

대용량 전류 및 AC/DC 측정용 소형 코어리스 전류 센서 개발

Kazuma Takenaka^{*1} Minako Terao^{*1}
Naoki Noguchi^{*1} Kotaro Ogawa^{*2}

우리는 현재 1000A 범위의 대용량 전류를 측정할 수 있고, 좁은 공간에서 도체를 클램핑(clamping)하여 전류를 측정함으로써 DC에서 수 MHz의 주파수 범위에서 작동할 수 있는 소형 코어리스 전류 센서를 개발해 왔습니다. 자기 코어(Magnetic Core)가 없기 때문에, 크기를 크게 줄일 수 있는 장점이 있지만 전기 도체로부터 자기장의 위치 의존성과 외부 환경 및 주변 전류로부터 발생하는 백그라운드 노이즈라는 두가지 중요한 문제가 발생합니다. Yokogawa는 이러한 자기 코어 기능을 보완하기 위해 도체의 위치를 추정하는 알고리즘과 백그라운드 자기장을 상쇄하는 자기 차폐 실드를 개발하였습니다. 본 논문에서는 이러한 기술과 실험 결과에 대한 개요를 제시합니다.

개요

순배출 제로(net-zero emission)와 순환 경제(circular economy)의 사회적 도전 문제를 해결하기 위해 전력가시화를 통한 효율적인 에너지 사용 방법이 요구되고 있습니다.⁽¹⁾ 전류 센서는 전력 공급/제어 회로의 평가나 낮은 전류의 측정과 같은 다양한 목적의 탐지 방법으로 널리 사용되며, 이는 FPGA (Field-Programmable Gate Arrays)나 다른 낮은 전압 기기의 소비전력 측정에서부터 공장 장비의 소비 전력 측정, 모터의 효율 측정, 풍력 터빈 발전기나 태양광 전기 배터리의 출력 전력 측정과 같은 대전류 측정에 이르기까지 다양한 용도로 활용됩니다. 최근 환경에 대한 인식의 증가와 함께 하이브리드 차량 (이후 HV) 및 전기차 (이후 EV)가 전세계적으로 인기를 얻고 있습니다. HV 및 EV의 경우, 절전을 위한 고주파 인버터, 모터 성능을 향상시키기 위한 대용량 전류 및 고도로 통합된 전력 모듈을 사용하는 기술로 전환되고 있는 추세이고, 이러한 전환은 넓은 대역폭과 대전류 측정 능력을 갖춘 소형 전류 센서에 대한 수요를 증가시키고 있습니다.

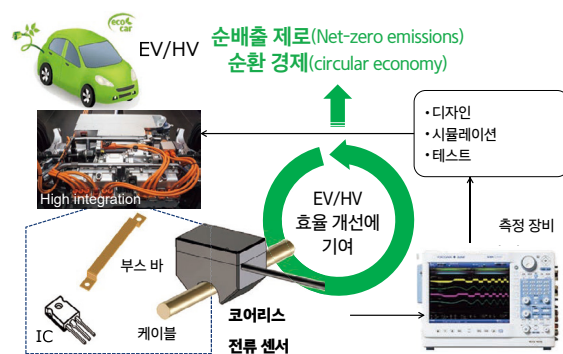


그림1 코어리스 전류 센서의 부가가치

그림 1과 같이 EV 또는 HV의 개발 과정 또는 실제 차량 테스트 중 배터리와 모터 사이의 전류를 측정할 수 있다면, 해당 측정값을 설계나 제어에 통합시켜 전력 효율을 개선시키는 데 도움이 될 수 있습니다. 다시 말해 더 효율적으로 에너지를 사용할 수 있을 것입니다. 기존에 사용하던 전류 센서에는, 코일을 사용한 Rogowski 센서, 자기 코어와 코일이 포함된 전류 트랜스포머 (CT), 자기 코어와 자기 센서가 포함된 밸런스형 전류 센서 등이 있습니다. Rogowski 센서는 협소한 공간에 설치할 수 있는 전류 센서로 널리 사용돼 왔습니다. 이러한 센서는 코일을 사용하여 전도체 주변의 자기장을 감지합니다. 그

