

# Effect of CORC former and striation on magnetization loss

Myeonghee Lee<sup>a</sup>, Byeong-Joo Kim<sup>a</sup>, Miyeon Yoon<sup>a</sup>, Kyeongdal Choi<sup>a</sup>, Ji-Kwang Lee<sup>b</sup>, and Woo-Seok Kim<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Tech University of Korea, Gyeonggi-do, Korea

<sup>b</sup> Woosuk University, Jeollabuk-do, Korea

(Received 9 December 2023; revised or reviewed 27 December 2023; accepted 28 December 2023)

## Abstract

CORC, which is being studied as one of the conductors for large currents, is manufactured by symmetrically arranging several strands of high-temperature superconducting wires on a cylindrical former. It allows current to flow evenly between wires and has the advantage of being manufactured in a multi-layer structure to increase current capacity. In order to apply CORC to AC power devices, it is necessary to review the material of the former, which is the frame around which the superconducting wire is wound. In the case of metal formers, they are difficult to apply because eddy currents are generated in the former, and they do not have the flexibility to be manufactured into coils by winding them with CORC. In this paper, we compare and analyze the magnetization loss caused by an external alternating magnetic field of Litz wire, which is being considered as a former material for CORC, with the results from formers made of other materials. In addition, we experimentally examine the effect of reducing magnetization loss due to an external magnetic field in CORC using a split wire made by dividing a high-temperature superconducting wire into two using an etching method, and in CORC made with a non-split wire.

**Keywords:** CORC, CORC former, striation, magnetization loss

## 1. 서론

대형 마그넷의 제작을 위해서는 수~수십 kA 급의 대전류 통전이 가능한 대전류 도체가 필요하다. 대전류 도체는 다수의 고온 초전도 선을 병렬로 사용하여 통전전류를 높일 수 있다. 국내, 외에서 연구되고 있는 대전류 통전용 고온 초전도 도체는 전류의 균일한 흐름을 만들고, 교류전류 통전시 교류손실을 감소시키기 위해 전위하거나 선재들을 꼬는 형태로 제작된다. 다수의 선재를 뒤틀 모양으로 커팅하여 조립하는 RACC (Roebel Assembled Coated Conductors) [1, 2], 중심에 포머 (Former)를 두고 시계 혹은 반시계 방향으로 각도를 두어 감는 CORC (Conductor On Round Core) [3, 4], 선재를 적층 시킨 후 길이방향으로 일정하게 비틀어 만든 TSTC (Twisted Stacked Tape Cable)[5][6] 등의 고온 초전도 대전류 도체들이 대표적인 예이다. 그 중에서도 CORC는 원통형 포머에 장력을 주면서 나선형으로 권선하는 구조를 가지며 통전용량을 늘리기 위해 층수를 늘려가며 감을 수 있으므로 제작이 용이하고 통전전류의 사용범위도 크다고 할 수 있다. 초전도 전력응용에서는 주로 코일의 형태로 제작되어야 하는데, CORC로 초전도 코일을 제작할 경우에 CORC 곡률 반경에 맞춰서 유연하게 권선될 수 있어야 한다. CORC는 포머 위에 초전도선재를 감는 형태이기 때문에 포머가 코일 형태로 권선이 가능한 유연성을 가져야 한다. 또한, 교류 응용을 위해서는 교류 자장에 의한 와전류 손실 등이 발생하지 않아야 되므로 포머 재료에 대한 검토가 필요하다. 유연성을 가지면서 그 위에 일정한 장력으로 권선될 수 있는 재료로서 Litz wire를 검토하였다. Litz wire는 가느다란 구리선을 다발로 하여 하나는 선을 구성하고 있는 다심 구조를 가지고 있다. 교류

자장이 인가될 때 전기적 손실의 발생여부를 알아야 CORC의 포머로서 사용 가능성을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 Litz wire로 제작된 포머와 비전도성 재료인 PLA(PolyLactic Acid), FRP(Fiber Reinforced Plastic)로 제작된 포머와의 자화손실 비교를 위해 손실 측정 실험을 진행하였다.

