

A design of multi-width HTS magnets considering both wire consumption and field homogeneity

Hongmin Yang^{a,b}, and Minchul Ahn^{a,*}

^a Kunsan National University, Jeonbuk, Korea

^b Korea Basic Science Institute, Chungbuk, Korea

(Received 3 June 2021; revised or reviewed 24 June 2021; accepted 25 June 2021)

Abstract

This paper presents a design methodology of high-temperature superconducting (HTS) magnets. The magnet consists of several double pancake coils with a variety of wire width. This technique, named Multi-Width, is well known to make efficient use of the superconducting wire. It is common for design of high-temperature superconducting magnets to not only reduce wire consumption used, but also consider the homogeneity of the magnetic field. In this paper, we study a design method that efficiently reduces wire usage while considering magnetic field homogeneity. The design is carried out by calculating the critical current and the critical magnetic field according to the configuration of arranging the thickness of the wire to determine the number of windings. The width of wire comprising the magnet was set to 4 – 12 mm, and the number of double pancake coils was set to an even number to consist of top-down symmetry. To verify the validity of the design, we compared the progress of the design code with a complete enumeration survey. As a case study, we designed a magnet that generates a central magnetic field of 3 T or more in a 240 mm bore in diameter. Optimality can be evaluated by weighing wire consumption and field homogeneity according to the magnet's use or user preference.

Keywords: double-pancake coil, HTS magnet, magnet design method, multi-width

1. 서 론

Multi-Width (MW) 기법은 더블팬케이코 코일 (DPC)로 구성된 고온초전도자석에 효과적인 설계법으로써, 가장 좁은 폭의 DPC를 자석의 중심부에 위치하고 점진적으로 넓은 폭의 DPC를 배열하여 선재를 효율적으로 활용할 수 있는 방법으로 알려져 있다[1-5]. 일반적으로 임계전류는 수직자기장의 영향을 크게 받는데 팬케이코 코일로 구성된 자석의 상부와 하부는 수직자기장이 크기 때문에 상대적으로 임계전류가 낮다. 반면, 자석의 중심부는 임계 전류의 여유가 크게 생긴다. 따라서, 자석을 구성하는 팬케이코 코일의 폭을 조정하는 MW 기법을 적용하면 각 팬케이코 코일 간 임계 전류의 편차를 줄일 수 있고, 이것은 운전 전류를 상승시킬 수 있게 되어 선재를 효율적으로 활용할 수 있다. 또한, 초전도 자석을 설계할 때 자기장의 균일성, 초전도체의 임계전류 및 자기장 특성, 로렌츠 힘 등 많은 제한 조건을 고려하며, 주어진 제한조건 하에서는 일반적으로 권선의 중량 또는 부피를 줄이는 것이 바람직하다. 이는 초전도 자석 시스템의 비용은 도체의 사용량과 밀접한 관련이 있기 때문에 초전도 자석의 경쟁이 심해지는 시장에서 점점 더 중요한 요소가 되었다[6, 7]. 2018년에 MW 기법을 적용하여 원하는 자기장에 도달하기 위한 최소 선재 사용량으로 자석을 설계하는 논문을 발표한 적이 있으나 [8], 실제 고온초전도자석의 설계 시에는 선재 사용량을 줄이는 것뿐만 아니라 자기장의 균일도를 함께 고려해야 하는 경우가 많다. 본 연구에서는 자기장 균일도를 고려하면서도 선재 사용량을 효율적으로 줄이는 설계

방법을 연구했다. 구체적으로는 목적 자기장을 설정하고, 이때 선재 사용량 대비 우수한 균일도를 갖는 DPC 배열조건을 찾는 방법을 제안했다. 현재 SuNAM은 4 mm부터 1 mm 단위로 선재를 생산하고 있기 때문에 MW기법을 적용하여 DPC의 폭을 구성할 때 1 mm 간격으로 12 mm까지 사용할 수 있는 것으로 가정하였다. 이 방법을 사용하여 3 T/ 240 mm 고온초전도자석을 설계하는 사례연구를 진행하였다.