^{*1} Sensing R&D Department, Innovation Center,
Marketing Headquarters

^{*2} DX Design Department, Innovation Center,
Marketing Headquarters

러나 이들은 주로 교류 (AC) 전류만 측정할 수 있다는 문제가 있습니다. 다른 한편으로, 자기 코어를 가진 전류 센서는 다음과 같은 두 가지 주요 장점이 있습니다: (1) 전도체 주위에 발생하는 자기장의 자기 흐름을 수집하기 때문에 위치 의존성이 낮습니다. (2) 자기 코어 내에서 외부 자기장을 상쇄시키기 때문에, 외부 자기장의 영향을 적게 받을 수 있습니다. 다시 말해, 자기 코어가 있는 기존 전류 센서의 경우, 전도체와의 상대적인 위치와 상관없이 설치할 수 있습니다. 또한 이를 사용하여 외부 자기장에 저항성이 있는 고정밀 전류 측정이 가능합니다. 그러나, 대전류 측정을 위해서는 더 큰 자기 코어가 필요하게 되어, 측정 중인 전도체에 대한 접근성이 나빠지게 되는 문제가 있습니다. 이와 같은 도전 과제를 해결하기 위해 우리는 넓은 대역폭과 대전류 측정 기능을 갖춘 작은 바디의 코어리스 전류 센서 개발을 추진하고 있습니다. 표 1에서 이 센서에 대한 목표 사양을 확인할 수 있습니다.

표 1 코어리스 전류 센서의 목표 규격

아이템	목표 규격
목표 대상	케이블 (원형 단면)
최대 전류 값	1,000Arms
대역폭	DC-10MHz
허용오차	5%
헤드 치수	35x40x50mm3

이 논문에서는 자기 코어가 없는 코어리스 전류 센서로의 전환에 있어 위 두 가지 도전에 대한 해결책으로 다음과 같은 두 가지 유형의 전류 센서를 제시하는 바입니다: (1) 전도체 위치를 추정할 수 있는 내장형 위치 추정 알고리즘을 갖춘 전류 센서,⁽²⁾ 여러 개의 자기 센서를 사용하여 전도체의 위치를 추정하는 방법, 그리고 (2) 외부 자기장의 영향을 자기 센서에서 상쇄시키는 자기 차폐 실드를 갖춘 전류 센서⁽³⁾입니다.

위치 추정 알고리즘을 활용한 전류 센서

HV나 EV의 컨버터와 인버터 사이에서 흐르는 전류를 단일 자기 센서를 사용하여 측정하려는 시도는 측정 중인 전류 (이하 ‘발산 전류’)가 근처에서 반대 방향으로 흐르는 전류 (이하 ‘유입 전류’)의 자기장으로 인하여 영향을 받게 된다는 문제에 직면하게 됩니다. 이에 따라 우리는 이러한 발산 전류와 유입 전류가 흐르는 병렬 전도체를 가정하였습니다. 따라서 우리는 발산 전류 및 유입 전류로부터 자기장을 따로 분리하기 위해 둘 이상의 디지털 자기 센서를 사용하여 전도체 위치를 추정하는 위치 추정 알고리즘을 개발하였습니다. 이 회로는 측정 중인 케이블과 자기 센서 사이의 거리를 기초로 하여 아날로그 자기 센서 출력을 보정하고, 그 결과를 실시간으로 아날로그 전압 출력으로 생성하였으며, 이러한 출력을 사용하여 DC에서 저주파 전류를 측정할 수 있는 자기 센서와 낮은 주파수 ~ 수 MHz까지 AC를 측정할 수 있는 Rogowski 센서를 결합하였습니다.