또한, CORC의 교류 전력응용에서 가장 큰 문제가 되는 외부 자장에 의한 자화손실을 저감시키기 위해 알려진 방법인 선재 분할의 효과를 확인하고자 하였다. 고온 초전도 선재의 손실을 줄이는 하나의 방법으로 선재의 기판을 그대로 두고 초전도 층을 여러 개로 나누는, 분할하는 방법이 있다. 전류는 초전도 층으로 흐르고 기판은 초전도 층을 고정시키는 용도이기 때문에 기판은 건드리지 않고 기판위의 초전도 층까지 원하는 부분을 제거하여 사용하는 방법이다. 분할하는 방법은 크게는 두가지가 있는데 하나는 레이저를 쏘아 분할하는 것[7]이고 또 하나는 화학적인 에칭 (Etching)[8]이다. 본 논문에서는 화학적인 에칭 방법으로 분할된 선재를 사용하여 CORC를 감는 경우 자화 손실을 측정하고 비분할 선재를 사용한 경우와 비교하여 손실 저감 효과를 살펴 보았다. 화학적인 에칭으로 선재를 분할하기 위하여 구리 안정화 층이 없는 Stabilizer Free 선재를 사용하였다.

## 2. 샘플 및 측정시스템

### 2.1. 포머 재료에 따른 CORC 샘플

CORC는 그림 1과 같이 내부에 포머를 두고 그 위에 방향을 정하여 일정한 각도로 다수의 고온 초전도 선재를 감아 나가며 만든 초전도 도체이다. 자화손실 측정 실험에 사용된 포머 재료를 그림 2에 나타냈으며 FRP, PLA, Litz wire 이다. FRP는

\* Corresponding author: [wskim@tukorea.ac.kr](mailto:wskim@tukorea.ac.kr)

원기둥의 형태로 가공하였고, PLA는 3D 프린터를 통해 제작하였다. Litz wire는 표면이 고르지 못하여 케이블을 권선하는데 어려움이 있으므로 1차로 캡톤(Capton) 테이프를 감고 그 위를 테프론(Teflon) 시트로 단단하게 감았다. 그림 3에 나타낸 것과 같이 준비된 3가지 종류의 포머 위에 90 mm의 회전피치를 갖도록 초전도 선재를 감아서 CORC를 제작하였다. 포머들의 직경은 10 mm이고 길이는 180 mm 이다. CORC 제작에 사용된 선재의 사양은 표 1과 같다. 폭이 4 mm이고 자기 자계에서 190 A의 임계전류를 가지는 구리 안정화 층이 없는 선재이다. 제작된 CORC 샘플들은 포머의 재료는 다르지만 동일한 길이의 선재 6 가닥으로 구성되어 있다.

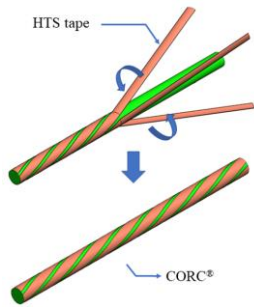


Fig. 1. CORC shape.

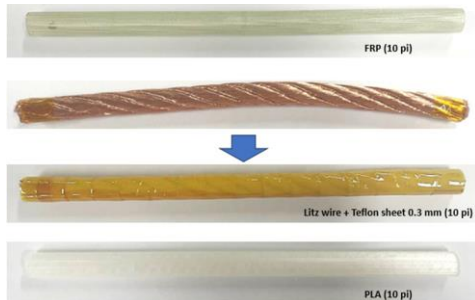


Fig. 2. CORC Former Samples.



Fig. 3. Measurement Samples (CORC Samples & Litz wire).

TABLE I  
SPECIFICATIONS OF THE HTS TAPE.

Specification	Value
Manufacturer	SuNAM
Substrate	Hastelloy
Stabilizer	Free
Width	4 mm
Thickness	0.07 mm
Thickness of superconducting layer	1 μm
Critical current	190 A (@77 K, Self-field)

2.2. 분할선재로 제작한 CORC 샘플

선재의 분할에 따른 효과를 알아보기 위해서 화학적 에칭 방법을 사용하여 선재를 분할하였다. 에칭에 사용한 방법은 포토리소그래피(Photolithography) 과정이고, 과정을 진행하고 나면 그림 4와 같이 구리안정화 층이 없는 선재의 실버 층과 초전도 층이 도안에 맞추어 일부 제거되며 분할된다. 분할선재의 손실 저감 효과와 분할선재로 만든 CORC의 자화손실을 알아보기 위하여 분할하지 않은 직선 선재 샘플(1필라멘트), 분할한 직선 선재 샘플(2필라멘트), 분할하지 않은 선재를 사용하여 제작한 CORC 샘플 및 분할한 선재를 사용하여 제작한 CORC 샘플을 제작하였다. 그림 5는 각 샘플들의 사진을 나타내었다. 직선 선재 샘플은 180 mm의 길이를 가지며 픽업코일 중앙에 지면과 수평으로 고정시킬 수 있는 평평한 판에 고정되어 있다. CORC 샘플은 10 mm의 직경을 가진 180 mm 길이의 FRP 봉에 6 가닥의 선재가 일정한 간격으로 90 mm의 회전 피치를 갖도록 권선되어 있다.