2. 자석 설계 과정

2.1. 최소 선재 사용 설계

본 연구에서 사용하는 고온초전도선재의 폭은 4~12 mm, 두께 0.12 mm이며, 각 층은 DPC로 구성한다. 각 DPC의 내부 간격은 0.2 mm, DPC간의 간격은 0.6 mm로 공간을 설정하였으며, 운전온도는 20 K으로 가정하였다. 자석의 전체 높이, 선재 사용량에 대한 제한조건 없이 설계과정을 진행한다. 설계를 시작하기 위한 시작 값은 4 mm 단일 두께의 DPC부터 목적자기장에 도달하기 위한 권선 수와 운전전류, 임계전류를 계산한다. 운전전류에 따라 각 층의 DPC에 발생하는 수직자기장과 수평자기장으로 식 (1)을 이용하여 임계전류를 계산한다[6, 9].

$$I_C(B_z, B_r) = \frac{I_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{k^2 \cdot B_z^2 + B_r^2}}{B_0}\right)^\beta} \quad (1)$$

* Corresponding author: mcahn@kunsan.ac.kr

식(1)에서 20 K 운전온도 조건으로 자기장이 0일 때 임계전류 I_c 는 I_{c0} 이고, 특성 자기장은 B_0 , 비등방성 인자 k 와 자기장 의존 지수 β 는 HTS 재료 특성을 나타내는 상수이며, 수직 및 수평 자기장에 대한 임계전류 특성을 나타내는 곡선을 curve-fitting 하여 찾은 값들이다[10]. 4 mm 선재의 고유 특성 데이터를 기준으로 식(1)의 상수 값을 각각 $I_{c0}=540$, $k=0.1241$, $B_0=0.4981$, $\beta=0.7444$ 로 추정할 수 있었고 수직자기장 (B_z)과 수평자기장 (B_x)을 대입하여 위치별로 임계전류를 계산할 수 있다. 특성 상수들의 결정 방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [8]에 제시한 바 있다 [8]. 선재의 폭과 임계전류가 비례하여 커지는 것으로 가정하였다. 실제로는 선재의 폭이 증가함에 따라 차폐전류 유도자기장의 크기에 영향이 있지만 본 설계에서는 이상적인 조건으로 가정하여 설계를 진행하였다. 각각의 DPC의 임계 전류를 계산한 후, 임계 전류가 가장 낮은 층의 선재 폭을 늘림으로써 운전 전류를 상승시켜서 모든 DPC의 임계 전류의 편차를 줄이는 방식을 적용하였다. 다음의 표 1에서는 지름 240 mm, 목적 자기장 3 T를 갖는 자석을 설계하기 위해 DPC의 수를 12개로 고정하고, 4 mm의 단일 두께로 구성된 DPC 배열 조건부터 임계전류가 가장 낮은 층의 폭을 조정하는 코드의 진행 과정을 보여준다. 표 1에서 DPC의 배열은 자석의 중심으로부터 위방향으로 배열을 대칭적으로 한 것이다. 선재 사용량은 4 mm 선재를 기준으로 환산한 길이로 나타냈다. 표 1에서 밑줄로 표시한 곳이 임계 전류가 가장 낮은 DPC이며, 이것을 1 mm 더 큰 폭의 DPC로 교체하는 과정을 나타내고 있다. 목적 자기장인 3 T에 도달하기 위해 필요한 최소의 선재량은 4 mm 선재로 환산한 값은 3121 m이며 이때 배열은 [6 7 7 8 9 11]이고, 운전전류는 임계전류에 해당하는 369 A로 계산하였다.

2.2. 균일도 개선을 위한 설계

선재량과 균일도를 동시에 고려하기 위해 목적 자기장을 만족하는데 필요한 최소 선재량의 DPC 배열 조건을 찾은 후, 그 배열로부터 균일도를 향상시키기 위한 설계를 진행한다.

이때, 균일도는 자석의 중심을 기준으로 -5 mm ~ +5 mm 구간의 최대 자기장 값과 최소 자기장 값의 차이와 중심자기장의 비로 계산하였다. 선재의 폭을 조정하여

균일도가 향상되는 정도를 식(2)로 상대평가(Relative Evaluation, R.E) 하여 가장 적합한 조건 층의 폭을 1 mm 증가시킨다. 모든 경우의 수를 계산한 결과로 식(2)를 활용하여 가장 우수한 결과를 선택한다. 첫 번째의 경우 이전의 배열조건은 최소 선재 사용 조건을 기준으로 평가하여 조정한다.

$$R.E(WC, FH) = \frac{WC - \min(WC)}{\max(WC) - \min(WC)} + \frac{FH - \min(FH)}{\max(FH) - \min(FH)} \quad (2)$$