그림 2에서 전류 센서 헤드의 구성도를 확인할 수 있습니다. 센

서 헤드에는 4개의 디지털 3축 자기 Hall IC와 1개의 아날로그 1축 선형 Hall IC가 포함돼 있습니다. 디지털 3축 자기 Hall IC는 소자 특성 상 약 10 msec의 지연이 발생하고, 따라서 파형 출력을 생성하는데 적합하지 않습니다. 한편, 아날로그 1축 선형 Hall IC의 경우 지연 시간은 약 200 μ sec 이상으로 짧지만, 1축이기 때문에 자기 벡터를 측정할 수 없습니다. 따라서 우리는 파형 출력에 아날로그 1축 선형 Hall IC를 사용하고, 보정 계수를 계산하는데 디지털 3축 자기 Hall IC를 사용하는 방식의 하이브리드 디자인을 채택하였습니다. 이 구성에서 자기 센서는 합성수직으로 만든 하우징으로 덮여 있으며, 센서 헤드에 Rogowski 센서를 부착하였습니다. 자기 및 Rogowski 센서 신호는 센서 헤드와 독립된 회로 모듈에서 처리되어 센서 헤드의 크기를 더욱 축소시킬 수 있었습니다. 이러한 구성으로 인하여 대전류를 측정할 수 있는 소형 센서 헤드가 구성되었고, 크기와 부피는 기존의 CT 유형의 약 1/8정도입니다.

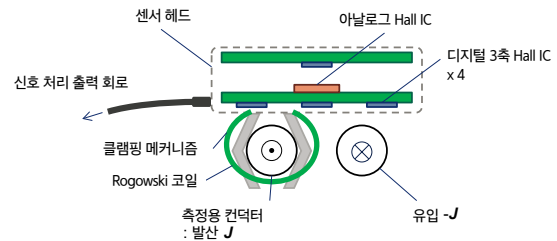


그림2 센서 헤드의 계통도

그림 3은 신호 처리 회로의 블록 다이어그램입니다. 앞에서 설명한 바와 같이, 자기장 측정에는 두 종류의 Hall IC가 사용됩니다. 아날로그 1축 선형 Hall IC는 자기장을 측정하는 데 사용되고, VGA (variable gain amplifier - 가변 게인 증폭기)는 출력 신호를 보정하는 데 사용됩니다. VGA 게인은 FPGA에 의하여 제어됩니다. FPGA에 내장된 위치 추정 알고리즘은 4개의 디지털 3축 자기 Hall IC의 자기장 측정값을 기초로 추정한 전도체의 위치에 따라 VGA 게인을 설정합니다. 또한, 자기 센서는 DC에서 저주파 전류 측정에 사용되고, Rogowski 센서는 낮은 주파수 ~ 수 MHz 사이의 AC를 측정하는 데 사용됩니다. 전자 (former) 센서로부터의 신호는 LPF (low-pass filter - 저대역 통과 필터)를 통과시키고, 후자 (latter) 센서로부터의 신호는 HPF (high-pass filter - 고대역 통과 필터)를 통과시킨 후 주파수를 일치시키고 결합하게 됩니다.