2.3. 측정시스템

샘플들의 자화손실 측정은 그림 6에 나타낸 LPC(Linked pick-up coil) 시스템을 사용하여 측정하였다[9]. LPC 시스템은 샘플에서 발생하는 손실 전압신호를 측정하는 픽업코일(Pick-up coil)과 픽업코일의 유도전압 성분을 제거하기 위해 역결선하는 캔슬코일(Cancel coil)로 구성되어 있다. 픽업코일의 한 턴의 크기는 30 mm × 30 mm의 정사각 형태를 띠고 길이방향으로 30 mm의 크기를 갖는다. 픽업코일과 캔슬코일은 권선수 1538 턴으로 동일한 사양으로 제작되었다. 자화손실 측정은 레이스트랙(Racetrack) 형태의 외부 마그넷에 60 Hz의 교류 전류를 5 A부터 75 A까지 5 A씩 증가시켜 인가하면서 측정하였다.

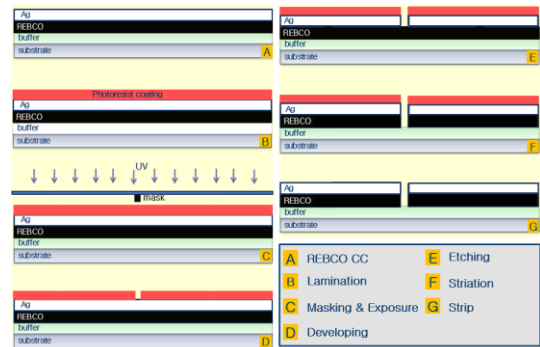


Fig. 4. Photolithography Process.

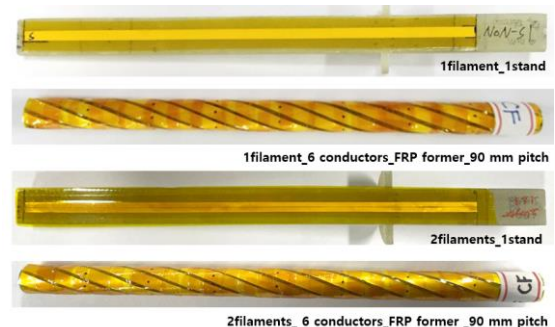


Fig. 5. CORC samples to check the effect of striation.

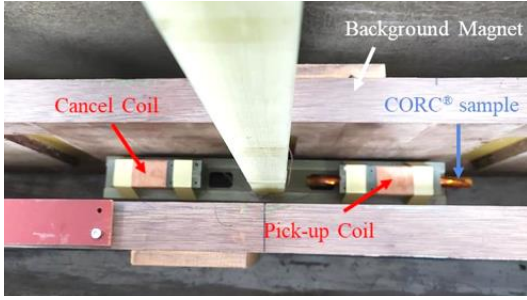
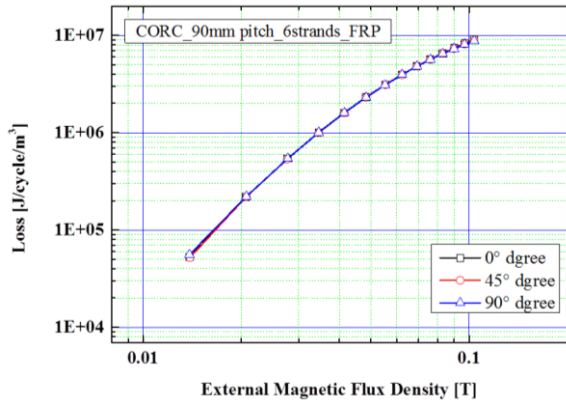
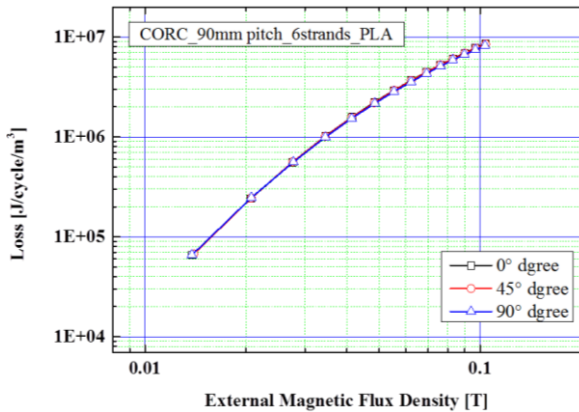


