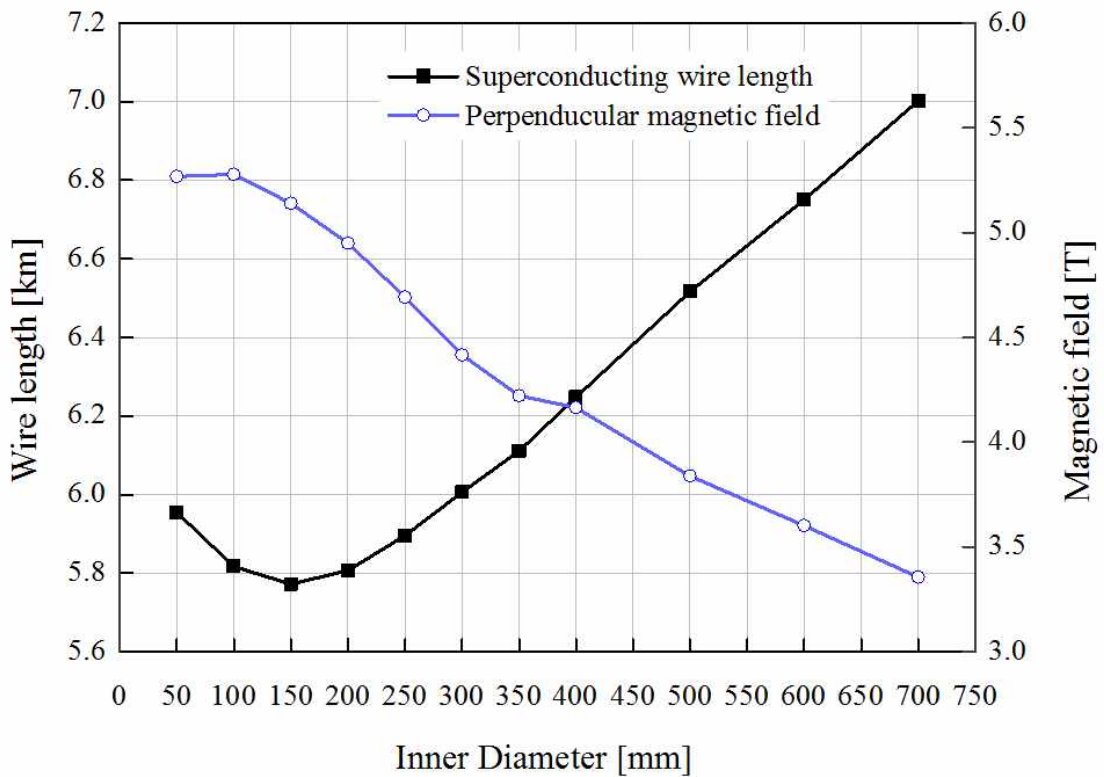


Fig. 15 The total length of superconducting wire in terms of optimal shape ratio at each inner radius

2.3 마그넷 3차원 전자장 해석

SMES 마그넷은 원통형 구조로 되어있어 2차원적인 수치해석을 통한 해석값은 실제 모델에서의 값과 차이가 발생할 수 있다. 따라서 설계된 SMES 마그넷의 안정도 분석을 위해 3차원적 해석이 이루어져야 한다 [18].

SMES는 고자기장을 발생시키기 때문에 발생하는 자기장이 SMES의 안정도를 저해 할 수 있다. 고자기장으로 인한 저해요소는 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫째는 초전도체의 고유특성인 자기장-임계전류 특성으로 인해 선재의 단면에 수직방향으로 쇄교하는 자속밀도에 의한 임계전류 감소현상이며 둘째는 쇄교자속으로 인해 발생하는 전자기력으로 인해 발생하는 구조적, 열적 문제이다. 따라서 설계된 SMES의 안정도를 확보하기 위해 2가지 요소에 대한 해석을 수행하였다. 3D FEA 정자계 해석을 통해 설계된 모델의 최대 허용전류인 570 A가 통전할 때의 수직방향 자기장 영향력과 전자기력 영향을 분석하였다.

2.3.1 자기장-임계전류 특성 평가

그림 16은 SMES 마그넷에서 발생하는 자속밀도분포를 나타내고 있다. 코일의 임계전류는 자속밀도의 영향을 받게 되며 쇄교되는 자속밀도가 증가하면 임계전류 값이 감소하게 되어 퀘치를 발생시키는 원인이 될 수 있기 때문에 SMES의 안정도분석에 있어 자기장-임계전류 특성의 분석은 필수적이다. 설계된 SMES 마그넷은 2G HTS의 이방성 특성에 의해 선재의 수직방향 성분에 의한 영향을 받게 되기 때문에 마그넷에서 발생하는 자기장 중 수직방향 성분을 분리하여 분석하였으며 SMES 마그넷에 수직방향으로 쇄교 되는 자속밀도 분포는 Fig. 17과 같다. 수직방향 자속밀도 분포는 마그넷의 상단과 하단에서 높은 값을 나타냈으며 최대 수직방향 자속은 4.7 T로 분석되었다. Fig. 18에서와 같이 20 K에서 4.7 T의 자속이 쇄교될 때 설계된 SMES 마그넷의 허용전류로 선정된 570A는 안정적인 운전범위이며 안정도에 영향을 주지 않는 수치임을 확인할 수 있다.

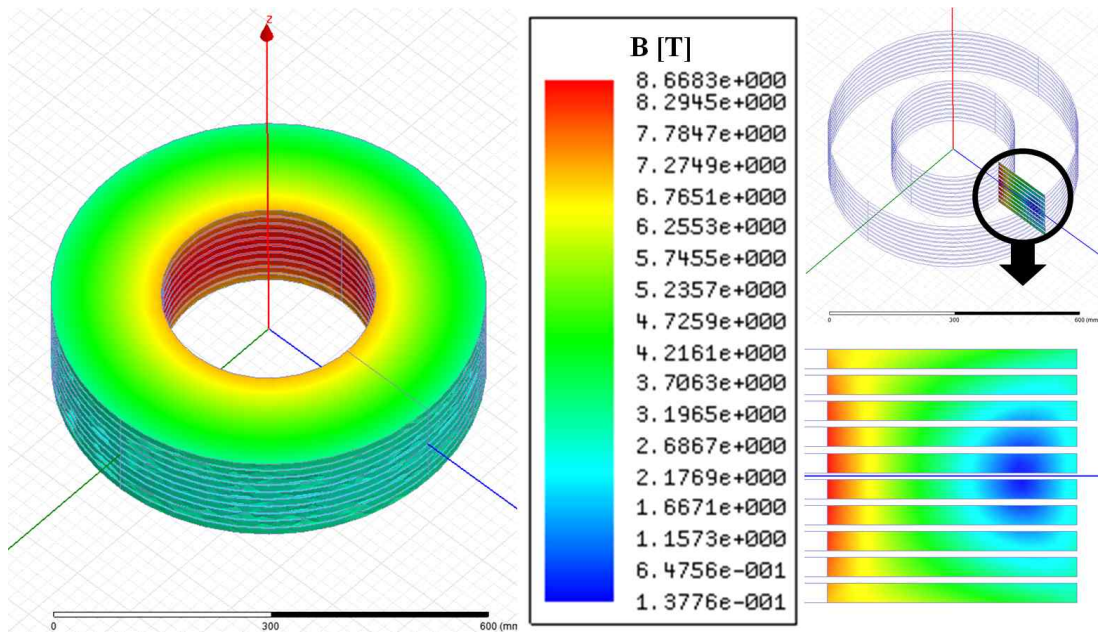


Fig. 16 Magnetic flux density distribution at the SMES magnet

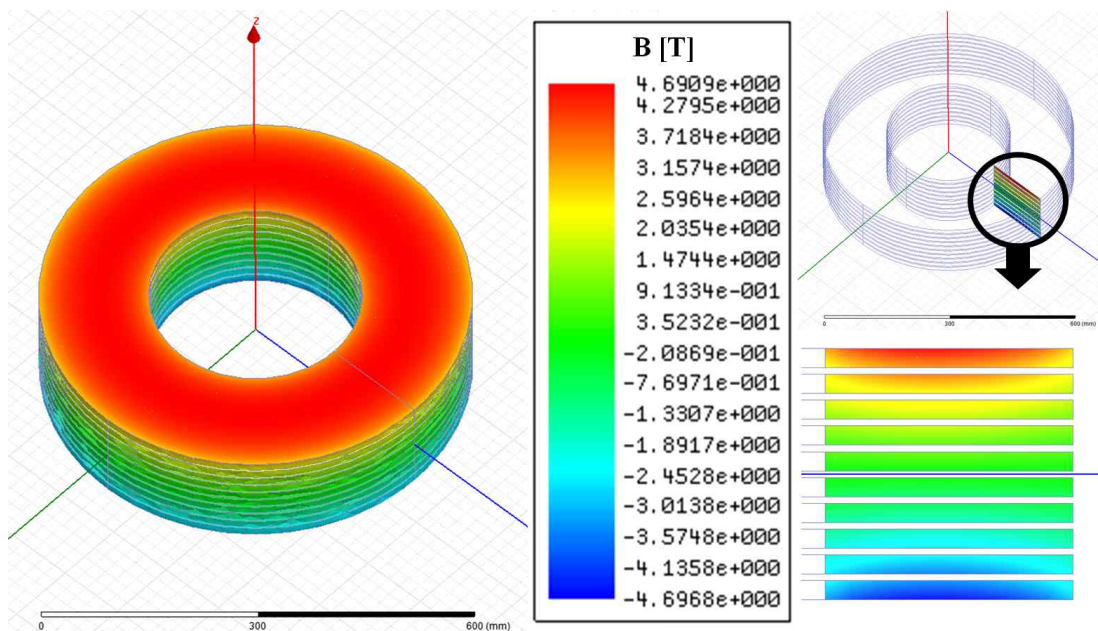


Fig. 17 The magnetic flux density distribution in the perpendicular direction at the SMES magnet

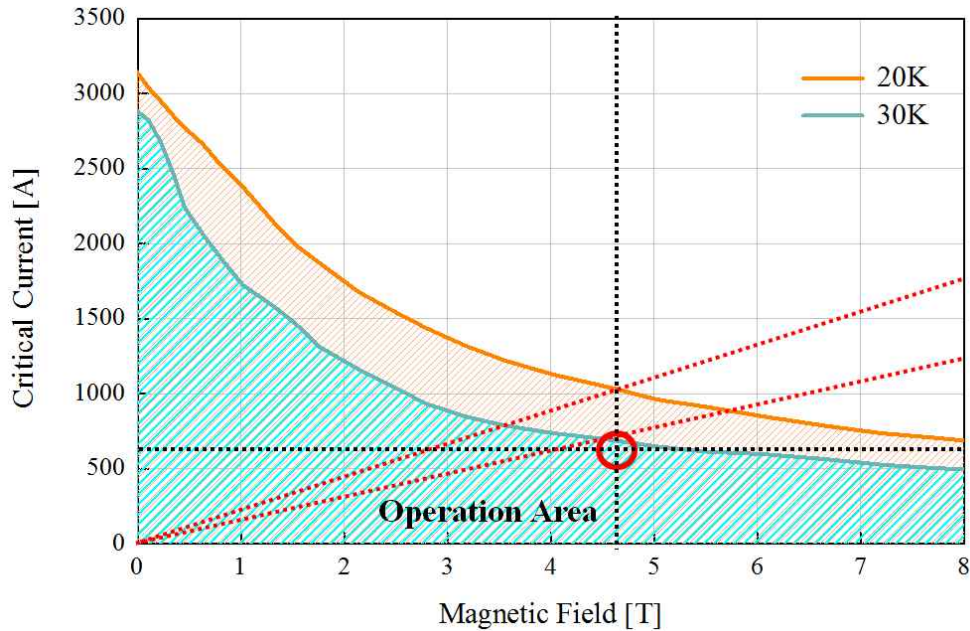


Fig. 18 Stability according to the magnetic field in the perpendicular direction under the variable cooling temperature conditions

2.3.2 전자기력 영향력 평가

SMES는 일반적으로 매우 큰 에너지밀도를 가지는 초전도기기로 높은 자기장과 전류밀도에 의하여 큰 전자기력을 발생시키게 되며 이로 인해 구조적 변형이 발생할 수 있다. 이는 산화물계의 HTS로 구성된 SMES 마그넷의 안정도를 크게 떨어뜨릴 수 있으며 SMES 마그넷의 성능을 저하시킬 위험이 있다. 따라서 SMES 마그넷의 자기장과 이로 인한 전자기력의 해석을 수행하였다. 전자기력은 수평방향 자기장의 영향을 받기 때문에 마그넷에서 발생하는 자기장 중 수평방향 성분을 분리하여 분석하였다. SMES 마그넷에 수평방향으로 쇄교되는 자속밀도분포는 Fig. 19와 같으며 이때 마그넷의 중심부 내외각에서 높은 쇄교자속이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 수평 자기장에 의해 발생하는 전자기력의 분포는 Fig. 20과 같았으며 초전도 선재의 이방성에 의해 전자기력에 의해 발생하는 응력 또한 각 방향별로 다른 특성을 가지기 때문에 전자기력의 각 코일에서 방향별 성분에 의해 발생할 수 있는 최대 전자기력을 분석하여 Table 3과 같이 나타내었다.