선재의 폭을 조정하기 전의 배열을 포함하면서 그 배열을 기준으로 상대평가를 진행하기 때문에 이전의 배열의 R.E 값은 1로 고정된다. 표 2는 이 과정의 1회 수행과정을 나타낸다. DPC 배열은 중심으로부터 바깥으로 갈수록 수직자기장의 영향을 많이 받게 되므로, 폭이 넓은 선재를 배열하여 수직으로 입사하는 자기장의 영향을 완화하여 각 DPC의 임계 전류와 운전 전류의 차이를 줄여야 하기 때문에 자석의 중심으로부터 점진적으로 DPC의 폭이 증가하거나 동일해야 한다. 따라서, 표 2에서 이전의 배열 조건에서 변형할 수 있는 DPC는 1, 3, 4, 5, 6번 째로 총 5가지다. 이전의 결과를 포함하여 총 6개의 배열 조건들이 갖는 선재 사용량과 균일도를 식(2)에 대입하여 상대 비교를 통해 다음 단계로 진행한다. 표2의 결과로 다음 회차는 1번의 케이스를 이전 배열 결과로 하여 이 과정이 반복수행되고, 상대평가를 하여 더 이상 개선되지 않으면 반복을 멈춘다. DPC의 개수를 늘려서 2.1과 2.2 과정을 반복하게 되는데 DPC 수에 따른 최적의 결과 또한 다르게 나타날 수 있다.

3. 사례 연구

사례연구를 진행하는 첫 번째로 설계코드 진행의 유효성을 검증하기 위해 목적자기장 3T, 보어사이즈 240 mm 자석을 12개의 DPC로 구성할 때 배열할 수 있는 모든 조건들을 전수 조사하여, 설계코드 진행과 비교하였다. 그림 1은 전수조사 3003개의 배열 조건과 최적 설계 방법

TABLE I
PROCESS OF DESIGN FOR MINIMUM WIRE CONSUMPTION.

WIRE WIDTH ARRANGEMENT	CRITICAL CURRENT OF EACH DPC	WC @ 4MM EQUIVALENT (M)
4 4 4 4 4 4	294 241 198 164 135 <u>110</u>	5477
4 4 4 4 4 5	292 239 197 162 <u>132</u> 138	4508
4 4 4 4 5 5	287 234 191 156 173 <u>139</u>	4423
	⋮	
6 6 7 7 9 11	431 341 383 <u>314</u> 383 373	3481
6 6 7 8 9 11	431 <u>336</u> 360 387 390 373	3325
6 7 7 8 9 <u>11</u>	388 442 370 390 390 <u>369</u>	3121*
6 7 7 8 9 12	388 441 <u>369</u> 388 381 415	3187

TABLE II
EXAMPLE OF TRANSFORM CASES.

CASE	WIRE WIDTH ARRANGEMENT	WC (M)	FH (PPM)	R.E
Previous	6 7 7 8 9 11	3121	1087	1
1	7 7 7 8 9 11	3226	1024	0.3962*
2	6 7 8 8 9 11	3226	1052	0.8407
3	6 7 7 9 9 11	3386	1068	1.6984
4	6 7 7 8 10 11	3226	1082	1.3169
5	6 7 7 8 9 12	3186	1087	1.2453

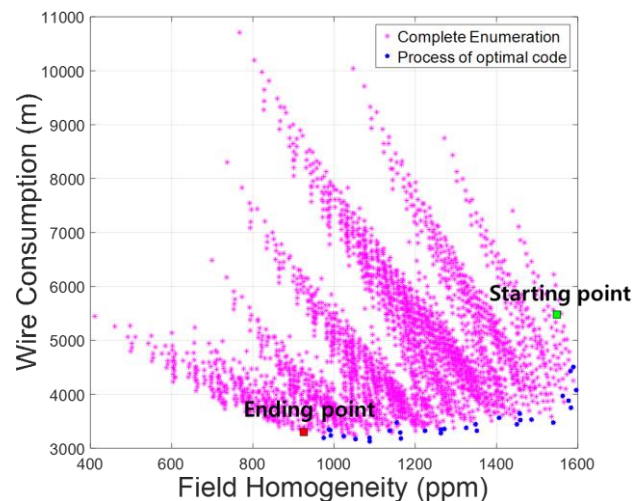


Fig. 1. Complete enumeration survey and process of optimal code.