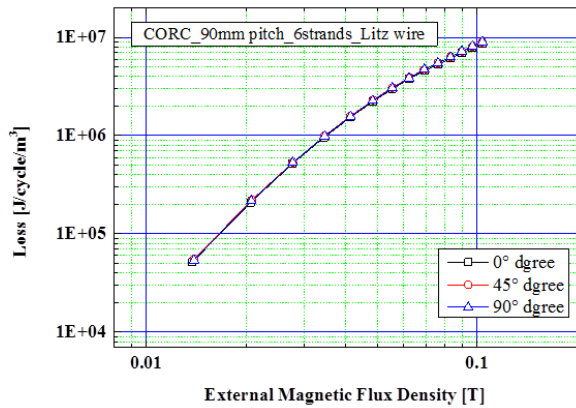
Fig. 6. LPC system.



(a) FRP (angle of rotation 0°, 45°, 90°)



(b) PLA (angle of rotation 0°, 45°, 90°)



(c) Litz wire (angle of rotation 0°, 45°, 90°)

Fig. 7. Magnetization loss according to various angles of CORC samples with different formers.

### 3. 포머 재료에 따른 자화손실

CORC 샘플들을 일정한 각도로 회전시키며 외부에서 균일한 교류 자장을 인가하며 자화손실을 측정하였다. CORC는 다수의 초전도 선재로 포머 위에 동일한 피치를 가지고 대칭적으로 권선하여 제작하므로 외부 인가 자장에 대해서 회전 각도에 상관없이 동일한 자화손실 측정값을 가져야 한다. 그림 7은 픽업 코일 CORC를 회전시키며 0°, 45°, 90° 에서 측정한 자화손실 값을 보여준다. 각각의 CORC 샘플에서 회전 각도에 무관하게 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 그림 8은 포머의 재질에 따른 영향을 확인하기 위하여 각 샘플의 자화손실 측정값을 비교하였다. 측정된 자화손실이 거의 동일한 것은 포머 위에 감겨 있는 초전도 선재에서 발생하는 손실이며 포머에서는 손실이 발생하지 않음을 의미한다. 그림 9는 Litz wire로 제작한 포머 만이 있을 경우와 포머 위에 초전도 선재를 권선하여 CORC로 제작한 샘플에서의 자화손실 측정값을 비교하여 보여준다. 전도체인 구리선 묶음으로 구성된 Litz wire 에서도 자화손실이 거의 발생하지 않음을 알 수 있으며 이는 CORC 제작시 포머 재료로서 사용할 수 있음을 의미한다.

### 4. 분할 샘플의 자화손실

직선 선재인 분할되지 않은 샘플과 분할된 샘플에서 측정한

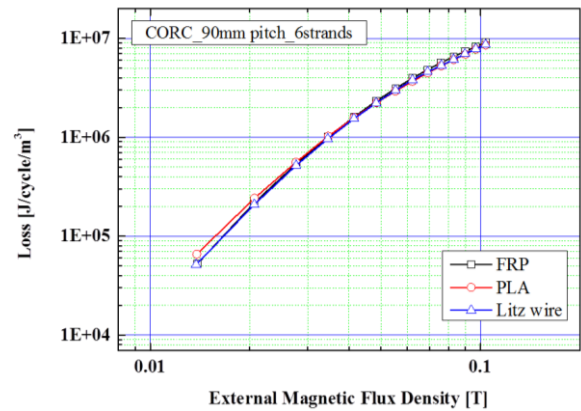


Fig. 8. Comparison of magnetization loss of samples with different formers.

