

# Conceptual design and fabrication test of the HTS magnets for a 500 W-class superconducting DC rotating machine under 77 K

J. Choi<sup>a</sup>, and S. K. Kim<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Changwon National University, Changwon, Korea

<sup>b</sup> Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

(Received 18 November 2021; revised or reviewed 23 December 2021; accepted 24 December 2021)

## Abstract

Conventional direct current (DC) rotating machines are usually used for crane and press machine using high torque in metal and steel industries, because of a constant output power along variable rotating speed. A general DC motor with permanent field magnets could not increase a magnetic flux density at a gap between armature coils and field magnets. However, a superconducting DC motor has field magnets composed with high temperature superconducting (HTS) coils and it could increase the magnetic flux density at the gap to over 10 times than those of a general DC motor by control the excitation current into HTS coils. The superconducting DC motor could be operated with extremely high torque and constant output power at a low rotational speed.

In this paper, a 500 W superconducting DC rotating machine was conceptually designed with a LN<sub>2</sub> (Liquid Nitrogen) cooling method and the operation characteristics results of HTS field magnets were presented. The two no-insulation HTS magnets for a 500 W superconducting DC rotating machine were fabricated. The excitation current for the HTS magnets could be controlled from 0 to 40 A. This test results will be available to design large-sized HTS magnets for a number of hundred kW class superconducting DC rotating machine under LN<sub>2</sub> cooling system.

**Keywords:** HTS magnet, high torque, liquid nitrogen, no-insulation, superconducting DC motor

## 1. 서 론

일반적인 직류전동기는 정출력 특성에 우수하여 일반 1차 금속 산업 및 철강 산업라인에서 주로 사용되고 있다. 또한, 각종 크레인 및 프레스 구동용으로 저속에서 고토크를 필요로 하는 곳에 적합하다. 초전도 직류 모터는 기존 영구자석형 직류모터와 달리, 초전도 자석형 계자의 직류자기장을 높여 공극 자기장을 최대 10배 이상 높일 수 있어, 저속에서의 고토크, 정출력 운전을 가능케 할 수 있다[1]. 이에 고온초전도 자석을 사용한 직류전동기를 대용량 시스템에 적용하여 고효율 공정 시스템으로 전환하여 에너지 효율향상 및 탄소저감을 극대화 할 수 있을 것으로 기대된다[2-4].

본 논문에서는 500 W급 초전도 직류전동기용 액체질소 운전용 초전도 자석을 설계하고 운전 특성을 분석하였다. 궁극적으로 200 W급 상용 직류전동기의 전기자를 활용하여 기존 영구자석 계자를 초전도 자석으로 대체 적용하여 초전도 직류전동기의 특성을 증명하고자 한다. 초전도 자석 계자와 전기자의 공극자속은 최소 0.7 T 이상을 얻기 위해 초전도 자석을 설계하여 설계사양을 도출하였고, 직접 권선하여 제작하였다. 액체질소 온도에서 초전도 자석의 임계 전류를 측정하여 임계 전류 43 A 로 최대 여자 전류 40 A까지 운전가능범위를 확인하였다.

본 논문에서 성능 평가된 초전도 자석 결과를 바탕으로 수백kW급에 적용 가능한 액체질소 운전용 초전도 자석 설계를 위한 기초데이터로 활용할 예정이다. 또한, 본 논문의 결과는 상업용 초전도 직류전동기의 경제성 확보를

위한 공극 자속밀도의 측정 범위를 선정하는데 기여할 수 있다.

## 2. 초전도 직류전동기의 개념설계

### 2.1. 초전도직류전동기의 기본 구성도

초전도 직류전동기는 크게 고온초전도 자석, 액체질소 및 진공 챔버, 철심 및 전기자, 브러쉬 및 정류자편으로 구성된다. 직류전동기의 출력특성을 검증하기 위하여 토크 및 회전속도 센서를 동일 축에 설치하였고, 부하로 파우더 브레이크를 연결하여 실시간으로 기계적 부하를 제어할 수 있도록 추가적인 장치를 설치하였다. 초전도 직류전동기의 3차원 개념도와 내부 구성도를 그림 1과 같이 나타내었다.