으로 36개의 조건을 찾은 결과를 나타낸 것이다. 시작 지점은 [4 4 4 4 4] 배열이고, 가장 선재를 적게 사용하는 배열 조건은 [6 7 7 8 9 11]로 결과를 얻었고, 최소 선재 배열로부터 다중 목적 설계를 진행하여 이후 조건들을 도출하였다. 설계 코드 진행 결과를 보면 선재 사용량은 줄이고 균일도는 개선되는 방향으로 코드가 진행되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 중심으로부터 바깥으로 갈수록 폭이 크거나 동일한 경우만을 찾아서 전수조사 하는 것과 비교해 볼 때 12개의 DPC로 구성된 것을 예로 들면 3003개의 배열 조건을 36개로 단축할 수 있다. DPC 개수를 달리하여 모든 조건을 계산해야 하는 상황을 고려해 봤을 때 시간적인 측면에서 많은 이득을 취할 수 있다.

사례연구에서 진행할 자석은 목적 자기장 3T, 보어사이즈 240 mm 를 기준으로 DPC 개수를 10 ~ 40까지 설정하여 설계코드를 진행하였고, 그 결과를 바탕으로 사용자의 자석 사용 목적에 따른 최적성을 평가하기 위해 선재 사용량, 균일도, 가중치 λ 에 의한 식(3)을 정의하였다. λ 는 0부터 1 사이의 값으로 설정하여 목적에 부합할 수 있도록 최적성 평가(Optimality Evaluation, O.E)를 진행하여 설계 결과를 선정할 수 있다.

$$O.E(WC, FH, \lambda) = \lambda \times \frac{WC - \min(WC)}{\max(WC) - \min(WC)} + (1 - \lambda) \frac{FH - \min(FH)}{\max(FH) - \min(FH)} \quad (3)$$

최적성을 평가하기 전에 자석의 DPC의 개수에 따른 각각의 배열 조건을 찾는 코드 진행과정을 그림 2에 나타내었다. 10개의 DPC부터 40개까지 상하 대칭적인 구조를 바탕으로 배열하였다. 각 조건마다 운전전류, 권선수가 다르기 때문에 자기장 분포와 선재 사용량 또한 모두 다르게 추정된다.

10 ~ 40개의 DPC의 수에 따른 설계 방법을 통해 찾은 952가지의 설계안 중 최소 선재 사용량은 12개의 DPC로 구성된 결과 중 하나인 [6 7 7 8 9 11]의 배열이며, 4 mm 선재를 기준으로 3121 m의 선재량이 필요한 것으로 찾을 수 있었다. 자석을 설계하는 것에 제한 조건이 필요한데, 본 사례연구에서는 최대 선재량의 제한을 최소 선재량의 150%까지로 설정하여 진행하였다. 그림2의 표시한 부분은 허용 선재량의 범위에 해당하는 영역으로, DPC 10 ~ 40개의 조건들이 고르게 분포되어 있다. 하지만 선재량은

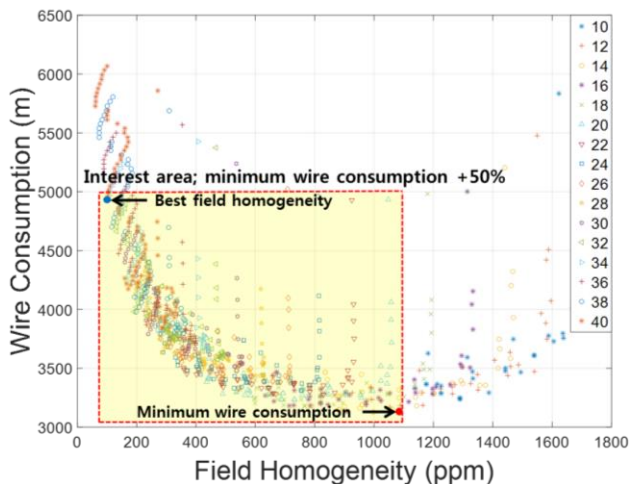


Fig. 2. Process of all results from 10 DPCs to 40 DPCs.

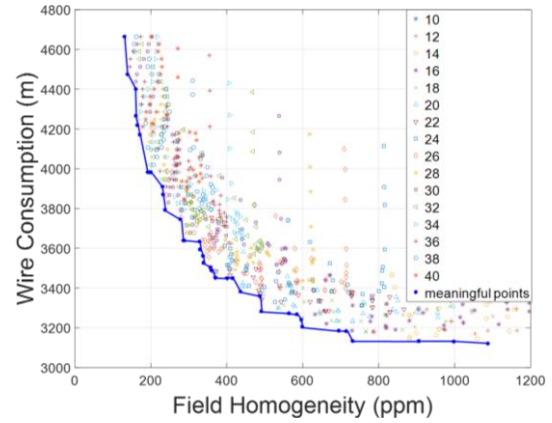


Fig. 3. All result at interest area and meaningful points.