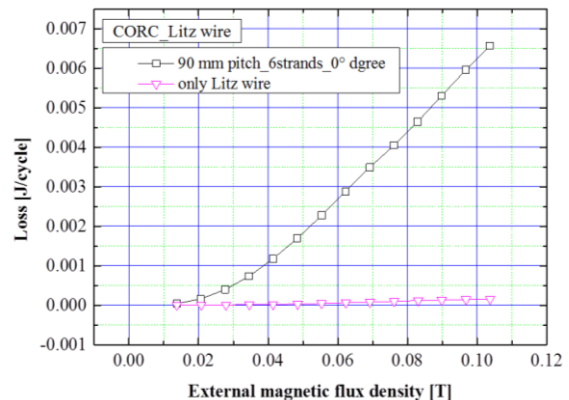


Fig. 9. Compare Litz wire & CORC Sample (with Litz wire)

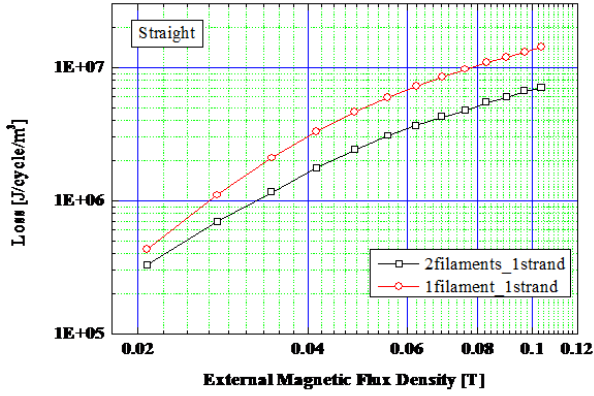


Fig. 10. In case of straight samples, Magnetization loss of striation (2 Filaments) and non-striation (1 Filament) samples.

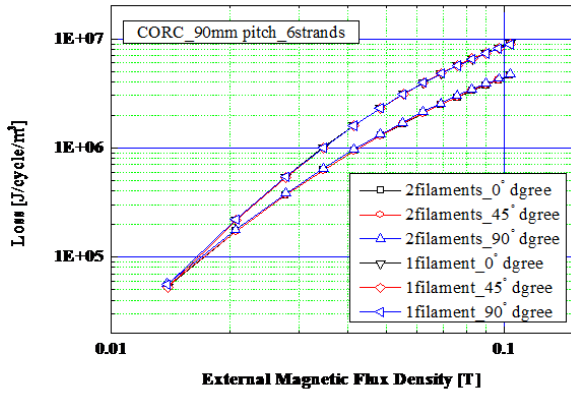


Fig. 11. In the case of CORC samples, Magnetization loss according to various angles of striation (2 Filaments) and non-striation (1 Filament) samples.

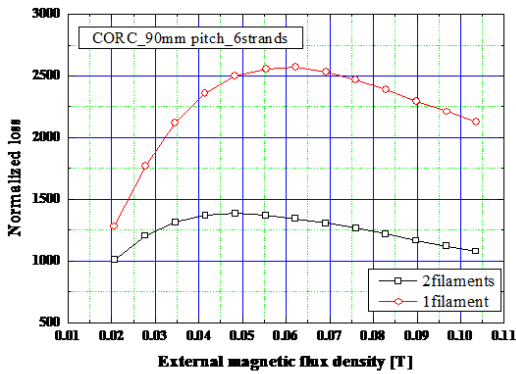


Fig. 12. Normalized loss of CORC striation (2 Filaments) sample and non-striation (1 Filament) sample.

자화손실 결과를 그림 10에 나타내었다. 0.1 T의 자장에서 분할된 샘플의 손실은 분할되지 않은 샘플의 손실의 49.2%로 감소하였다. 그림 11은 분할되지 않은 선재와 분할된 선재를 사용하여 만든 CORC 샘플들을 0°, 45°, 90° 돌려가며 측정된 결과이다. 회전 각도에 의한 차이는 없으며 CORC 샘플의 경우에도 직선 샘플과 마찬가지로 분할의 효과가 유지됨을 알 수 있다. CORC 샘플들의 자화손실 측정값을 식(1)에 있는 것처럼 체적당 에너지 밀도로 나누어서 정규화하면 그림 12와

같다.

$$\text{Normalized loss} = \frac{\text{Measured loss}}{\left[\frac{B_m^2}{2\mu_0}\right]} \quad (1)$$

식 (1)에서  $B_m$  은 외부에서 인가되는 교류자장의 최대값을 나타낸다. 그림 12에서 분할선재로 제작한 CORC의 경우 정규화 손실이 최대값을 나타내는 지점의 자속밀도 값이 분할하지 않은 선재로 만든 CORC에서 최대값이 나타나는 지점의 자속밀도 값 보다 작은 것을 알 수 있다. 정규화 손실의 최대값이 나타나는 자속밀도 값은 초전도선재의 임계전류 밀도와 관계가 있으며[10], 분할한 선재로 제작한 CORC의 임계전류는 분할하지 않은 선재로 제작한 CORC보다 임계전류가 감소한다는 것을 의미한다.