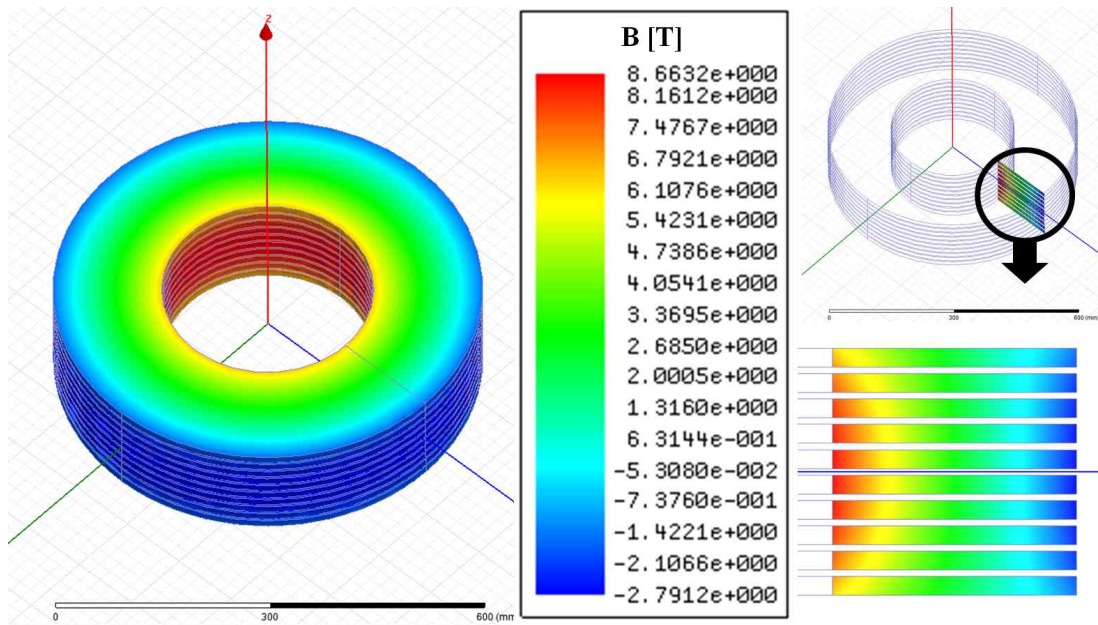


Fig. 19 The magnetic flux density distribution in the parallel direction at the SMES magnet

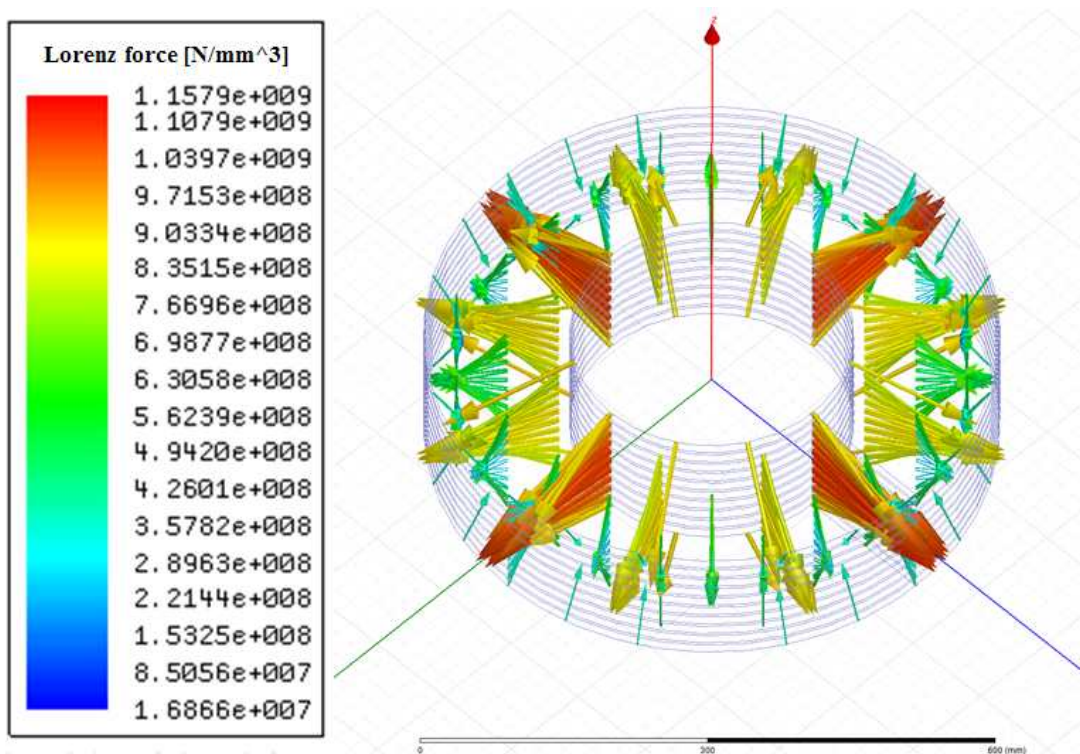


Fig. 20 Distribution of electromagnetic force at the SMES magnet

Table 3 Maximum lorentz force density at each layer of the SMES magnet

	$F(r) [N/m^3]$	$F(\theta) [N/m^3]$	$F(z) [N/m^3]$
Coil 1	0.95044×10^9	0.24112×10^9	0.59433×10^9
Coil 2	1.0502×10^9	0.22966×10^9	0.46181×10^9
Coil 3	1.0876×10^9	0.26905×10^9	0.33977×10^9
Coil 4	1.1478×10^9	0.26642×10^9	0.22605×10^9
Coil 5	1.1705×10^9	0.30922×10^9	0.12045×10^9
Coil 6	1.1533×10^9	0.25972×10^9	0.12075×10^9
Coil 7	1.1361×10^9	0.24297×10^9	0.22626×10^9
Coil 8	1.1×10^9	0.27455×10^9	0.33937×10^9
Coil 9	1.0409×10^9	0.27283×10^9	0.46118×10^9
Coil 10	0.9547×10^9	0.23611×10^9	0.5968×10^9

3차원 해석을 통해 최종설계안의 구조적인 안정도를 검증하였으며 설계된 SMES 마그넷의 최종설계안을 코일을 고정, 냉각하는 보빈과 함께 구현하면 Fig. 21과 같이 나타낼 수 있으며 설계된 SMES 마그넷의 최종 사양은 Table 4와 같다.

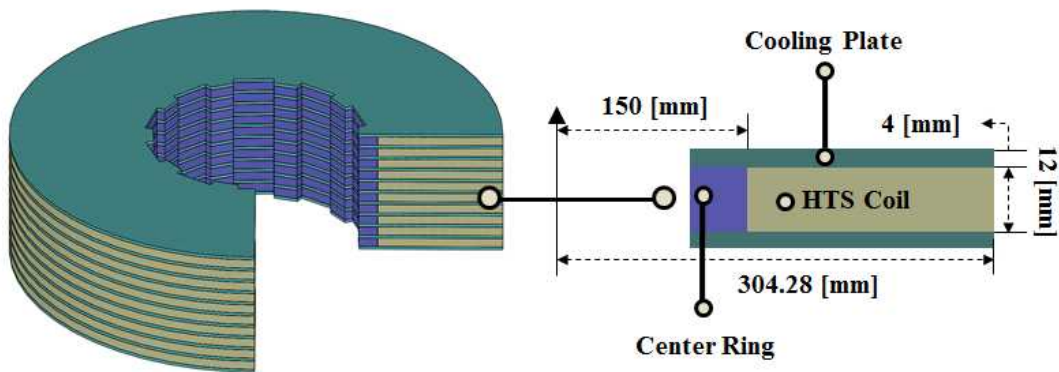


Fig. 21 Conceptual design of the 1 MJ SMES magnet

Table 4 Specifications of the 1 MJ class SMES

Parameters	Model
Storage Energy [MJ]	1
Operating temperature [K]	20
Inner radius [mm]	150
Outer radius [mm]	304.28
Number of turns per PC	406
Number of PCs	10
Gap between PCs [mm]	4
Operating current [A]	570
Inductance [H]	6.2
Maximum perpendicular field [T]	4.7
Height [mm]	164
Total length of HTS conductor [km]	5.7

2.4 SMES 시스템 구조 설계

설계된 SMES 마그넷은 2G HTS 선재인 REBCO를 사용하여 권선되었기 때문에 극저온 냉동기를 이용한 전도냉각 방식을 사용할 수 있다. 전도냉각 시스템을 사용하면 기존의 액체헬륨이나 액체질소 등의 냉매로 냉각되던 시스템에 비해 간단한 구조로 SMES 시스템을 설계할 수 있으며 냉각유지를 위한 운영비를 액체헬륨 냉매를 사용하는 방식에 비해 1/10이하까지 절감할 수 있는 것으로 알려져 있다. 설계된 SMES의 운전특성을 분석하기 위해 기존에 제작된 시스템을 기반으로 1 MJ급 마그넷을 냉각하기 위한 전도냉각 방식의 SMES를 구현하였으며 개요도를 Fig. 22와 같이 나타내었다 [19].

전도냉각시스템은 2대의 극저온 냉동기, 2개의 전류리드, 열교환기, 열 전도바, 보빈, 복사 차폐막으로 구성되어 있으며 각 층은 FRP로 제작된 지지대에 의해 고정되게 된다. 전도 냉각 방식에서는 코일을 냉각하기 위해 코일과 외부 냉동기의 열적 전달이 매우 중요하게 되기 때문에 냉각 시스템은 냉각효율 증대 및 열 침입 차폐를 위해 외부와 내부의 2개의 케이스로 구성하였다. 내부 케이스는 냉각효율 증대를 위해 내부는 진공상태를 유지하게 되며 복사열 차폐를 위해 열 차폐막인 MLI(Multi Layer Insulation)으로 코일 주변을 감싸게 된다.

진공용기 내부의 상단을 1단부 아랫부분을 2단부로 정의할 때 SMES 시스템의 극저온용기 상부에 설치된 2대의 GM(Gifford McMahon) 극저온 냉동기는 1단부에서는 70~80 K 온도를 유지하여 전류리드와 내부케이스를 냉각시키게 되며 2단부에서는 마그넷을 목표 운전온도인 20 K으로 냉각시키기 위해 열교환기를 냉각시키게 된다. MJ급 대용량 SMES에서는 열용량이 매우 크기 때문에 2단부의 전도냉각 효율을 높이기 위해 냉각면적을 증가시켰으며 열교환기에 연결된 무산소동 편조선에 의해 동일소재로 제작된 10개의 전도바를 통해 냉각되며, 전도바는 보빈을 냉각하게 된다. 최종적으로 보빈을 통해 SMES 마그넷의 전도냉각이 이뤄지게 된다.

무산소동 편조선을 사용하면 냉각시스템의 조립 시 열수축에 따른 기계적인 유연성을 제공하며 냉동기의 진동으로부터 HTS 마그넷을 보호할 수 있으며 전도바를 사용하면 최하단의 보빈까지 열을 전달할 수 있어 팬케이크 형태의 코일

의 단점인 구조적인 열전도를 보완할 수 있다. 보빈은 코일과 직접적으로 접촉되어 코일의 고정 및 냉각채널의 역할을 하며 제작 상의 편의를 고려하여 센터링과 냉각판 2가지 부품으로 구성 하였다. 보빈의 재료는 기계적강도가 우수하고 표면의 절연코팅 성능이 우수한 알루미늄 AL6061을 사용하였으며 열전도판의 두께가 두꺼우면 열용량이 커져 열적 안정도가 향상되어 전체 코일의 온도편차가 감소하게 되지만 전자기적 손실이 발생할 수 있고 시스템의 부피를 증가시키기 때문에 적합한 두께를 선정하여야 한다.