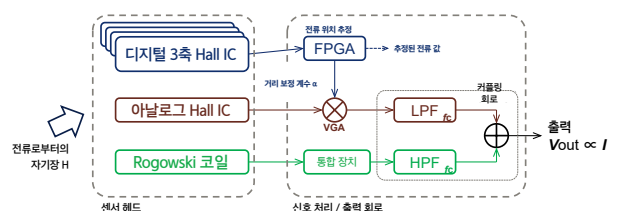


그림3 신호 처리 회로의 블록 다이어그램

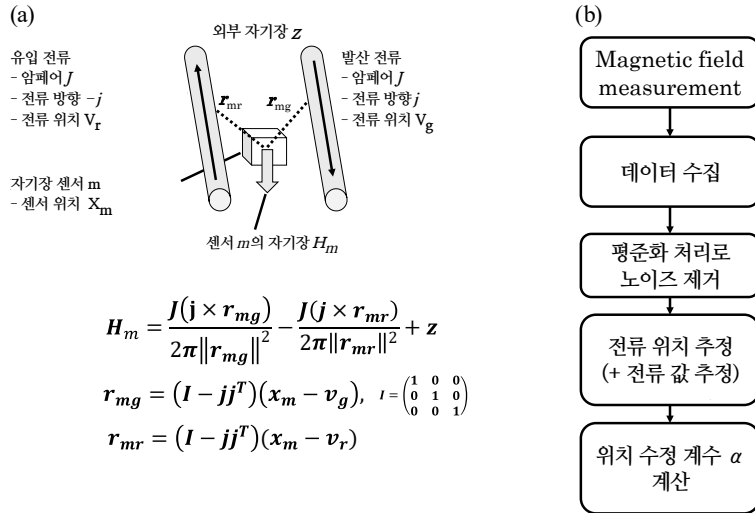


그림4 (a) 병렬 전도체를 통해 흐르는 전류로부터 자기장이 적용된 자기 센서의 계통도와 자기 센서에 적용된 자기장의 기본 방정식 (b) 보정 계수를 구하기 위한 플로 차트

그림 4 (a)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 위치 추정 알고리즘은 유입 전류가 발산 중인 전류와 근접하고 평행하며, 반대 방향으로 흐르는 것을 가정합니다. 따라서 여기에는 센서에서 나가는 전류와 들어오는 전류에 의해 유도된 자기장의 조합이 적용됩니다. 센서 헤드의 디지털 3축 Hall IC는 유출되는 자기장 H_{mg} ($m = 1 \sim 4$), 각각의 유출 및 유입되는 전류에 따른 유입 자기장 H_{mr} , 그리고 현재의 전류와 상관없이 균일하게 작용하는 배경의 자기장 z 에 노출되게 됩니다.

이 경우, 각각의 자기장 센서에 적용되는 자기장 H_m 은 그림 4 (a)의 방정식과 같이 표현할 수 있습니다. 4개의 디지털 3축 Hall IC에서 측정된 자기장 벡터와 미리 정의된 센서의 위치로부터 4개의 연립 방정식을 유도할 수 있습니다. 전류 방향 벡터와 자기장 벡터가 수직으로 만나기 때문에 도체의 위치, 자기 센서의 위치 및 자기장 벡터는 전류에 수직인 평면에 투영시킬 수 있습니다. 이 세 가지를 3차원 공간에서 2차원 평면으로 투영시키면, 복잡한 계산 없이 도체의 위치 r_{mg} 와 r_{mr} 를 결정할 수 있습니다. 도체의 위치 r_{mg} 와 r_{mr} 는 디지털 3축 Hall IC와 도체의 위치 벡터에 해당하고, 따라서 이는 아날로그 1축 선형 Hall IC와 도체 사이의 위치 벡터로 수정되고 보정 계수를 결정할 때 사용됩니다. 이 계산에 대한 자세한 사항은 Reference Paper (2)를 참조하기 바랍니다. 그림 4 (b)에서 위치 추정 알고리즘을 사용하여 보정 계수를 도출하는 플로 차트를 확인할 수 있습니다. 자기장 측정 데이터를 수집하고 노이즈를 제거하며 부호를 할당한 후 전류 위치를 추정할 수 있습니다.

그림 5에서 테스트 설정 방법을 확인할 수 있습니다. 먼저 두께가 5mm인 알루미늄 막대 2개를 중심 간격이 14mm가 되도록 평행하게 배치합니다. 전류원에서 양극과 음극을 각각 두 개의 알루미늄 막대의 한쪽 끝에 연결하였고, 다른 한쪽 끝은 단락시켰습니다. 센서 헤드의 경우, Rogowski 코일을 하나의 도체에 클램핑한 상태로 측정 도체 위에 배치하였습니다. 참조를 위해 측정 도체를 전류 프로브와 클램핑하여 측정 작업을 수행하였습니다. 이 예시의 경우, 그림 6에

서 계산한 보정 계수를 사용하여 그림 6과 7에 없는 데이터를 평가하였습니다. 추정된 전류의 정확성을 평가하기 위해 적용한 전류와 추정된 전류 사이의 오차는 -60 ~ +60A까지 10A의 간격으로 평가하였습니다.