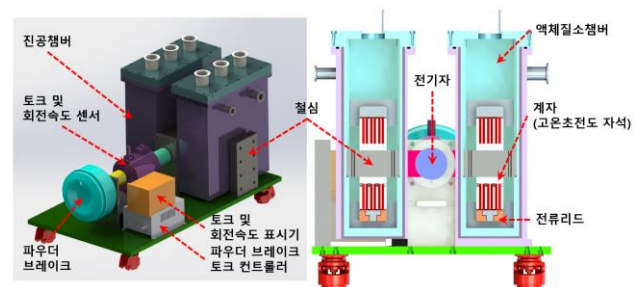


Fig. 1. Conceptual three dimensional design of a superconducting DC rotating machine with HTS magnets.

\* Corresponding author: sk\_kim@keri.re.kr

TABLE I  
SPECIFICATIONS OF THE HTS MAGNETS FOR 500 W-CLASS  
SUPERCONDUCTING DC ROTATING MACHINE.

Parameters	values
Maker of HTS wires	SuNAM in Korea
Critical current at 77 K	220 A
Width of HTS tapes	4.2 mm
Thickness of HTS tapes	0.15 mm
Width of STS tapes	3.5 mm
Thickness of STS tapes	0.1 mm
No. of turns in a single pancake(SP) coil	210 turns
No. of SP coils	6 ea x 2 sets = 12 ea
Length of a SP coil	About 110 m
Total length of HTS SP coils	1320 m
Inner diameter of a SP coil	75 mm
Straight length of a SP coil	60 mm
Inductance of a set of the HTS magnet (6 SP coils)	234.17 mH
Maximum perpendicular magnetic flux density at 40 A	0.445 T
Maximum magnetic flux density	0.46 T
Estimated critical current of an HTS magnet stacked with 6 SP coils at 77 K	42.8 A

2.2. 초전도 자석 사양

500 W급 초전도 직류회전기용 고온초전도 자석 제작을 위하여 전자기 유한요소법을 적용한 고온초전도 자석 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 시뮬레이션 결과를 통하여 주요 사양을 표 1과 같이 도출하였다. 고온초전도 자석 제작을 위하여 세계 최대 고온초전도 선재 생산업체인 (주)서남의 고온초전도 선재 1.4 km를 사용했다. 4.2 mm의 폭과 0.15 mm 두께를 가지는 고온초전도 선재와 폭 3.5 mm와 두께 0.1 mm의 Stainless steel(STS) 304 tape를 금속절연코일 제작을 위해 사용하였다[5-6]. 하나의 SP(single pancake) 코일은 총 210턴으로 STS 304 tape와 초전도 선재가 동시에 권선 되었고, 총 12개의 SP 코일이 제작되었으며, 총 소요된 초전도 선재의 길이는 1.32 km이다. 액체질소온도인 77 K에서 여자 전류 40 A 통전 중 최대 수직자기자장은 0.445 T이고, 최대 자기장은 0.46 T로 계산되었다. 적층된 6개의 SP 코일의 예상되는 임계전류는 42.8 A로 추정되었다.

2.3 초전도 자석 FEM 설계

500 W급 초전도 직류회전기를 제작하기 위한 고온초전도 자석의 3차원 전자기 해석모델을 개발하였다. 자석 제작에 사용된 고온초전도 선재는 77 K에서 임계 전류가 220 A로, 210턴을 감아 1개의 SP 코일을 구성하였고, 이를 6개 SP 코일을 적층하여 초전도 자석 해석

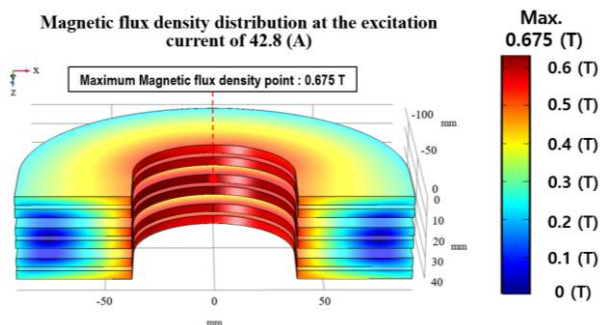


Fig. 2 Magnetic flux density distribution at the surface area in a stacked 6 SP coils with the excitation current of 42.8 A.