냉각을 위한 부품 외에도 SMES 마그넷에 전류를 충방전하기 위해 2개의 HTS 전류리드가 사용된다. 전류리드는 극저온에서의 물성값을 고려하여 충분한 전류용량을 지닐 수 있는 면적을 지니면서 전도 열 부하 감소를 위해서는 면적이 최소화 되어야 하므로 이를 모두 고려한 최적화된 디자인을 설계하였다. 설계된 전류리드는 구리부분과 HTS로 제작된 2가지 파트로 구성되며 냉동기 혹은 주변 금속재질 구조물과 전류리드 간의 전기적인 절연을 위해 G10 재질의 구조물을 사용하였고 복사열 최소화를 위해 열차폐막인 MLI를 사용하여 설계하였다.

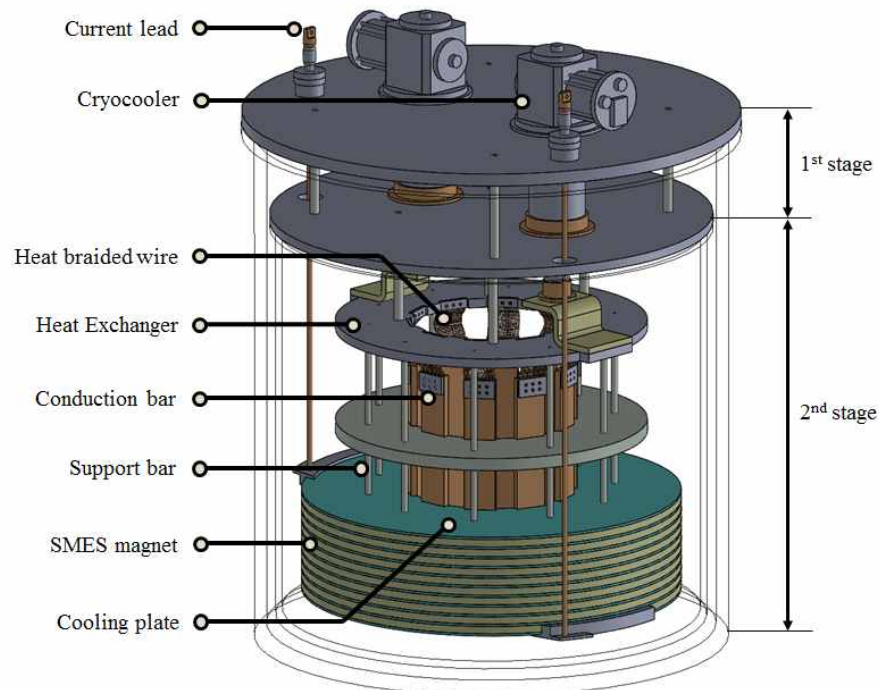


Fig. 22 Basic conceptual design of the 1 MJ SMES system

3. 풍력단지 출력보상용 SMES 시스템 운전특성 분석

설계된 SMES를 풍력발전단지의 변동출력 보상용으로 사용하면 변동률이 심한 구간에서 에너지를 충전 혹은 방전함으로써 변동률을 제어할 수 있다. SMES는 고밀도의 에너지를 높은 효율로 빠르게 충방전 할 수 있고 장시간의 충방전에도 수명감소가 없기 때문에 급변하는 기상조건의 변화에 지속적으로 보상이 이루어져야 하는 풍력발전단지의 출력을 보상하는 역할을 수행하기에 매우 적합한 성능을 지니고 있어 설계된 SMES를 풍력단지에 적용하면 큰 효과를 기대할 수 있다.

풍력단지의 변동출력은 기상조건에 의해 변화하기 때문에 보상에 요구되는 SMES의 출력 또한 수시로 변화하게 되며 이로 인해 SMES 마그넷 내부의 전류가 변화하게 된다. SMES 마그넷은 직류전류가 통전될 때는 손실이 발생하지 않지만 교류전류가 통전되면 교번자계가 발생하여 SMES 마그넷 내부 및 주변 부속품에서 교류손실이 발생할 수 있다 [20].

SMES에서 전류변화로 인해 발생할 수 있는 교류손실은 크게 초전도 선재 내에서 발생하는 자화손실과 주변 금속재질의 부속품에서 발생하는 와전류손실로 나눌 수 있다. 이러한 교류손실은 열을 발생시켜 열적으로 민감한 SMES의 성능을 저하시킬 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 교류손실에 대한 정확한 해석이 이루어져야 한다. 운전중 SMES의 손실 분석을 위해서는 저장에너지의 변화 패턴이 분석되어야 하는데 현재까지는 SMES를 실제 풍력단지에 적용한 사례가 없기 때문에 운전 시에 SMES의 저장 에너지변화에 대한 예시가 없어 시뮬레이션을 통해 변화 패턴이 분석되어야 한다.

따라서 풍력발전단지 적용 시에 SMES 내의 교류손실과 운전특성을 분석하였으며 손실을 분석하기에 앞서 SMES의 에너지 변화패턴을 분석하기 위해 실제 풍력발전단지 출력 데이터를 이용하여 모델링된 풍력발전단지에 SMES를 통해 변동출력보상을 수행할 때의 출력개선효과 및 SMES 내의 전류변화에 대해 분석하였다. 이후 분석된 SMES내의 전류변화 값에 따라 SMES 내에서 발생할 수 있는 교류손실들을 분석하고 최종적으로 기타손실까지 고려된 열 상승 효과를 분석하여 풍력발전단지 적용 시에 SMES의 안정도를 분석하였다.

3.1 충방전 특성 분석

풍력발전단지의 출력은 기상조건에 의한 영향을 받기 때문에 지속적으로 균일한 전력공급이 어려워 변동출력을 발생시킨다는 단점을 지니고 있다. 전체 발전설비 중 풍력발전에 의한 발전원의 비중이 높아지면 풍력단지에서 발생하는 변동출력은 계통의 안정도를 저해할 수 있다. 전기사업법 제15조 (송·배전용 전기설비의 이용규정)에 의한 신재생발전기 계통연계기준에 따르면 ‘유효전력 출력증발률 속도를 1분당 정격용량의 10%로 제한하는 것이 가능해야 한다.’고 명시되어있다 [21]. 현재는 인위적으로 출력을 제한하는 방법을 사용하여 변동출력을 제어하고 있지만 이는 이용률을 감소시키기 때문에 발전사업자의 입장에서는 큰 경제적 손실이 될 수 있다. 따라서 풍력발전단지의 변동출력 보상을 위해 에너지저장장치를 이용하여 변동 상승폭이 높은 구간에서 에너지를 흡수하여 충전해두었다가 감소폭이 클 때 방전하는 방식으로 풍력단지의 변동률을 제어하는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 이때 사용되는 EES는 급변하는 기상조건의 변화에 지속적으로 대처가 가능해야하기 때문에 장기간동안 대용량의 에너지를 효율적으로 빠르게 전달 할 수 있어야 한다.

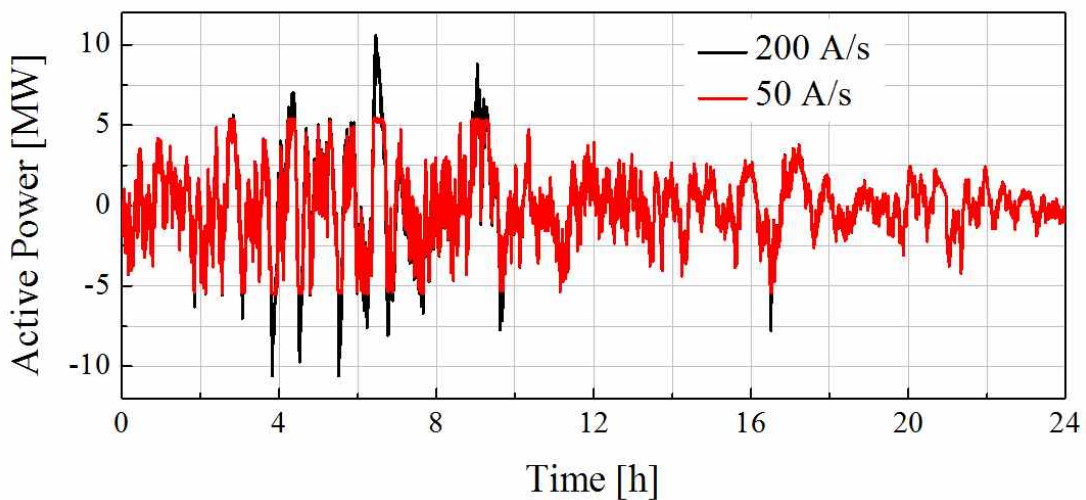


Fig. 23 Comparison of EES's output according to the charging and discharging velocity

Fig. 23은 동일한 사양의 EES를 사용하여 풍력단지의 평활화 보상시에 EES의 충방전 속도에 따른 출력을 나타내고 있다. 동일한 제어방법을 사용했음에도 불구하고 충방전 속도에 의해 EES가 보상 가능한 범위가 달라지는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 단지출력 개선효과 또한 차이가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 분석 결과를 통해 충방전 속도가 우수한 SMES를 활용하면 대용량의 에너지를 효율적으로 빠르게 전달할 수 있어 풍력발전단지의 변동출력 보상용으로 활용시에 큰 개선 효과를 기대할 수 있다.

SMES를 통해 풍력발전단지의 변동출력제어를 수행할 때의 출력개선효과 및 SMES의 전류변화 패턴을 분석하기 위해 실제 데이터를 기반으로 모델링된 풍력발전단지의 출력을 신재생발전기 계통연계기준을 따라 SMES를 통해 변동출력을 보상할 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 24는 EES를 이용한 변동출력 보상 방법에 대한 개요도를 나타내고 있으며 Fig. 25는 실제 풍력발전단지의 출력 데이터를 통해 실제와 유사한 출력을 구현하기 위해 PSCAD로 구현된 풍력발전단지의 모델링을 나타내고 있다 [7].