그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 인가된 전류와 추정된 전류는 선형성을 띠고 있다는 사실을 확인할 수 있었습니다. 또한 샘플 수가 1일 때 오차를 (입력 전류값 - 센서 측정값) / (센서 간격)으로 정의한 경우, 1,000A 플 스케일에 대한 오차는 $\pm 0.3\%$ 이내로 확인되었습니다. 잠재적인 에러 인자는 디지털 3축 자기 센서의 노이즈 플로어 (Noise Floor) 효과가 될 수 있습니다.

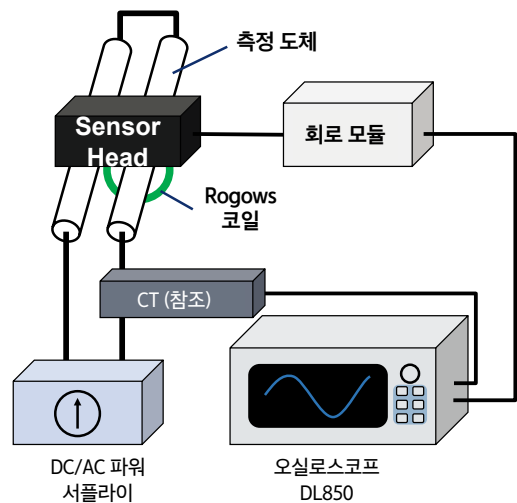


그림5 테스트 설정

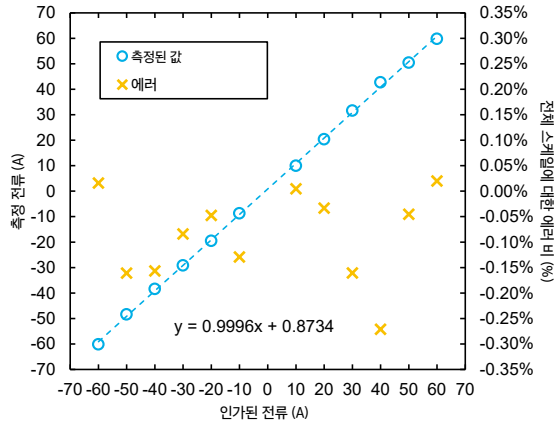


그림6 추정된 전류의 정확성 vs 인가된 전류의 변화

그 후, 도체와 센서의 상대적인 위치로 인하여 인가된 전류와 추정된 전류 사이의 오차를 평가하였습니다. 센서 헤드를 도체 사이의 중심에 오도록 배치하고 전류를 60A DC로 설정한 후, 도체 간격을 변화시켜 측정 작업을 수행하였습니다. 그림 7에서 확인할 수 있는 바와 같이, 비록 샘플 수가 1일 지라도 추정된 오차는 $\pm 2.5\%$ 이내로 확인되었습니다. 도체의 간격을 14mm에서 29.5mm로 변경하였을 때, 자기 센서에 적용되는 결합된 자기장의 계산값은 약 20% 정도의 변화가 있었습니다. 그러나 결과적으로 오차는 $\pm 2.5\%$ 의 범위 내에서 유지하였고 도체와 센서 사이에서 상대적인 위치에 변동성이 있었음에도 불구하고, 위치의 보정 작업이 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었습니다.