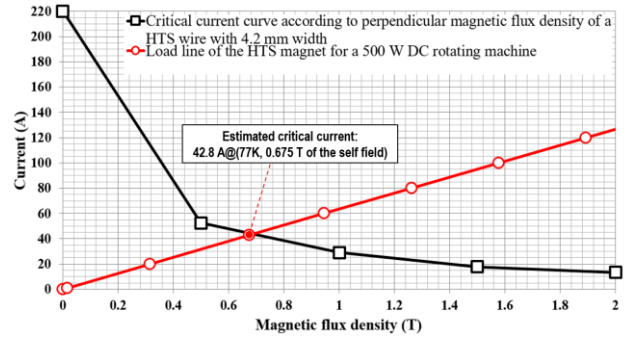


Fig. 3 The critical current of a stacked HTS magnet, considering maximum magnetic flux density of a HTS wire with 4.2 mm of the width at 77 K and load line of the magnet, was estimated

모델을 구성하였다. 3차원 자기장 분포도를 그림 2에 나타내었다.

6개의 SP 코일을 적층한 고온초전도 코일의 단면에 여자 전류 42.8 A가 통전될 때, 내부의 코일 3번과 4번에서 가장 높은 높은 자속 밀도 0.675 T가 확인 되었다. 6개 SP 코일이 적층된 초전도 자석의 77 K 온도에서 임계 전류를 예측할 때, 몇가지 방법을 사용한다. 첫째, 초전도 선재의 c 축에 걸리는 자기장, 수직자기장에 의한 임계 전류 예측 방법이 있고, 둘째로, 최대자기장을 고려하는 임계 전류 예측 방법도 있고, 이는 전자와 동일하게 예측하는 방법이지만 더 보수적인 임계 전류 예측 결과를 얻는다. 초전도 자석의 온도를 특정하지 못하는 환경, 즉 전도냉각시스템에서는 자기장, 각도, 온도를 모두 고려한 예측 방법이 주로 사용된다. 본 논문에서는 초전도 직류전동기에서 초전도 자석 운전 온도를 77 K으로 설정하였고, 최대자기장을 고려하여 더 보수적으로 임계 전류를 예측하였다. 그림 3과 같이 초전도 선재가 77 K 온도에서 수직 자기장에 따른 임계 전류 곡선 위에 초전도 자석의 부하특성곡선을 동시에 나타내었고, 서로 만나는 점을 임계 전류로 예측하였다. 최대 자기장 0.675 T에서 임계 전류는 42.8 A로 예측되었다.

3. 초전도 자석의 제작

3.1. 초전도 자석의 설계

500 W 급 초전도 직류 회전기용 초전도 자석을 설계하기에 앞서, 기존 200 W의 내부구조 및 회전자의 외형 치수를 확인하기 위해 그림 4와 같이 분해 및 단면을 확인하였다. 기존 200 W급 직류 회전기의 계자는 원형

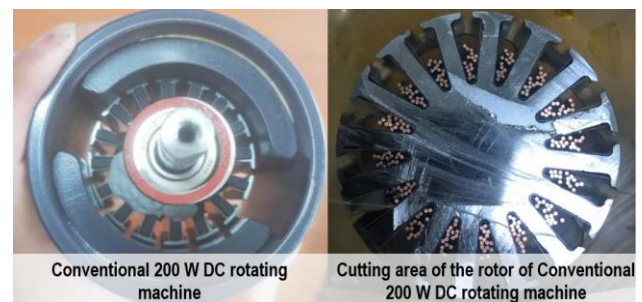


Fig. 4. An internal structure of conventional 200 W DC rotating machine.