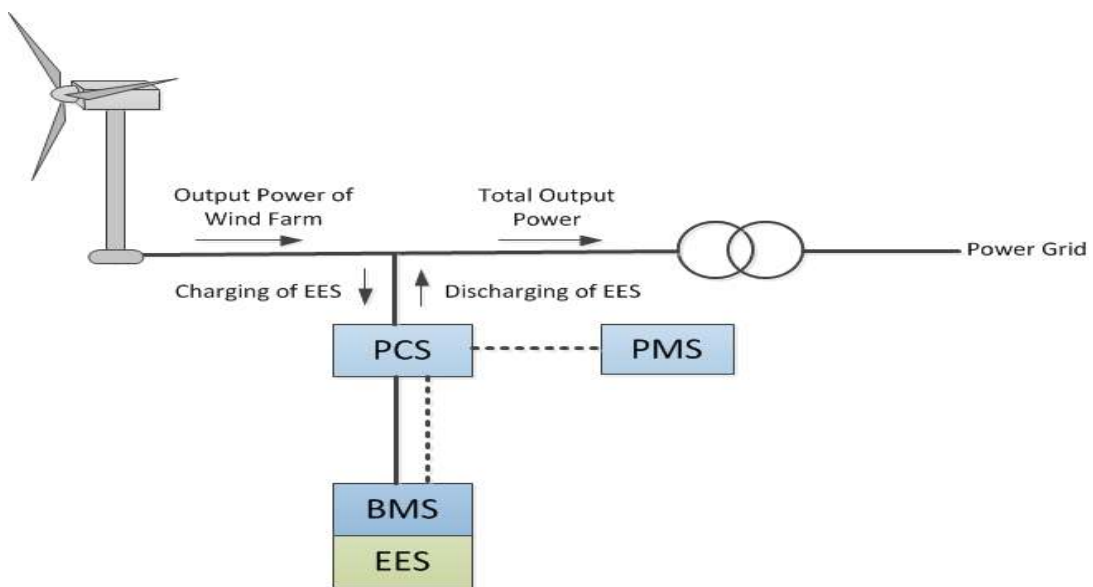


Fig. 24 Block diagram of the wind power system with EES

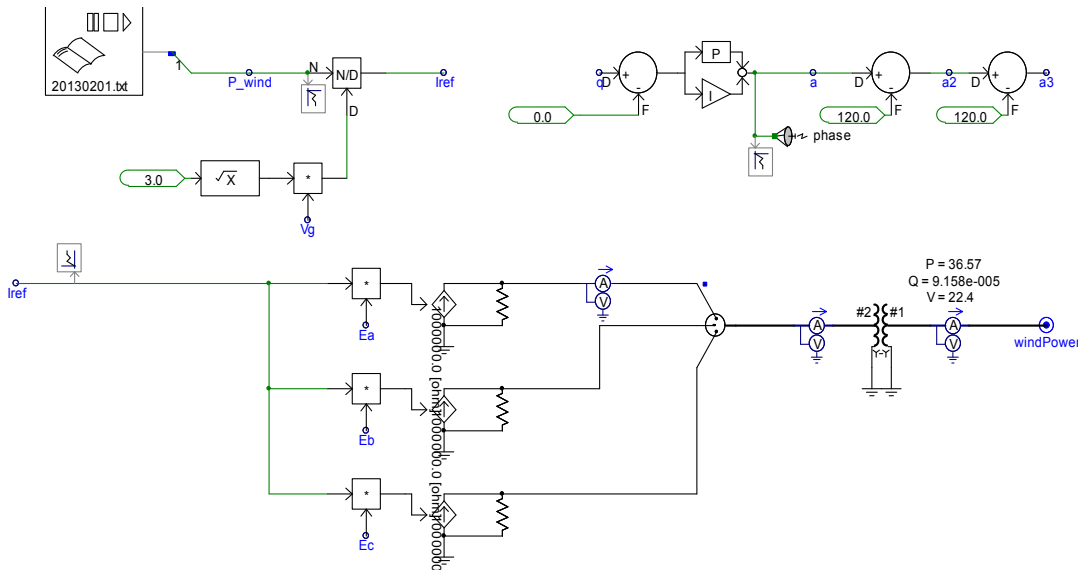


Fig. 25 Simplified wind farm model as current source

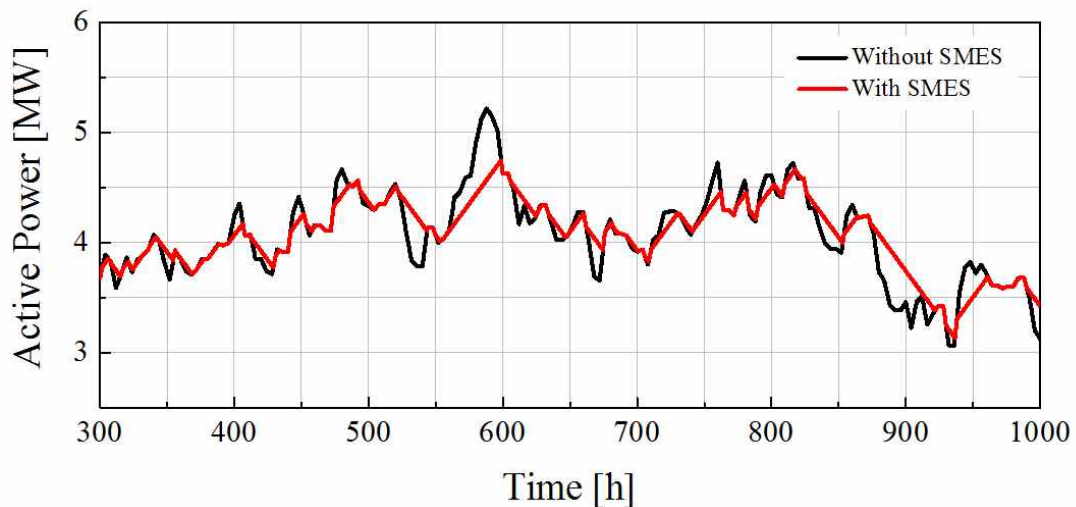


Fig. 26 Control method to compensate the fluctuation output

SMES는 풍력발전단지의 말단에 설치되어 제어 기준에 따라 전력변환장치를 거쳐 에너지를 충방전 하게 된다. 신재생발전기 계통연계기준규정에 적합한 제어를 위해 Fig. 26과 같이 실제 발전단지 출력을 기반으로 모델링된 3상 출력의 변동률을 분석하여 1분 동안 합산 값이 단지용량의 10%를 넘어설 경우 SMES에서 충방전을 수행하도록 하였다. 제어알고리즘을 통해 SMES에서 충방전 해야하는 전력이 분석되면 SMES의 단자전압과의 수치해석을 통해 3상 전력을 배터리에

요구하는 전력으로 환산시켜 SMES에서 보상량을 산정하게 된다. 이때 풍력단지의 변동출력 보상용 EES의 용량은 단지용량의 10% 가량이 적합한 것으로 알려져 있지만 본 논문에서는 SMES의 충방전특성 분석을 위해 요구 보상량을 산정하고 보상에 적합한 용량의 SMES를 통해 변동출력 보상을 수행하는 것을 가정하였다. 이때 안정적인 운전을 위해 방전한도를 SMES 총 용량의 20%로 설정하였으며 충전한도는 설계 시에 최대한도에서 안정도를 고려하여 설계하였기 때문에 100%까지 가능한 것으로 설정하였다. 최종적으로 SMES를 통해 보상된 출력을 3상 출력으로 생성하여 보상 전의 값과 비교하여 개선효과를 분석할 수 있도록 하였다.

분석대상으로는 제주지역 행원풍력발전단지를 선정하였다. 행원 풍력단지는 제주에너지공사에 의해 운영되는 단지로 총용량 9.795 MW, 각각 다른 제조사와 운전기간을 지닌 12기의 풍력발전기로 구성되어 있어 변동출력이 발생할 수 있는 가능성이 높아 분석대상 풍력단지로 적합하다고 판단하였다. 전반적인 보상패턴을 분석하기 위해 변동률이 심했던 겨울철의 하루동안의 데이터를 이용하였으며 하루 동안의 출력을 모두 분석할 수 있도록 전력변환기 및 스위치에서의 변환과정이 이상적으로 수행되며 SMES는 이상적인 전류원 형태로 가정하여 시뮬레이션 과정을 간략화 하였다.

행원풍력단지의 총 용량인 9.795 MW의 10%인 0.975 MW/min을 초과하는 변동출력이 발생할 시 SMES가 충방전 동작하여 변동률을 제어하게 되며 SMES의 단자전압을 6600 V로 선정하여 3.7 MW의 SMES를 통해 변동출력 보상을 수행할 때 제어레퍼런스에 의해 각 초당 SMES에서 보상해야 하는 전류의 변화는 Fig. 27과 같다. SMES가 제어레퍼런스를 통해 요구되는 출력에 이상적으로 변동률 보상을 수행할 시 출력개선효과는 Fig. 28와 같을 것으로 예측되며 이때 단위 SMES에서의 전류변화는 Fig. 29와 같으며 요구용량을 계산하여 선정하였기 때문에 용량부족 없이 충분한 보상이 이뤄졌음을 확인할 수 있었다.

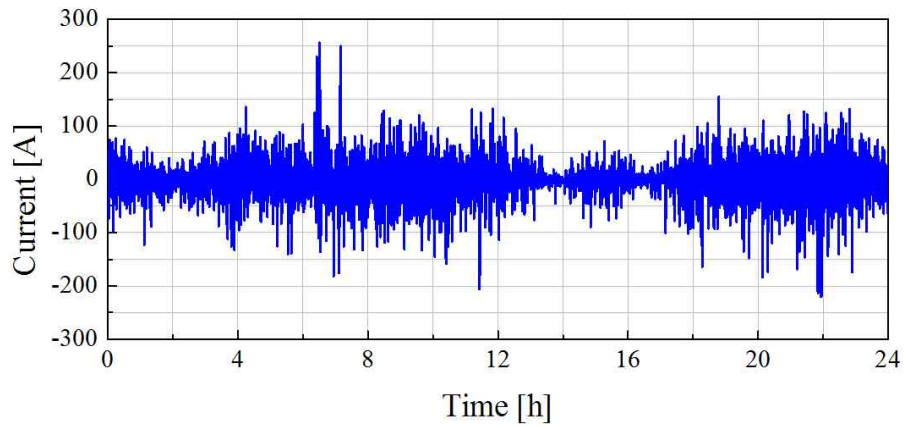


Fig. 27 Current requirements at each instantaneous time to compensate the wind farm

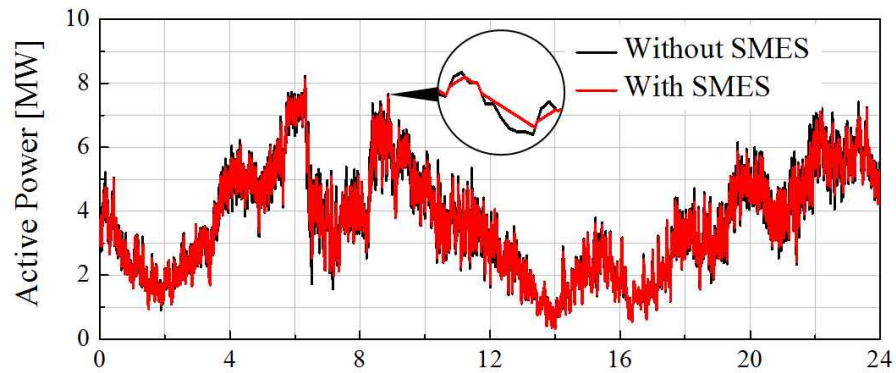


Fig. 28 Comparison of the output power of the grid with SMES and without SMES

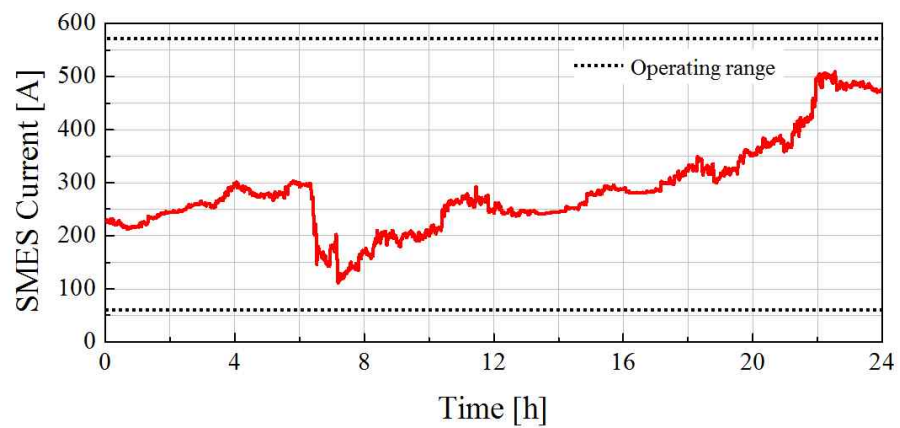


Fig. 29 Current variation at an unit SMES system

3.2 교류손실 분석

앞서 수행한 행원 풍력발전단지의 변동출력 보상 과정에서 Fig. 30과 같이 SMES내에 전류가 변화하게 된다. 전류변화에 의해 SMES에서 발생할 수 있는 교류손실은 초전도선재 내부에서 발생하는 자화손실과 와전류 손실 그리고 주변 부속품에서 발생하는 와전류 손실로 나눌 수 있다. 선재내의 초전도 층에서 교번자계가 발생 시 안정화 층에서 와전류 손실이 발생하게 되지만 2G HTS 선재에서는 그 값은 매우 작은 것으로 분석되어 있어 본 논문에서는 선재내의 자화손실과 주변 부속품에서의 와전류를 분석하였다. 따라서 앞서 수행한 행원 풍력발전단지의 변동출력 보상 중에 발생하는 SMES내의 전류변화에 의한 손실을 계산하기 위해 분석된 SMES의 전류변화 데이터 중 각 손실이 크게 발생할 수 있는 구간을 추출하여 손실해석을 진행하였다. 교류손실의 분석은 수치해석과 시뮬레이션을 이용하여 수행되었으며 시뮬레이션의 해석의 분석시간 단축을 위해 각각의 손실이 크게 발생할 수 있는 60초를 선정하여 손실해석을 진행하였으며 이후 수행할 열해석을 위해 각 손실의 최대값을 분석하였다.