## 5. 결론

대전류용 고온 초전도 도체로 연구되고 있는 CORC의 포머 재료에 따른 자화손실 발생 여부를 측정실험을 통해 살펴보았다. 자화손실 측정결과 포머 재료가 FRP, PLA, Litz wire인 CORC 샘플은 외부 자장의 인가 각도 변화에 관계없이, 포머 재료에도 관계없이 거의 동일한 측정 값을 보였다. 또한, 금속재료의 리츠선을 이용하여 만든 CORC 샘플로 측정된 교류 손실과 리츠선 자체의 교류 손실을 비교한 결과, 리츠선 자체의 자화 손실이 거의 0에 가까워 리츠와이어 포머가 외부 자장의 영향을 받지 않음을 확인하였다. 또한, 분할된 초전도 선재를 사용하여 제작한 CORC의 자화손실을 측정하여 손실 감소 효과를 살펴보았다. 화학적인 에칭 방법을 사용하여 선재를 2 필라멘트로 분할하고 분할된 선재를 사용하여 CORC 샘플을 만들었다. CORC 샘플의 자화 손실은 분할되지 않은 도체를 사용한 경우에 비해 분할된 도체를 사용한 경우 손실이 감소한 것을 확인하였다. 이후, 선재의 분할 수를 늘려 분할 정도에 따른 자화손실 감소 효과를 확인할 계획이다.

## ACKNOWLEDGMENT

“This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2023R1A2C1005911), This research was supported by National R&D Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (2022M3I9A1076800), This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2021R1F1A1063208)”

## REFERENCES

- [1] W. Goldacker, R. Nast, G. Kotzyba, S.I. Schlachter, A. Frank, B. Ringsdorf, C. Schmidt, and P. Komarek, “High current DyBCOROEEL Assembled Coated Conductor (RACC),” *J. Phys.*

- Conf. Ser.*, vol. 43, pp. 901, 2006, and M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [2] A. Frank, R. Heller, W. Goldacker, A. Kling, and C. Schmidt, "Roebel assembled coated conductor cables (RACC): AC losses and current carrying potential EUCAS-2007 (Brussels, sept. 2007)," *J. Phys., Conf. Ser.*, vol. 97, Art. no. 012147, 2008.
- [3] X. Wang, et al., "Development and performance of a 2.9 Tesla dipole magnet using high-temperature superconducting CORC®wires," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1361-6668/abc2a5.
- [4] D. C. Van Der Laan, et al., "A CORC cable insert solenoid: the first high-temperature superconducting insert magnet tested at currents exceeding 4 kA in 14 T background magnetic field," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 33, pp. 05LT03, 2020.
- [5] M. Takayasu, F. J. Mangiarotti, L. Chiesa, L. Bromberg, and J. V. Minervini, "Conductor characterization of YBCO twisted stacked-tape cables," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, 2013, Art. ID. 4800104.
- [6] Kyeongdal Choi, et al., "Magnetization Loss Measurement of Twisted Stacked Tape Cable and Comparison With CORC," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, 2023, Art. no.5901005.
- [7] Joseph C. Prestigiacomo, et al., "Use of Laser Lithography for Striating 2G HTS Conductors for AC Loss Reduction," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 8, 2017, Art. no. 6603905.
- [8] O. Tsukamoto, et al., "AC Magnetization Loss Reduction by Striation in YBCO-123/Hastelloy Coated Conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2839-2842, 2005.
- [9] Z. Jiang and N. Amemiya, "An experimental method for total AC loss measurement of high T<sub>c</sub> superconductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 3, pp. 371-379, 2004.
- [10] J. -K. Lee, Y. Kim, S. Lee, W. -S. Kim, C. Park, and K. Choi, "Estimation of the Critical Current Density From the Measured Values of Perpendicular Magnetization Losses in HTS Coated Conductors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2345-2348, 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2101039.