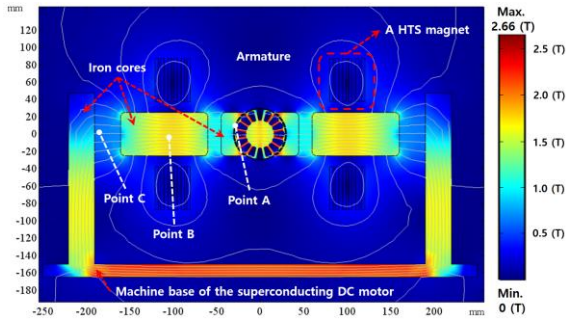


Fig. 5. Magnetic flux density distribution of the 500 W-class superconducting DC rotating machine.

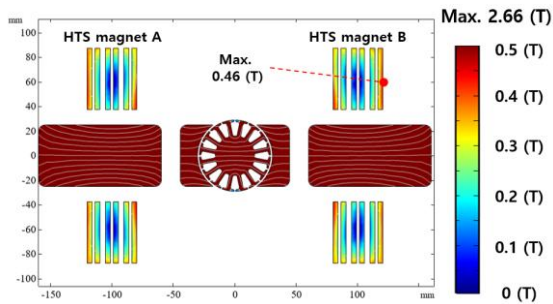


Fig. 6. Magnetic flux density distribution of two HTS magnets with iron cores, excluding the color distribution of the magnetized iron cores.

타입의 영구 자석이 양쪽으로 원형케이스에 부착되어 있고, 내부에 회전자가 전기자 철심과 함께 조립되어 있다.

기존 회전전기자의 외형 치수를 직접 측정하였고, 이를 FEM 해석 모델에 반영하여 전자기 해석을 수행하였다. 그림 5는 500 W급 초전도 직류회전기의 전자기 해석 결과를 나타내었다. 여자 전류 40 A에서 전기자와 계자 철심 사이의 공극 자속 (Point A)이 최대 0.9 T까지 달성할 수 있도록 초전도 자석의 위치와 철심의 형상을 가공 가능한 범위 내에서 선정하였다.

고온 초전도 자석이 500 W급 초전도 직류 회전에 장착되었을 경우, 초전도 자석의 자기장 분포를 확인하여 임계 전류의 감소 여부를 확인하였다. 계자 철심을 포함한 전자기해석을 수행하였고, 철심의 자기포화결과를 제외한 초전도 자석의 자속밀도분포를 그림 6과 같이 나타내었다. 두개의 초전도 자석의 자속밀도분포는 좌우 대칭으로 결과를 얻었고, 적층된 초전도 자석의 최외각 코일의 중심부에서 최대 자기장 0.46 T가 도출됨을 확인하였다. 이 결과는 임계 전류를 예측하기 위해 철심이 없는 경우, 42.8 A에서 최대 자기장 0.675 T 얻은 결과와 비례식으로 비교하였을 때, 최종 조립된 후 초전도 자석의 임계 전류는 감소하지 않는다는 결론을 도출하였다.

### 3.2. 초전도 자석의 자기장 특성

서로 마주보는 두개의 초전도 자석 A와 B는 각 6개의 SP 코일을 적층하여 구성되고, 총 12 개의 SP 코일이 제작되었다. 6개의 SP 코일로 구성된 고온초전도 자석 A와 B는 여자 전류 중·방전 테스트를 통해 성능평가를 수행하였다. 제작에 앞서, 설계된 초전도 자석의 전자기 FEM 모델에서 여자전류를 증가시킴에 따라 자기장의 세기를 그림 7에 나타내었다. 제작된 초전도 자석의 자기장 측정 위치와 동일한 위치에서 자기장을 비교 및 확인하기 위해 그림 7의 3차원 초전도 자석 형상과 같이 보빈커버로부터 10 mm 위치한 곳을 대각선방향으로 110 mm 정도의 구간에 따른 자기장 크기 값을 나타내었다.

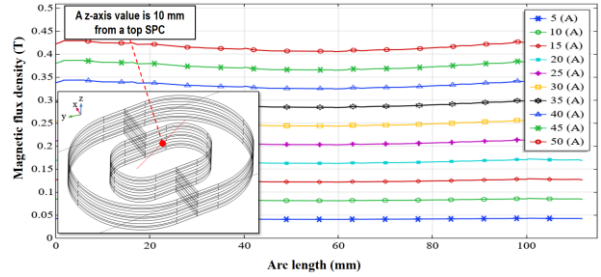


Fig. 7. Magnetic flux density curves at the 10 mm from a top SP coil according to excitation current increment.