3.2.1 자화손실

초전도 선재에 교류 전류를 통전시키면 교번자계가 발생하고 자속침투에 의해 부분적으로 상전도 성질을 가지는 구간이 나타나게 된다. 이때 교번자계에 의해 이 구간에서 히스테리시스 손이 발생하게 되며 이를 초전도 선재의 자화손실 이라고 한다 [22]. 이러한 손실은 기존의 구리선에서 발생하는 손실에 비하면 매우 작은 크기 이지만 이러한 손실에 의해 발생하는 열에 대한 냉각이 충분히 이루어지지 않으면 초전도 선재의 온도를 상승시키게 되어 SMES 마그넷의 소손 및 기기의 고장을 유발하게 된다.

본 논문의 설계에 사용된 2G HTS 선재는 구조적 특징으로 인한 이방성 특성을 가진다. 따라서 자화손실 또한 수직방향에서 가해지는 자기장에 의한 손실이 수평방향에 의한 손실보다 매우 큰 것으로 분석되어 있기 때문에 2G HTS 선재를 활용한 초전도 기기에서는 수직방향에 대한 자기장 성분을 줄이는 것이 매우

중요하다 [23]. 따라서 선재내의 손실은 수직방향 자기장에 의한 값을 분석하였으며 SMES 마그넷에서 수직방향 자기장에 의해 발생하는 교류손실을 Brandt strip 모델을 통해 계산하면 식 (4)와 같다.

$$P_{\perp} = \frac{2\pi w (B_a)^2}{2\beta d \mu_0} \left[\frac{2\ln(\cosh(\beta))}{\beta} - \tanh(\beta) \right] Vf \text{ [W]} \quad (4)$$

$$B_p = \frac{\mu_0 J_c d_c}{\pi} \text{ [T]} \quad (5)$$

여기서 w 와 d 는 선재의 폭과 두께이며 μ_0 은 진공중의 투자율이다. β 는 B_a/B_p 를 의미하며 이때 B_a 는 수직방향 쇄교자속밀도이며 B_p 는 선재의 임계침투 자속밀도 V 는 부피, f 는 주파수를 의미한다. 임계침투 자속밀도는 식 (5)와 같이 구할 수 있으며 이때 J_c 는 임계전류밀도를 의미하며 d_c 는 선재내의 초전도 층의 두께를 의미한다. 초전도 선재의 폭과 두께 진공중의 투자율은 고정 값이기 때문에 자화손실은 수직방향 쇄교자속밀도와 β 에 의해 결정되며 β 를 결정하는 임계침투 자속밀도는 임계전류밀도의 영향을 받는다. 2G HTS 선재의 특성에 의해 Fig. 10과 같이 임계전류는 수직방향 쇄교자속밀도에 의해 결정되므로 임계전류밀도 또한 쇄교자속밀도에 의해 결정되며 보상중에 자속밀도가 변화하기 때문에 각 자속밀도별 임계전류밀도가 분석되어야한다. 자속밀도는 전류의 크기에 비례하기 때문에 전체구간 중 60초간의 평균전류가 가장 높은 구간을 자화손실의 분석구간으로 선정하였으며 Fig. 30과 같다.

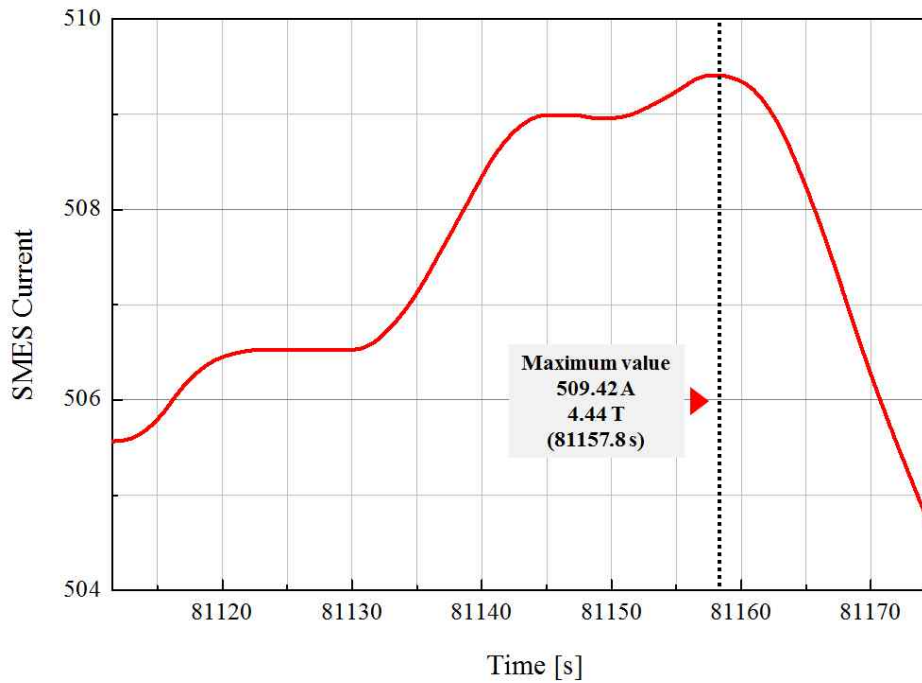


Fig. 30 Section positioning to analysis magnetization loss of the SMES coil

선정된 구간에서 수직방향 자속밀도 값을 분석하기 위해 3D FEA 시뮬레이션을 이용하여 SMES내의 운전전류 변화로 인한 교번 자기장을 분석하고 이를 수직방향 성분과 수평방향 성분으로 분리하여 초전도 선재에 수직방향으로 가해지는 자기장을 분석하였다. 앞서 2장에서 분석된 것과 같이 SMES 마그넷에 쇄교되는 수직방향 자속밀도의 값은 각 코일별로 비슷한 값을 지니게 된다. 열해석에서는 발생할 수 있는 최대손실을 고려하여 해석을 진행하기 때문에 10개의 각 코일별로 매초마다 발생하는 최대 수직방향 자속밀도의 값을 추출하였다. 분석 결과 가정과 동일하게 SMES 저장 에너지가 높은 구간에서 높은 자속밀도가 발생함을 확인할 수 있었으며 그 중 최대가 되는 81157.8초에서의 값을 이용하여 최대 수직방향 자속밀도 값을 계산하였으며 이때의 각각의 자속밀도에 따른 임계전류밀도 값과 식 (4)를 통해 각 코일에서 발생하는 최대 자화손실값을 Table 5에 나타내었다. 이때 주파수는 전류 결과 값을 기준으로 발생할 수 있는 전류 변화를 교류전류로 가정하여 1/60로 적용하였다.

Table 5 Maximum magnetic flux density in the perpendicular direction and the critical current density of each coil

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	Coil 5	Coil 6	Coil 7	Coil 8	Coil 9	Coil 10
B_{\perp} [T]	4.441	3.413	2.510	1.675	0.889	0.897	1.678	2.511	3.409	4.444
J_c [A/m ²]	228.9 ×10 ⁶	279.1 ×10 ⁶	342.8 ×10 ⁶	424.9 ×10 ⁶	530.1 ×10 ⁶	528.9 ×10 ⁶	424.5 ×10 ⁶	342.7 ×10 ⁶	279.3 ×10 ⁶	228.8 ×10 ⁶
Magnetization loss [W]	0.140	0.131	0.118	0.097	0.062	0.063	0.097	0.118	0.131	0.140

3.2.2 와전류 손실

초전도 마그넷에서 발생하는 교번자계의 영향권에 있는 부속품 중 높은 도전율을 가지고 있는 재질로 구성된 부속품에서는 와전류가 발생하게 되며 이는 각 부품에서 저항손이 발생하는 원인이 된다. SMES의 구성품 중 마그넷과 접촉하여 냉각을 전달하는 역할을 수행하는 전도바와 보빈은 비자성체인 다른 구성품에 비해 도전율이 높고 초전도 마그넷에 매우 인접하여 교번 자기장에 의한 와전류 손실이 크게 발생할 수 있다. 따라서 3D FEA 시뮬레이션을 통해 운전 중에 전도바와 보빈에서 발생할 수 있는 와전류 손실을 측정하였다. 이때 보빈은 냉각판과 센터링 두 부품으로 나누어 해석하였으며 이때 운전온도인 20 K에서의 각 부품의 물성 값을 고려하였다. 와전류는 초당 전류변화율에 의해서 발생하기 때문에 전류데이터 중 각 초당 변화량의 절대 값을 합산한 값이 가장 큰 60초 구간을 분석구간으로 선정하여 해석을 수행하였다. 와전류 손실 분석구간과 분석된 총 와전류손실을 Fig. 31에 나타내었다.

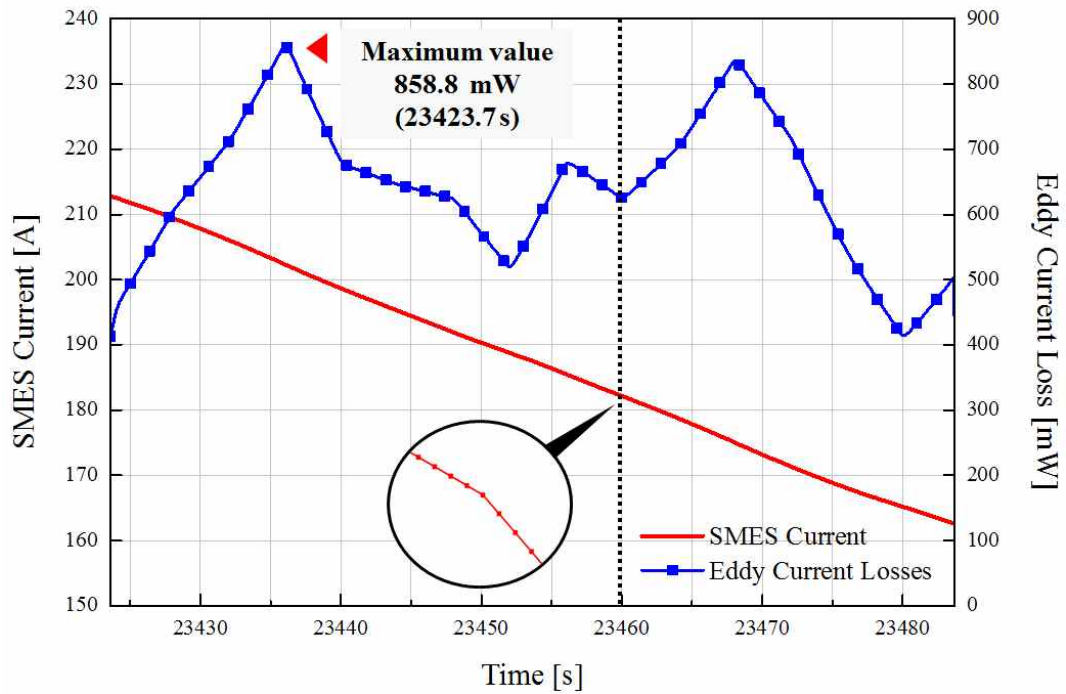


Fig. 31 Section positioning to analysis eddy current loss and total eddy current loss of adjacent parts of SMES magnet

분석결과에 따라 분석구간 중 23423.7초에서 가장 높은 와전류 값이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 이때의 각 부품에서의 와전류 밀도 분포는 Fig. 32, 33, 34와 같다. 와전류는 각 부품을 순환하는 형태로 발생하게 되며 각 부품별로 높은 와전류 밀도가 발생하는 구간이 존재함을 확인할 수 있다. 냉각판에서는 높은 자기장이 발생하는 마그넷의 중심부와 인접한 구간에서 높은 와전류 밀도가 발생하였으며 전도바와 센터링은 서로간의 접촉부에서 높은 와전류 밀도가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

분석된 모델에서 와전류에 의한 저항손실 분포는 Fig. 35와 같다. 각 부품에서 높은 와전류 밀도가 발생하는 위치에서 높은 저항손실이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 높은 자기장이 발생하는 SMES 마그넷의 중심부에 인접한 전도판에서 가장 큰 저항손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 열해석을 위해 최대 손실이 발생하는 23423.7초에서의 각 부품에서의 손실을 Table 6에 나타내었다.