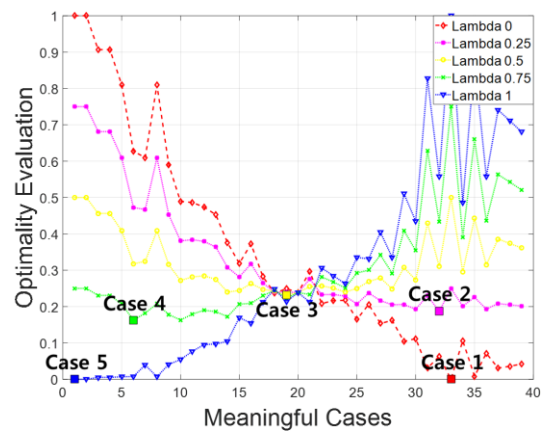


Fig. 4. O.E values of meaningful cases according λ to from 0 to 1.

비슷한 반면에 균일도의 차이가 있는 불필요한 설계 결과들이 함께 포함되어 있다. 따라서, 허용 선재량의 범위에 있는 DPC 배열 조건들 중 선재 사용량 대비 균일도가 우수한 설계안으로 총 39가지를 그림 3에 나타냈다. DPC개수나 운전전류에 관계없이 식(3)을 이용하여 최적성을 평가하였다. 자석의 활용 목적에 따라, 중심 자기장의 세기만을 목적으로 한다면, 선재를 적게 사용하도록 λ 를 1로 설정할 수 있고, 자석의 균일도를 함께 고려한다면 0 ~ 1 사이의 값을 설정하여 적합한 설계안을 선택할 수 있다. λ 를 설정했을 때의 최적 설계안의 변화를 확인하기 위해 λ 를 0부터 0.25 간격으로 1까지 설정하여 식(3)을 통한 값을 계산하였다.

그림 4는 39가지의 설계안이 가중치 λ 에 따라 다른 최적합도를 식(3)으로 계산한 값을 나타낸 그래프이다. λ 에 의해 설계안의 최적합성이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 목적에 따라 최적 DPC 배열 조건 결과를 얻을 수 있다. 예를 들어, 허용된 선재량으로 가장 균일도가 우수한 설계안을 찾으려면 λ 를 0으로 설정하여 39가지 케이스의 최적성을 평가하여 case 1의 설계안을 얻을 수 있다. λ 를 0으로 설정한다면 목적 자기장에 도달할 수 있는 최소의 선재 사용량을 갖는 case 1의 설계 결과를 얻을 수 있다. 표3에서 λ 에 따른 최적 DPC 배열의 결과 및 운전전류, 배열조건 등을 나타냈다. λ 가 1일 때, 12개의 DPC로 구성된 설계안이 3121m로 최소 선재 사용량 조건을 만족하였고, λ 가 0일 때, 균일도가 130 ppm으로 32개의 DPC로 구성된 설계결과를 얻을 수 있었다. Case 1부터

TABLE III
OPTIMAL DESIGN RESULTS.

INNER DIAMETER (MM)	TARGET FIELD (T)	CASE	LAMBDA	DPCS	WIRE WIDTH ARRANGEMENT	WIRE CONSUMPTION (M)	FIELD HOMOGENEITY (PPM)	I _{OP} (A)
240	3	1	0	32	777777777778888912	4665	130	432
		2	0.25	32	66666666666777810	3982	191	360
		3	0.5	22	7777888891012	3451	369	461
		4	0.75	16	677788912	3133	731	401
		5	1	12	6778911	3121	1087	368

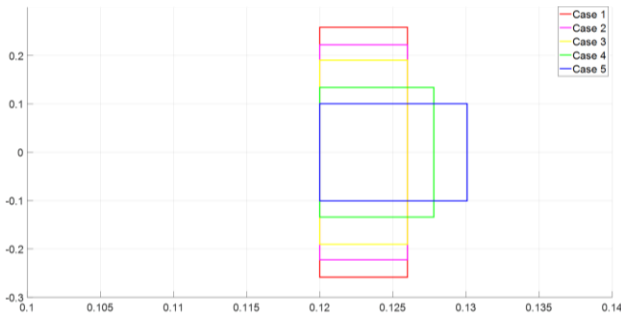


Fig. 5. Cross-section of all the optimal design conditions.