초전도 자석의 중심에서 자기장은 여자전류 40 A 에서 약 0.33 T 로 계산되었고, 가장 높은 자기장은 0.35 T 로 자석의 원형 가장자리로 갈수록 증가하는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인 하였다. 이 결과는 4장의 초전도 자석 운전특성평가 결과와 비교되었다.

### 3.3. 초전도 자석의 제작 및 평가준비

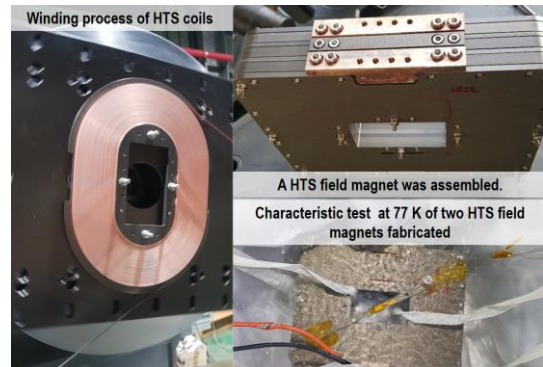


Fig. 8. Fabrication process of the two HTS magnets with LN<sub>2</sub> chambers.

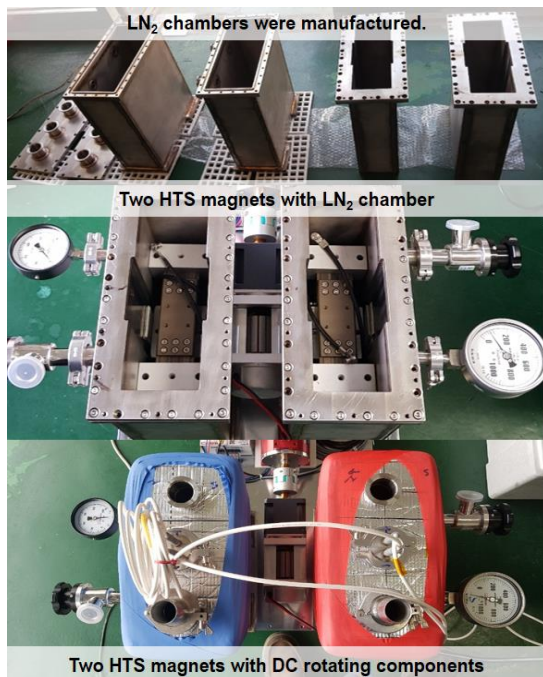


Fig. 9. Fabrication process of the two HTS magnets with LN<sub>2</sub> chambers.

500 W급 초전도 직류 회전기용 초전도 자석을 그림 8과 그림 9와 같이 설계도를 기준으로 제작하였다. 고온초전도 자석 제작을 위해 가공된 보빈에 권선을 수행하였고, 권선이 완료된 6개의 SP 코일을 전기적으로 연결함과 동시에 1개의 적층 코일로 조립 후 완성하였다. 액체질소 조건에서 고온초전도 자석 A와 B의 임계 전류를 측정하였다. 초전도 자석은 진공이 유지되는 액체질소 챔버 내에 조립되고 여자된다. 진공 챔버에 진공도를 측정하기 위한 진공계이지와 진공 포트를 연결하였고, 자석에 여자 전류 공급을 위한 전류 리드를 설치하였으며, 커버를 씌워 액체질소 기화를 최소화 하였다.