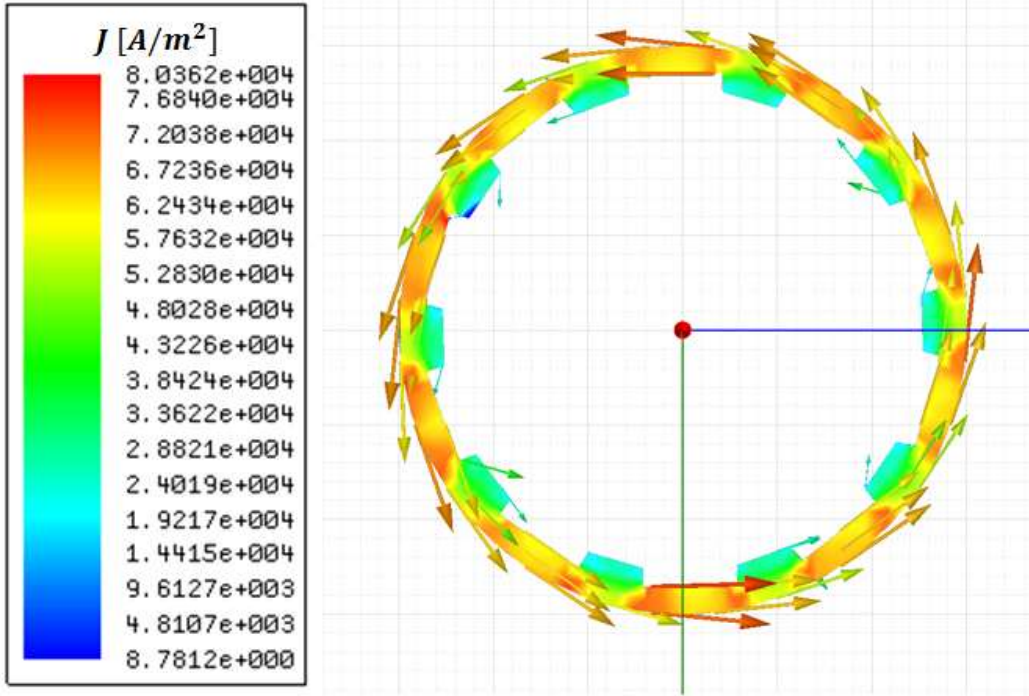


Fig. 32 Eddy current density distribution calculated at the center ring part

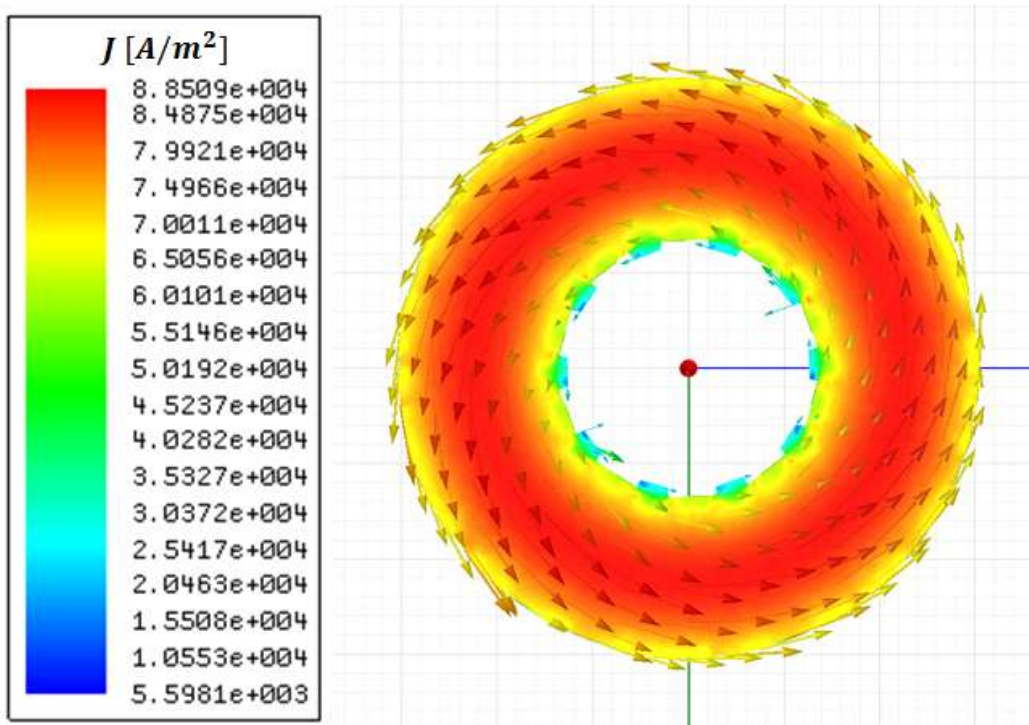


Fig. 33 Eddy current density distribution calculated at the cooling plate part

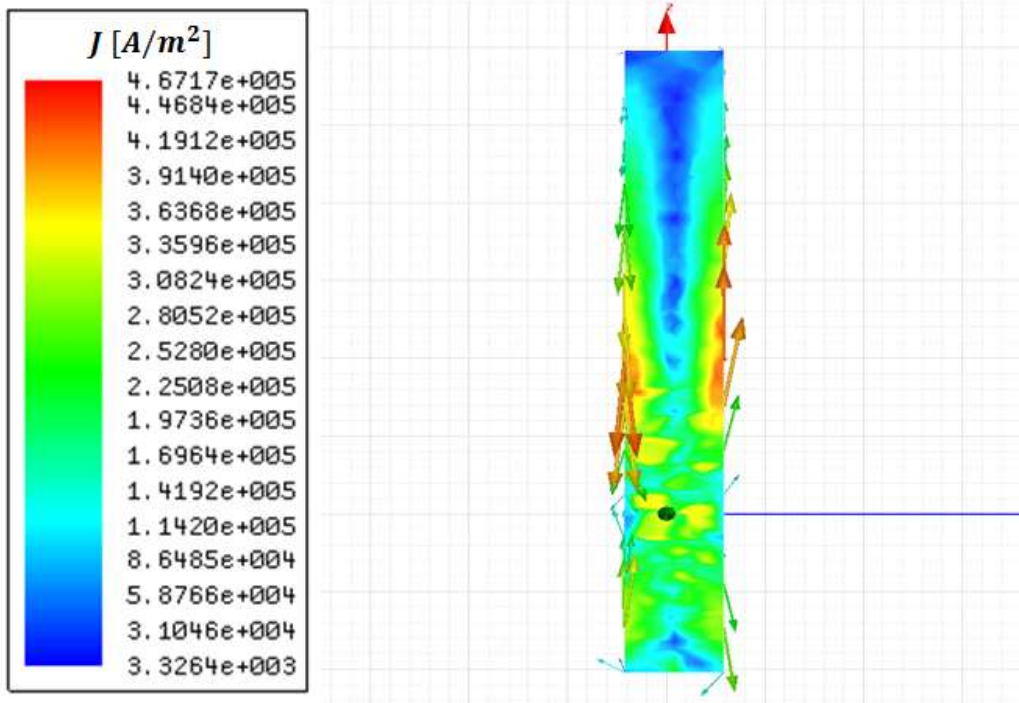


Fig. 34 Eddy current density distribution calculated at the conduction bar

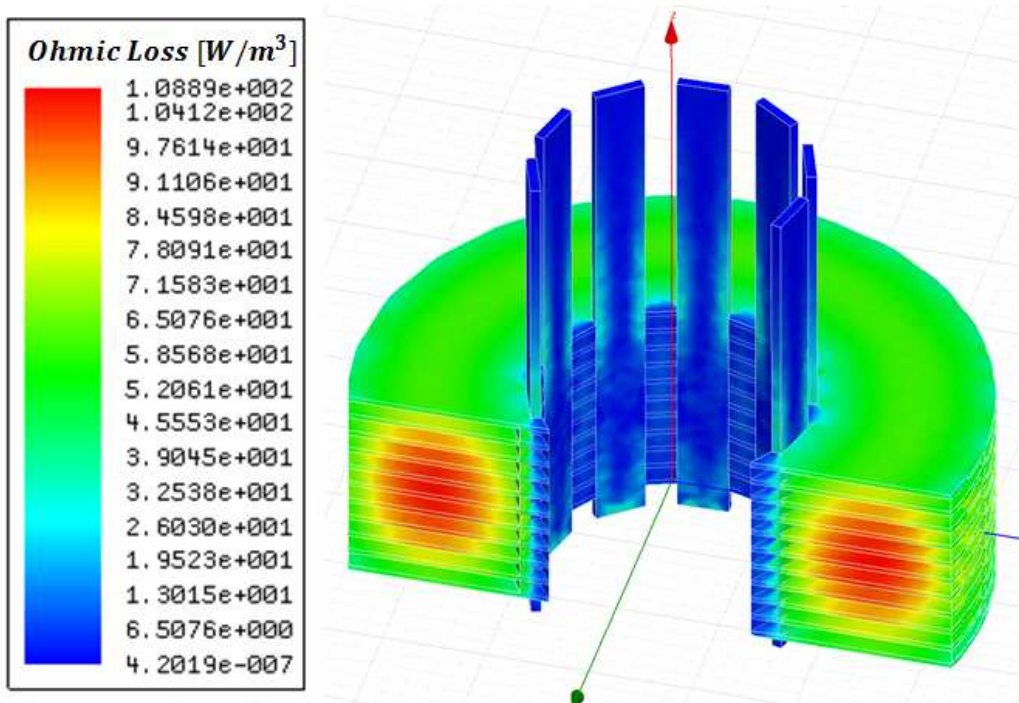


Fig. 35 Ohmic loss distribution at adjacent parts of SMES magnet

Table 6 Eddy current losses of each component parts

	Center ring [mW]	Cooling plate [mW]	Conduction bar [mW]
1	0.005866	0.04894	0.001514
2	0.006909	0.060909	0.001571
3	0.007738	0.070577	0.001597
4	0.008331	0.077742	0.001527
5	0.008665	0.082148	0.001574
6	0.00865	0.083735	0.001535
7	0.008384	0.0825	0.001588
8	0.007828	0.078265	0.001576
9	0.007024	0.071393	0.001577
10	0.006001	0.061888	0.001568
11	-	0.050149	-
Total	0.075396	0.768244	0.015628

기존의 수행된 연구 결과에 의하면 높은 와전류손실이 발생하는 전도판을 분할구조로 제작 하거나 높은 와전류가 발생하는 구간에 슬릿을 내어 제작할 시 와전류 손실을 크게 줄일 수 있는 것으로 분석되어 있다 [24]. 따라서 향후 SMES 시스템 제작 시에 와전류 손실 감소 방안 모색을 위해 전도판에 슬릿을 주었을 때 감소효과를 분석하였다. 분석 모델은 Fig. 36과 같았으며 가장 높은 와전류가 발생한 냉각판의 중심 부근에 10개의 슬릿을 주었을 때의 와전류 손실 해석을 시뮬레이션 한 결과 Fig. 37과 같았으며 최대 와전류 손실을 300 mW가량 감소 시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

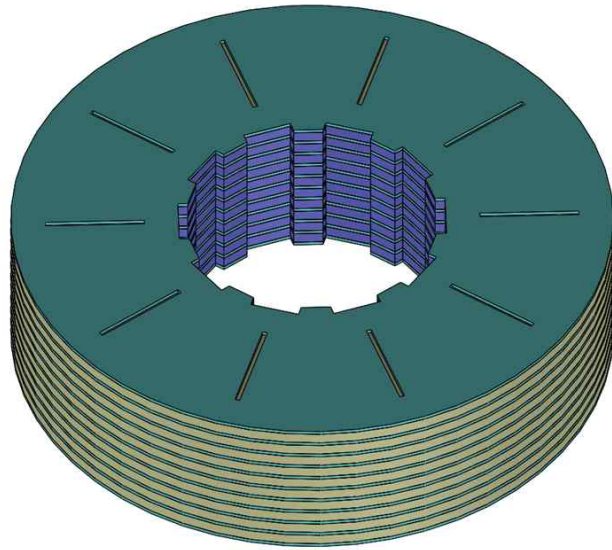


Fig. 36 Modeling to analysis the slitting effect in the cooling plate

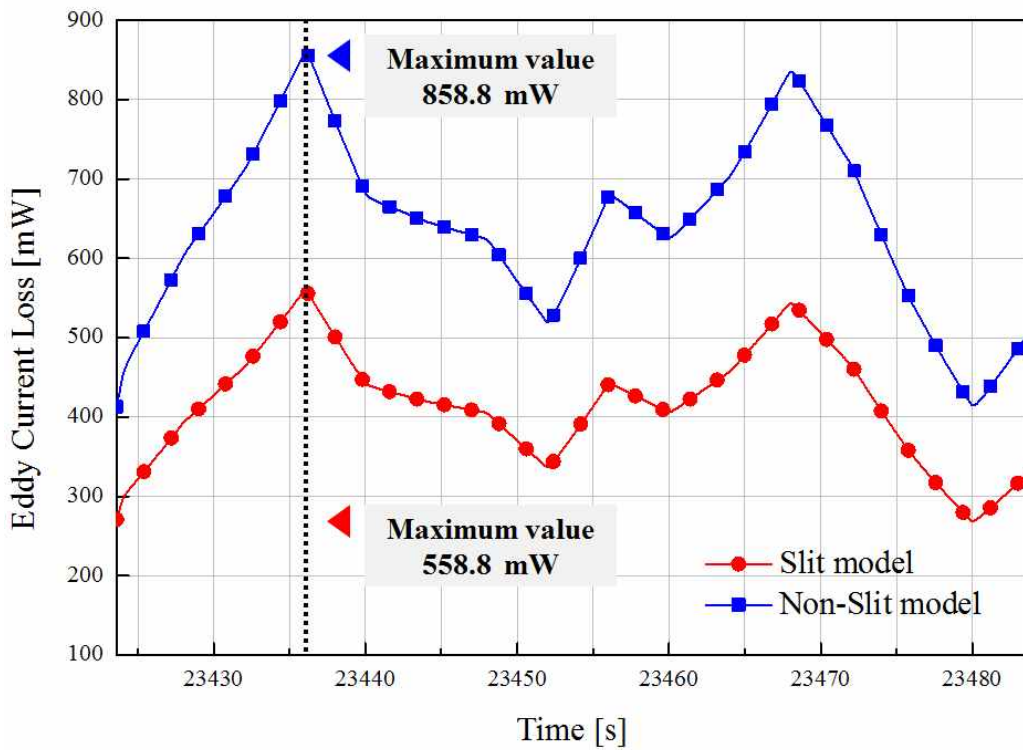


Fig. 37 Comparison of total eddy current losses of adjacent parts of SMES magnet with slit and non slit model