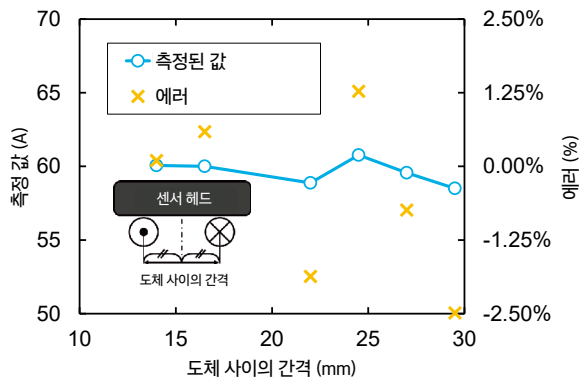


그림7 추정된 전류의 정확성 vs. 변화하는 도체 사이의 간격

그림 8에서 저주파 및 고주파 측정 신호가 결합 회로를 통해 추가된 후 주파수 특성의 평탄성을 평가한 결과를 확인할 수 있습니다. 진폭을 20Ap-p로 고정하고, 1Hz ~ 1kHz의 주파수 범위로 측정 작업을 수행하였습니다. 여기에서는 주요 측정 신호가 Rogowski 센서의 신호이기 때문에 1kHz를 초과하는 주파수는 표시되지 않았습니다. 1kHz에서 측정된 값을 참조로 사용한 경우, 샘플 수가 1일 때에도 오차는 약 0.2 dB 수준으로 유지되고 있었음을 확인할 수 있었습니다. 이러한 에러는 Rogowski 센서와 도체의 위치 변화로 인한 것

이었고 이는 허용오차 범위 내에 포함되는 정도입니다.

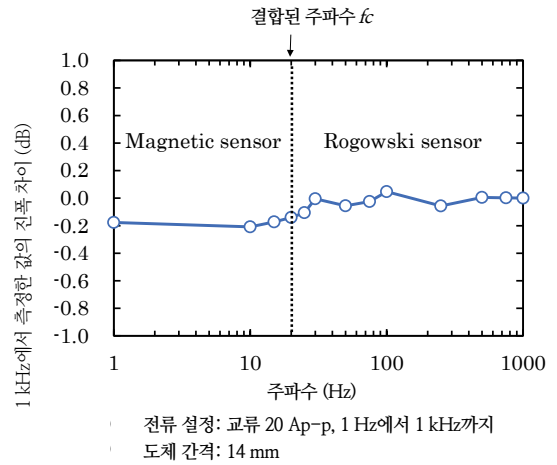


그림8 주파수 특성

Rogowski 센서만 사용하여 방형파를 측정하는 경우, 전류가 일정하고 평탄한 구간에서 드루핑 (drooping) 특성이 나타났습니다 ('드루핑'은 DC 전류에 반응하지 않고 출력 전압이 감소하는 현상을 의미합니다). 이 전류 센서를 사용하여 20 Ap-p, 1 kHz의 방형파 측정 작업을 수행하는 경우, 그림 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 측정된 파형은 방형파의 상승 및 하강 특성을 따르고, 드루핑 특성은 보이지 않으면서 방형파를 재현하는 것으로 확인되었습니다.

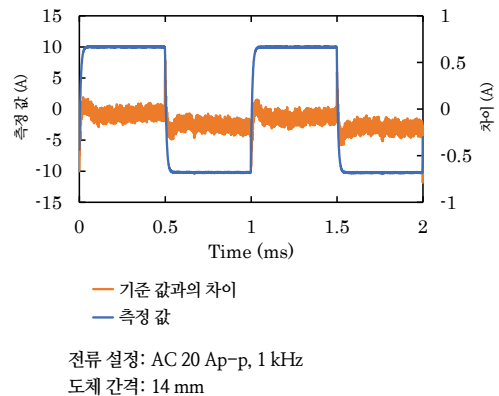


그림9 방형파의 측정

자기장 차폐 전류 센서

위의 위치 추정 알고리즘은 방출 전류와 유입 전류가 흐르는 일반적으로 사용되는 평행한 도체를 가정하였습니다. 따라서 3상 모터에서 사용되는 3상 교류 전류와 같은 다른 종류의 전류를 측정하려면 이 알고리즘을 확장시켜야 합니다. 또한 인접한 전류로 인하여 노이즈가 있는 자기장 효과를 근본적으로 최소화하기 위해 위치 추정 알고리즘을 클램핑 메커니즘에 적용한 후 자기 센서에 자기 차폐 기능을 추가하는 디자인을 고려하였습니다. 그림 10은 자기장이 차폐된

전류 센서 헤드의 계통도입니다. 채택된 디자인에서 자기 센서로부터 도체 중심까지의 거리는 클램핑 메커니즘에 의하여 결정됩니다. 이 자기 센서가 감지할 수 있도록, 측정용 케이블에 의하여 생성되는 자기장의 경우 반드시 자기장을 차폐해야 합니다. 따라서, 자기장 차폐 시 바닥은 C 형상 슬롯의 갈라진 틈으로 측정 케이블을 삽입할 수 있도록 개구부가 마련돼 있습니다. 자기 센서와 거의 동일한 위치에 작은 교류 측정 코일이 제공되므로 Rogowski 센서를 케이블로 감싸는 것은 더 이상 필요하지 않습니다.