#### 4. 초전도 자석의 운전특성

##### 4.1. 초전도 자석의 임계전류 및 자기장 특성

500 W 급 초전도 직류 회전기용으로 제작된 초전도 자석 A의 여자 전류 충·방전에 따른 중심 자기장과 양단전압특성을 그림 10에 나타내었다. 여자전류가 45 A까지 증가함에 따라 양단전압이 점점 상승하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 고온초전도 자석 A의 임계 전류는  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  기준에 따라 약 43 A로 측정되었고, 그 때 자기장은 0.32 T로 측정되었다. 이 자기장은 전자기 해석모델에서 예측된 값과 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 11은 500 W 급 초전도 직류 회전기용으로 제작된 초전도 자석 B의 여자 전류 충·방전에 따른 중심 자기장과 양단전압특성을 나타내었다. 여자전류가 45 A까지 증가함에 따라 양단전압이 점점 상승하기 시작하는 것을 확인할 수 있었고, 이 때,  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  기준에 따라 약 43 A로 임계전류를 확인하였다. 이 값은 자석 A 동일함을 확인하였고, 두 초전도 자석의 특성 또한 일치 함을 확인 하였다. 여자전류 40 A에서 자기장은 0.32 T로 측정되었다.

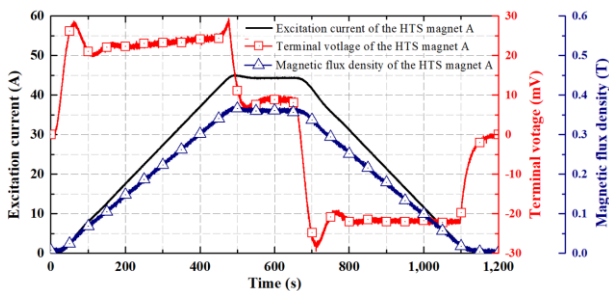


Fig. 10. Changing and discharging test result of the HTS magnet A.

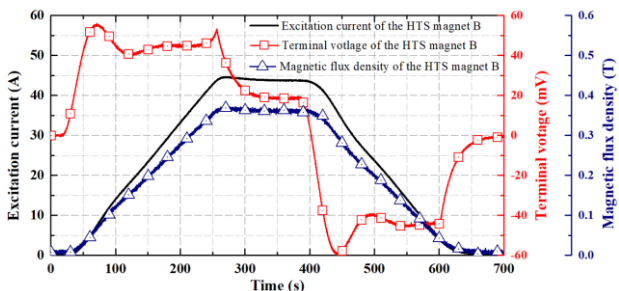


Fig. 11. Changing and discharging test result of the HTS magnet B.

#### 5. 결론

본 논문에서는 500 W급 초전도 직류전동기를 위한 액체질소 운전용 초전도 자석을 설계하여 여자전류를 증가시키면서 자기장 특성을 분석하여 나타내었다. 초전도 자석 계자와 전기자 사이의 공극 자속 밀도는 최대 0.9 T 이상을 얻기 위한 설계사양을 도출하였고, 이에 따라, 직접 권선하여 제작하였다. 액체질소 온도에서 초전도 자석의 임계 전류를 측정하여 임계 전류 43 A로 최대 여자 전류 40 A까지의 운전가능범위를 확인하였다.

본 논문에서 성능 평가된 초전도 자석 특성 결과를 바탕으로 500 W급 초전도 직류 회전기를 최종조립하여 운전한 결과를 다음 논문에서 다룰 예정입니다.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Collabo R&D Program (S2897739) funded by the Small and Medium Business Administration (SMBA, Korea).

#### REFERENCES

- [1] J. Bae, J. Bae and Y. Kim, *Design of Electric Machines handbook*. Deohasim Publisher, 2017.
- [2] J. Choi et al., "Design and Performance Evaluation of a Multi-Purpose HTS DC Induction Heating Machine for Industrial Applications," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-5, 2015, Art no. 3700105, doi: 10.1109/TASC.2014.2365540.
- [3] S. Dai et al., "Development and Test of One Commercial Megawatt Superconducting DC Induction Heater With Extra High Energy Efficiency," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 3301-3314, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047685.
- [4] J. Choi et al., "Commercial Design and Operating Characteristics of a 300 kW Superconducting Induction Heater (SIH) Based on HTS Magnets," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, 2019, Art no. 3700105, doi: 10.1109/TASC.2019.2899461.
- [5] S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan and Y. Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2093492.
- [6] S. Noguchi, "Electromagnetic, Thermal, and Mechanical Quench Simulation of NI REBCO Pancake Coils for High Magnetic Field Generation," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, pp. 1-7, 2019, Art no. 4602607, doi: 10.1109/TASC.2019.2904317.