3.3 열적 안정도 분석

분석된 교류손실들은 풍력발전단지의 출력에 따라 변화하기 때문에 예상하기 어려운 열손실을 발생시킬 수 있다. 발생한 열은 열전달 경로를 통해 극저온 냉동기 2단으로 방출되지만 그 값이 냉동기의 용량보다 커지면 코일의 냉각이 제대로 이루어지지 않아 선재의 임계 전류 값을 저하시킬 수 있으며 이로 인해 퀘칭을 발생시킬 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 발생하는 손실로 인한 발열 현상이 분석되어야 한다. 따라서 풍력단지 운영 중에 발생하는 발열현상을 예측하기 위해 3.2절에서 분석된 전류변화에 의해 발생하는 손실 값과 SMES의 운전 중에 발생하는 기타 손실을 분석하여 운전시의 온도변화를 분석하였다. 운전중에 발생할 수 있는 극한상황을 가정하기 위해 각 손실들의 최대값이 동시에 발생한다고 가정하여 각 손실의 최대 값을 사용하였으며 분석에는 전도바부터 코일 하단부까지의 모델을 이용하였고 2단부 외의 부품은 상부와의 온도차로 인해 전도열이 발생할 수 있는 전류리드만을 고려하였다. 분석 모델에서 발생할 수 있는 손실들에 대해 Fig. 38에 나타내었다.

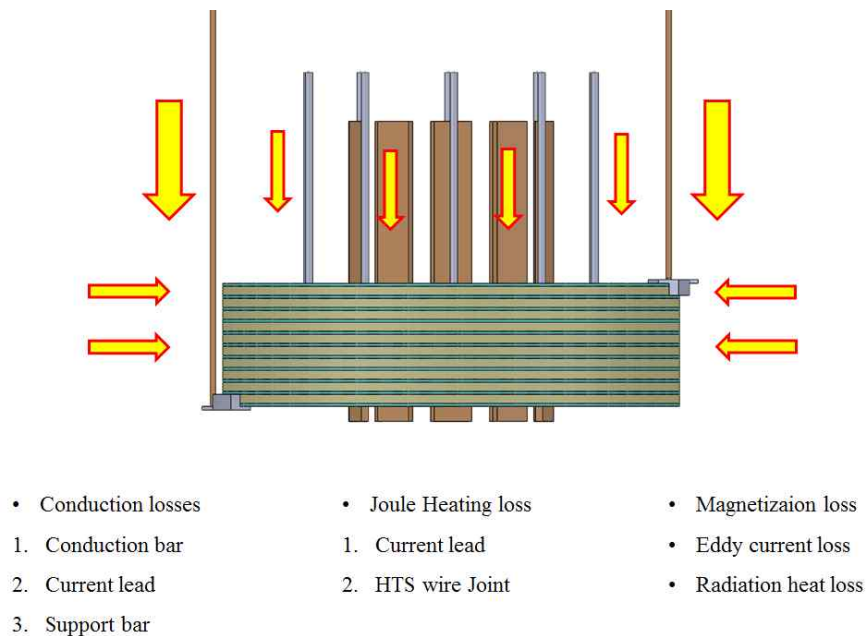


Fig. 38 Modeling to compute the thermally conduction and radiation losses

손실이 발생하여 전도바 상단부와 코일 하단부간에 온도차이가 발생하게 되면 시스템의 지지에 사용되는 FRP 지지대와 열전도를 위한 전도바에서 전도손실이 발생할 수 있다. 이때의 전도 손실 값은 식 (6)과 같다. 여기서 k 는 열전도도, A 는 부품의 단면적, δ 는 부품의 길이, ΔT 는 온도차를 의미한다.

$$Q_t = \frac{kA}{\delta} \Delta T \quad (6)$$

SMES 마그넷 내에서는 자화손실 외에도 초전도선재의 장선화를 위해 접합에 사용되는 조인트에서의 손실이 발생하며 이때 발생하는 손실은 식 (7)과 같다. 이때 각각 N_j 는 조인트의 개수, I 는 통전전류, R_j 조인트의 총 저항을 의미한다.

$$Q_j = N_j I^2 R_j \quad (7)$$

SMES 마그넷에 전류를 인가하는 전류리드는 상온부터 저온부에 연결되어 있기 때문에 상단과의 온도차에 의해 전도손실이 발생하게 된다. 본 논문에서는 1단부에서는 구리 2단부에서는 HTS로 제작된 전류리드를 사용했다고 가정했으며 1단부에서 전류리드를 냉각시키기 때문에 상온에서의 전도열침입을 막을 수 있는 것으로 가정하였으며 1단부부터 SMES 마그넷까지는 HTS 전류리드를 사용하여 전도열침입과 저항손실을 크게 감소시킬 수 있는 설계안을 채택했다. 따라서 1단부의 목표 운전온도인 77 K부터 2단부의 목표 운전온도인 20 K의 온도차에서 HTS 전류리드에서 발생하는 전도열이 고려되었으며 HTS 전류리드를 사용함에 따라 저항손실은 없는 것으로 고려하였다. 전류리드에서의 열손실은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며 이때 T 는 온도, A 는 전류리드의 단면적, z 는 전류리드의 길이, $k(T)$ 는 HTS전류리드의 열 전도도, $\rho(T)$ 는 HTS 전류리드의 저항율을 각각 의미한다.

$$Q = \left(k(T)A \frac{dT}{dz} + \rho(T)I^2 \frac{dTdz}{A} \right) \quad (8)$$

또한 SMES 시스템에서는 복사열 방지를 위해 진공용기의 외부에 차폐막이 있음을 가정하였으며 이로 인해 복사열을 크게 감소시킬 수 있다. 따라서 운전 중에 발생하는 기타 열손실들을 계산하여 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Generating losses during the operation of SMES

Loss	Value [W]
Radiation heat loss	0.891
Conduction loss G10 - Rods	0.016
Conduction loss Copper plate	10.12
Joint heating loss	0.937
Current lead - HTS parts	0.12

3.2절에서 분석된 전류변화로 인해 발생하는 자화손실과 와전류손실의 최대값과 기타손실들의 값을 이용하여 열해석을 진행하였다. 운전 중 상태를 고려하기 위해 운전중에 20 K까지 충분한 냉각이 이루어 열적으로 안정화 된 상태에서 손실이 발생하는 상황을 가정하였으며 냉각은 전도바의 상단부의 접촉면을 통해서 20 K으로 냉각된 것으로 가정하였다. 열해석 시뮬레이션을 이용하여 3차원으로 도식된 열해석 모델에 각각의 손실 값을 입력하여 온도 상승분포를 분석하였으며 이때의 결과 값은 Fig. 39과 같았으며 약 4.2 K가량의 온도 상승이 발생했음을 확인할 수 있었다. 최초 설계시 30 K의 운전까지 고려하여 설계하였기 때문에 풍력단지의 변동출력 보상이 발생할 수 있는 최대 손실에 대해 설계된 SMES가 안정적으로 보상을 수행할 수 있었음을 확인할 수 있었다.

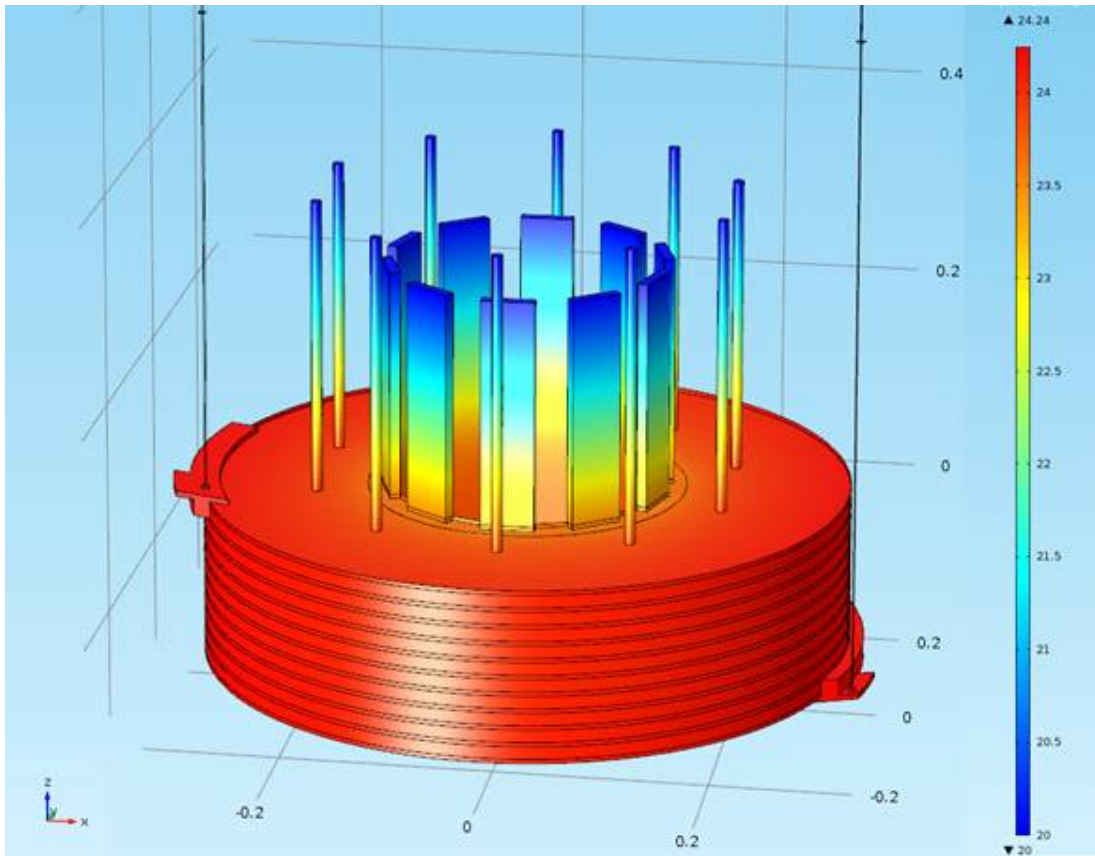


Fig. 39 Temperature distribution of the SMES system during the operation of 1 MJ class SMES magnet

4. 결 론

SMES는 풍력단지의 변동출력 보상용 EES로 사용하기 매우 적합한 성능을 지니고 있지만 추가비용을 발생시켜 풍력발전단지의 경제성을 결정하기 때문에 비용대비 효율을 극대화 할 수 있는 설계가 이루어져야 한다. 또한 변동출력 보상 중에 SMES내에서 발생하는 손실이 안정도를 저해할 수 있기 때문에 SMES의 안정적인 운전을 위해 운전 중 발생하는 손실에 대한 예측이 이루어져야 한다.