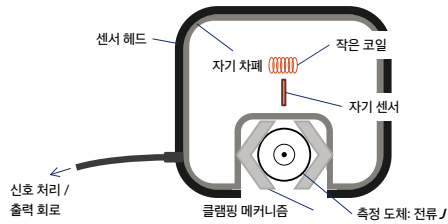


그림10 자기장 차폐 전류 센서의 계통도

여기서 제시한 자기 차폐를 설계하기 위해 먼저 전자기장 시뮬레이션을 실행하였고, 자기 차폐 시 측정 중인 도체로부터의 자기장 신호와 인접한 전류로부터의 외부 자기장을 추정하여 신호 대 노이즈 (S/N) 비를 결정하였습니다. 3상 교류 값을 측정하는 것을 가정하였고, S/N 비의 목표값을 100으로 설정하였는데, 이는 이 정도면 작은 크기의 전류 센서에 대하여 자기장을 차폐함에 있어 운용상 문제없이 충분할 것으로 추정되었기 때문입니다. 그림 11은 자기 차폐 시뮬레이션 모델입니다. 이 시뮬레이션에서는 정적 전자기장 솔버 (solver)인 Maxwell (ANSYS Electronics Desktop)을 사용하였습니다. 시뮬레이션에서 신호는 측정 중인 도체를 통해 흐르는 100-A 전류에 의하여 유도된 자기장이었고, 또한 각각 x, y 및 z 축 방향의 균일한 외부 자기장으로써 25mm 떨어진 인접한 도체를 통해 흐르는 동일한 전류에 의해 생성되는 자기장과 유사한 1 mT 자기장이 적용되었습니다. 시뮬레이션에서 노이즈는 자기 차폐 시 자기 센서에 의하여 감지된 값입니다.

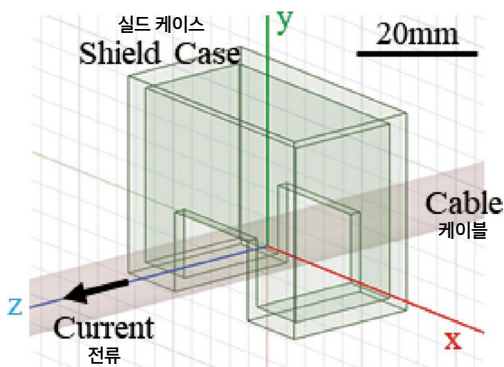


그림11 자기 차폐의 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 결과는 그림 12에서 확인할 수 있습니다. 자기 차폐 내 유속 밀도의 분포가 왜곡되었고, 이는 위 좌측 패널에서 확인할 수 있습니다. 그러나, y 방향의 차폐 중심 축에서 신호의 자기 유속 밀도 벡터는 x 방향의 요소로만 구성됩니다. 따라서, 이 분포가 신호 측정에 있어 가장 효율적이라는 사실이 입증되었습니다. 이에 따라 자기 센서를 설치할 때 자기적으로 민감한 방향으로 중심 축의 x 방향을 사용하기로 결정하였습니다. 위 우측 및 아래 우측 패널의 경우, 외부 자기장은 x 및 z 방향에서 거의 자기 차폐에 영향을 미치지 않았다는 사실을 확인할 수 있습니다. Y 방향 (아래 좌측 패널)에서는 열린 부분으로 인하여 자기 차폐 내에서 자기 유속 밀도가 분포되었습니다. 그러나 자기 센서는 거의 영향을 받지 않았고, 그 이유는 자기적으로 민감한 방향이 x 방향이고 또한 노이즈 성분과 수직이기 때문입니다.