5가지 자석의 형상을 알아보기 위해 단면을 그림 5에 표현하였다. 가장 선재를 적게 쓰는 배열 조건의 자석의 형상은 높이가 가장 작고 두께는 두꺼운 모습을 보이고, 균일도를 최우선적으로 고려한 λ 가 0일때 자석은 큰 높이와 비교적 얇은 모습을 보였다. 그 외에도 λ 에 따른 자석의 형상은 균일도를 고려할수록 높이가 큰 경향성을 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 선재를 효율적으로 사용하기 위해 사용량과 균일도를 고려한 Multi-Width 고온초전도자석의 선재의 폭을 구성하는 배열 방법에 대해 다루었다. DPC의 배열에 따라 임계전류를 계산할 수 있으며, 그에 따른 운전전류와 권선 수를 유동적으로 계산하여 임계전류를 결정하는 위치의 폭을 증가시켜 운전전류를 상승시킬 수 있도록 조정하여 선재 사용량을 줄이면서 균일도를 개선시킬 수 있도록 설계하는 방법에 대해 연구하였다. 또한, 자석의 사용 목적이나 선호도에 따른 선택을 위한 평가 방법을 제안하였고, 사례연구를 통해 설계 결과를 확인하였다. 사례연구는 목적자기장 3 T, 보어사이즈 240 mm의 고온초전도자석을 설계하는 것으로, DPC의 개수를 10 ~ 40까지 다양한 배열 조건들을 얻을 수 있었고, 각 설계안에 대한 적합도를 평가할 수 있었다. 본 사례연구에서 최소 선재 사용량을 기준으로 허용 선재량만을 제한하도록 고려하였지만, 공간적인 제한으로 자석의 높이나 권선 수를 제한하는 설계도 가능하다. 선재의 종류가 다를 경우 임계 전류를 계산하는 식(1)의 재료 특성 상수들을 조정하여 설계를 진행하는 것 또한 가능하다. 본 연구는 MW 기법을 적용하는 다양한 종류의 고온초전도자석의 설계에 적용될 수 있으나, 자석의 기계적 해석을 포함하고 있지 않으며 차폐전류 유도자기장에 의한

균일도 저하에 대해서는 고려하고 있지 않다. 이에 대한 향후 추가적인 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety) (Project Number: 1711138068, KMDF_PR_20200901_0063). Also, it was supported by the KETEP as Human Resources Development Programs (Grant No. 20194010201800).

REFERENCES

- [1] S. Hahn, Y. Kim, D. K. Park, K. Kim, J. Voccio, J. Bascuñán, and Y. Iwasa, "No-Insulation multi-width winding technique for high temperature superconducting magnet," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, pp. 173511, 2013.
- [2] S. Hahn, Y. Kim, J. Song, J. Voccio, J. Ling, J. Bascuñán, and Y. Iwasa, "A 78-mm/7-T Multi-Width No-Insulation ReBCO Magnet: Key Concept and Magnet Design," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 4602705, 2014.
- [3] J. Bascuñán, S. Hahn, Y. Kim, and Y. Iwasa, "A new high-temperature superconducting (HTS) 700-MHz insert magnet for a 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 4400304, 2013.
- [4] B. J. Parkinson, R. Slade, M. J. D. Mallet, and V. Chamritski, "Development of a cryogen free 1.5 T YBCO HTS magnet for MRI," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 4400405, 2013.
- [5] Y. G. Kim, S. Hahn, K. Kim, D. Yang, and H. G. Lee, "Design consideration and optimization procedure for a no-insulation multi-width REBCO magnet," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 15, no. 10, pp. 1134-1138, 2015.
- [6] S. Noguchi, M. Yamashita, H. Yamashita, and A. Ishiyama, "An Optimal Design Method for Superconducting Magnets Using HTS Tape," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 11, no. 1, pp. 2308-2311, 2001.
- [7] T. Tadic and B. Fallone, "Design and Optimization of superconducting MRI magnet Systems with magnetic materials," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 2, pp. 4400107, 2012.
- [8] M. C. Ahn, H. Yang, K. Kim, J. Y. Jang, S. Lee, and S. Hahn, "Optimal Design Methodology of Multi-Width HTS Magnet for minimum Wire Consumption," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, pp. 4602905, 2018.
- [9] J Šouc, E. Pardo, M Vojenčiak, and F. Gomory, "Theoretical and experimental study of AC loss in high temperature superconductor single pancake coils," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 015006, 2008.
- [10] F. Gömöry, "Improvement of the self-field critical current of a high-T_c superconducting tape by the edge cover from soft ferromagnetic material," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 072506, 2006.