따라서 본 논문에서는 향후 풍력발전단지의 변동출력 보상을 위한 SMES의 활용방안을 모색하기 위해 풍력발전단지 출력 보상용 SMES를 설계하고 시뮬레이션 프로그램과 수치해석을 이용하여 계통적용시의 SMES의 운전특성해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같았다.

1) SMES 마그넷은 2G HTS 선재인 REBCO선재를 사용하여 다중 팬케이크형태의 마그넷으로 설계되었으며 이때 마그넷의 경제성을 극대화하기 위해 마그넷의 형상, 선재사용량, 인덕턴스간의 상호관계 패턴을 분석하여 최소한의 선재를 사용하여 목표 인덕턴스를 구현할 수 있는 방안을 모색하였다. 또한 3D 전자장 해석을 통해 설계된 마그넷의 안정도를 분석하였다.

2) 설계된 SMES를 풍력발전단지의 출력보상용으로 사용했을 때의 운전특성을 분석하기 위해 실제 풍력단지 출력을 이용하여 모델링된 풍력단지의 출력이 신재생에너지 계통연계기준에 부합하는 출력을 가지도록 SMES 이용하여 변동출력을 보상시에 단지출력 개선효과 및 SMES내의 충방전 특성을 분석하였다.

3) SMES내의 에너지변화로 인한 안정도를 분석하기 위해 운전중에 발생할 수 있는 손실들과 이로인한 발열을 분석하였다. 운전 중 발생할 수 있는 최대 손실을 분석하기 위해 전체 보상구간 중 각 손실이 크게 발생할 수 있는 구간을 추출하여 3D FEA 시뮬레이션 및 수치해석을 통해 추출된 구간에 대해 손실해석을 수행하였으며 각손실의 최대값을 이용하여 열해석을 수행한 결과를 통해 안정적

인 운영이 가능함을 확인할 수 있었다.

따라서 설계된 SMES를 대상 풍력발전 단지에 적용시에 효과적으로 출력보상을 수행할 수 있을 것으로 분석되었으며 이때 SMES시스템에서 발생할 수 있는 손실에 대해 SMES가 열적으로 안정적인 운전이 가능할 것으로 예측되었다. 해석결과를 통해 향후 풍력발전단지의 출력보상을 위한 실제 SMES시스템을 제작시에 매우 유용한 데이터가 될 수 있을 것으로 보이며 시스템의 도입 시에 풍력단지의 안정도 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] A. C. Rose Innes, E. H. Rhoderick, "기초 초전도 물리학," 겐지사, 1996.
- [2] G. W. Hong, "초전도 선재와 전력기기 응용," 물리학과 첨단기술, pp. 21~26, 2011.
- [3] Abbas A. Akhil, "DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA," Sandia national laboratories, 2013.
- [4] "Global wind report annual market update", GWEC, 2013.
- [5] 김호민, "해상풍력용 발전기 기술 및 전망," 초전도와 저온공학, 13권 1호, pp.13, 2011.
- [6] Anna Arestova, Yury Sidorkin, "The use of wind farms and virtual power plants for emergency control in the future smart super grids," in Proc. Int. 6th International Forum on Strategic Technology, vol. 1, pp. 437~442, 2011.
- [7] 진경민, "풍력발전단지의 유효전력 증발률 조정을 위한 BESS 용량 산정," 제주대학교 풍력특성화협동과정, 석사학위 논문, 2013. 8.
- [8] A. R. Kim, H. R. Seo, G. H. Kim, M. Park, I. K. Yu, Y. Otsuki, J. Tamura, S. H. Kim, K. Sim, and K. C. Seong, "Operating characteristic analysis of HTS SMES for frequency stabilization of dispersed power generation system," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no.3 , pp. 1334~1338, 2010.
- [9] K. Kim, A. R. Kim, J. G. Kim, M. Park, I. K. Yu, M. H. Sohn, B. Y. Eom, K. Sim, S. Kim, H. J. Kim, J. H. Bae, K. C. Seong, "Analysis of operational loss characteristics of 10 kJ class toroid-type SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no.3 , pp. 1340~1343, 2011.
- [10] 서형주, 김아롱, 김재호, 박민원, 유인근, "형상에 따른 HTS SMES 코일의 최적설계," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 2249~2250, 2008.

- [11] Charles P. Poole, Jr., "Handbook of superconductivity," Academic press, 2000.
- [12] 강명훈, "마그넷 형상에 따른 고온초전도 마그넷의 에너지와 인덕턴스," 전기학회 논문집, 60권, 6호, pp. 1134~1139, 2011
- [13] C. J. Kim, G. W. Hong, "제2세대 초전도 선재- Coated conductors," Bulletin of the Korean institute of electrical and electronic material engineers, Vol. 15, No.8, pp. 19~25, 2002.
- [14] SuperPower 2G HTS Wire Specifications, Superpower
- [15] Ji Hyung Kim, Sail Park, Ho Min Kim, "Magnetic field analysis of the field coil for 10 MW class superconducting wind turbines," Superconductivity and cryogenics, vol. 14, no. 3, pp. 18~22, 2012
- [16] J. H. Kim, S. Hahn, C. H. Im, J. K. Kim, H. K. Jung, S. Hahn, "Design of 200 kJ SMES Coil with HTS wires," 2001 한국 초전도 저온 공학회 학술대회 논문집, pp. 57~60, 2001.
- [17] Drew. W. Hazelton, "Applications using Superpower 2G HTS conductor," 2011 CEC/ICMC, Spokane, WA, 2011
- [18] 김지형, "풍력용 10MW급 고온초전도 동기발전기의 3차원 전자장 설계 및 출력특성 해석," 제주대학교 전기공학과, 석사학위 논문, 2014. 2.
- [19] J. H. Bae, S. H. Kim, H. J. Kim, M. H. Sohn, K. C. Seong, H. M. Kim, "Design fabrication and evaluation of a conduction cooled HTS magnet for SMES," Physica C: Superconductivity, Vol. 469, Issues 15 - 20, Pages 1794~1798, October, 2009.
- [20] S. Lee, S. H. Park, W. S. Kim, J. K. Lee, S.j. Lee, C. Park, J. H. Bae, S. H. Kim, K. C. Seong, K. Choi, S. Hahn, "Analysis of eddy current losses and magnetization losses in toroidal magnets for a 2.5 MJ HTS SMES," IEEE Trans. Applied superconductivity, vol. 21, no. 3, June 2011.
- [21] KEPCO 한국전력, "송·배전용전기설비 이용규정 : 별표 6 신재생발전기 계통연계기준," 2013.

- [22] C. P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductors," *Phys. Rev. Lett.*, 8, pp. 250~253, 1962.
- [23] E. H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," *Physical B* 48, pp 12893~12906, 1993.
- [24] M. Park, S. Kwak, S. Lee, W. S. Kim, J. Lee, K. Choi, J. Bae, S. Kim, K. Sim, K. S. H. Jung, S. Hahn, "Analysis of eddy current loss in conducting cooling plate for 600 kJ SMES," ICEMS. International conference on Electrical machines and systems, pp. 1744~1747, Oct. 2007.
- [25] T. D. Le, J. H. Kim, S. Park, D. H. Kang, H. Lee, Y. S. Jo, Y. S. Yoon, H. M. Kim, "Thermal design of cryogenics cooling system for 10 MW class high temperature superconducting rotating machine," Applied superconductivity conference 2014, June 2014.

감사의글

많은 분들의 도움속에 2년 6개월동안의 석사과정을 마치게 되었습니다. 졸업을 한다고 생각하니 무엇인가 이뤘구나 하는 마음에 성취감이 찾아오지만 이제와 고백하자면 사실 처음 대학원에 발을 들였을 때 마냥 즐거운 마음은 아니었던 것으로 기억합니다. 학부를 졸업한 뒤로는 실패가 거듭되는 나날들이었고 그 과정에서 ‘나는 너무 부족하고 스스로 할 수 있는게 없다.’ 라는 생각을 하며 자신감을 잃어만 갔습니다. 마음속에 도전, 열정이라는 단어는 점점 사라져갔고 누군가가 저를 이끌어주었으면 좋겠다는 막연한 기대를 했습니다. 사실 대학원을 선택 했던 것은 그런 기대 때문이었습니다. 대학원에서 주어진 대로 걸어가면 석사라는 타이틀, 부끄럽지 않은 직장, 적당한 경제력이 자연스럽게 생길 것이라는 막연한 기대를 했습니다. 하지만 그런 마음으로 들어왔던 대학원에서의 생활은 순탄치 못했습니다. 대학원 생활은 스스로 하려는 의지 없이는 무엇인가를 얻을 수 없는 곳이었고 저는 뭔가를 하려는 의지는 없이 당장 손에 잡혀있는 것이 아무것도 없다는 조급한 마음에 항상 눈에 보이는 결과물만을 좇으려했고 처음 기대와는 달리 항상 제자리걸음을 해야 했습니다. 그래서 항상 처음모습과 같이 부족했고 실패가 계속될 때마다 좌절하며 ‘이번에도 역시 실패하는 것인가’라는 불안감에 좌절하고 실망해야 했습니다. 이제와 돌아보니 그렇게 포기하고 싶은 순간이 많았음에도 지금처럼 무사히 학위를 이수 할 수 있었던 것은 주변에서 힘이 되주신 고마운 분들이 많았기 때문이라고 생각합니다.

먼저 저를 거두어주시고 항상 부족한 모습만 보여드렸음에도 불구하고 질책 대신 끊임없는 격려와 노력할 수 있는 기회를 주신 김호민 교수님께 모든 분에 앞서 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 교수님 어려운 시간동안 큰힘이 되주셔서 감사드립니다. 또한 공부할 수 있는 환경을 만들어주시고 학부생시절부터 든든한 버팀목이 되주시는 전기공학과 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님과 풍력대학원 허종철 교수님, 고경남 교수님 그리고 끊임없는 가르침을 주시는 김도진 박사님, 부창진 박사님께도 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 대학원 생활을 함께하며 각각의 자리에서 열정을

보여준 대학원 동문 승현, 호산, 진, 수형이형과 봉언, 경민, 동완, 동우, 수환, 지한, 도현, 우철, 승민, 상현, 전기공학과 조교 지훈, 평강, 승민, 윤희 그리고 풍력공학부 조교선생님들께도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 혼자라 느낄 때 함께해준 소중한 사람들 세원, 병협, 상훈, 권배, 동원, 영패, 와우팸, 로사리오 친구들, 남녕 학생회, 노형성당, 광양성당 청년들 모두에게 이 기회를 빌려 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 응석만 부리는 동생 포기하지 않고 끌고 가느라 애쓴 최고의형 지형이형과 타국에서 고생하면서도 항상 웃으면서 팀과 하나되고자 노력하는 탄등, 자신의 자리에서 열심히 나아가고 있을 성현이까지 비록 소수이지만 최고의 열정으로 나아가는 고자기장에너지연구실 팀원들에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 항상 제 선택을 존중해주시고 아낌없는 지원해 주시는 부모님, 부족함이 많은 형이지만 항상 응원해주는 동생에게 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

마치는 지금 이 순간 다시 처음으로 돌아왔다는 생각이 듭니다. 저는 여전히 부족하고 오히려 나이만 더 먹었으며 안타깝게도 처음 대학원을 들어왔을 때 기대했던 것처럼 사회적으로나 경제적으로 비약적인 발전을 이루지도 않았습니다. 하지만 밤을 새우고 열정적으로 무엇인가를 준비하며 이뤘을 때의 성취감 속에서 끝이라고 생각했던 순간이 끝이 아니었으며 마음의 준비가 되어 있다면 언제든지 다시 시작할 수 있다는 것을 배웠습니다. 제가 할 수 있는게 많고 앞으로 해야할 것이 많다는 것을 알고 있기에 이제는 ‘나 스스로 할 수 있는게 없다’라는 말을 하지 않습니다. 비록 겉으로 나타나는 것은 크게 변하지 않았지만 결국 내가 변하지 않으면 바뀌는 것이 없음을, 그리고 내가 자격을 갖추면 모든 것이 변할 수 있음을 믿기 때문에 잃어버렸다고 생각했던 도전과 열정을 찾을 수 있을 것이라 기대하고 있습니다. 부족함이 많았던 대학원 생활이었지만 그 속에서 학문적 성과 이상의 인생의 교훈을 배울 수 있었습니다. 제게 기회를 주신 모두에게 감사하며 열심히 살겠습니다. 고맙습니다.

2015년 1월

박사일 올림