그림 13은 위 시뮬레이션 결과에 기초하여 차폐 중심 축의 각 지점에서 x 방향의 자기 유속 밀도에서 도출한 S/N 비입니다. 위에서 설명한 대로 y 및 z 방향에 대한 S/N 비를 100 이상으로 설정하였습니다. 또한 케이블로부터의 거리에 따라 x 방향의 S/N 비를 100 이상으로 유지하는 것이 가능하다는 사실을 확인할 수 있었습니다.

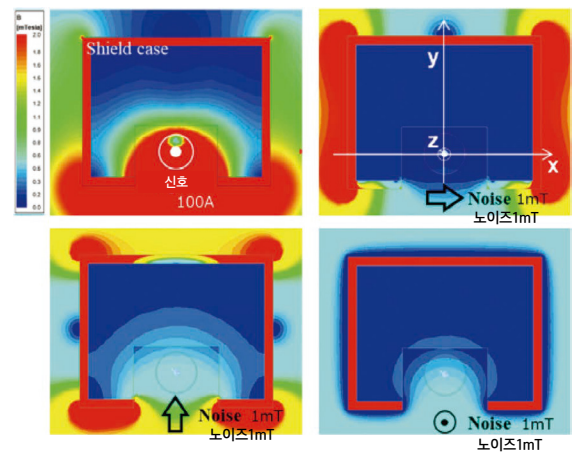


그림12 자기 유속 밀도 분포

위 좌측: 도체에 전류를 공급하는 중의 자기 유속 밀도
위 우측, 아래 좌측 및 아래 우측: 자기 차폐 내에서 x, y, z 방향에 외부 자기장이 적용될 때 자기 유속 밀도

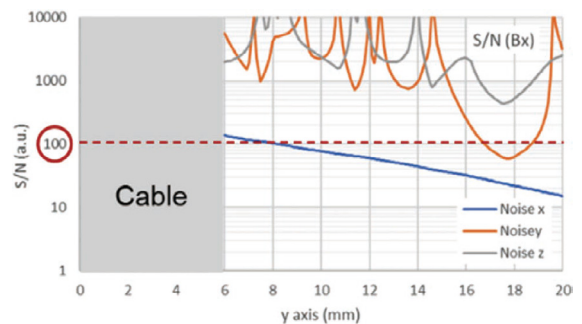


그림13 위 좌측: 도체에 전류를 공급하는 중의 자기 유속 밀도

그림 14에서는 각 축에 대한 시뮬레이션과 그 측정 결과를 확인할 수 있습니다. 또한 센서 위치를 조정하여 최적의 S/N 비를 구하였습니다. 열린 부분에서는 케이블로부터 거리가 멀어질수록 신호가 감소하게 되고 이는 노이즈 역시 마찬가지입니다. 자기 차폐의 형상을 다시 조정하고 센서를 다시 배치함으로 모든 방향에서 약 100 정도의 S/N 비를 확보할 수 있는 작은 자기 차폐를 성공적으로 구현하게 되었습니다.

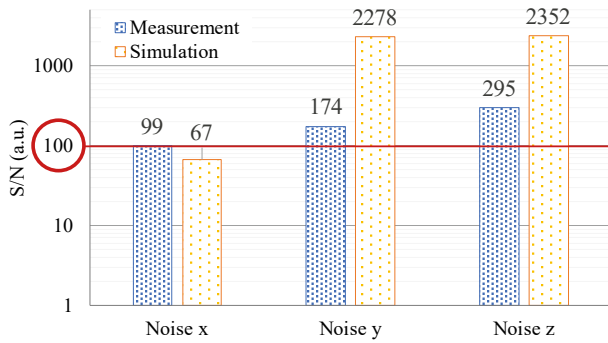


그림14 각 축에서 신호 대 노이즈 비

다음으로 대전류 측정 결과를 확인해 보겠습니다. 이 측정에서는 대전류로써 500 Arms 및 50 Hz 사인파 전류를 사용하였습니다. 그림 15에서는 자기 차폐 내 작은 코일에 의한 측정 결과를 확인할 수 있습니다. 이 결과를 통해 자기 차폐가 포화되지 않은 상태임을 확인할 수 있었고, 사인파는 참조로 사용한 Rogowski 센서가 감지한 그것과 유사하였습니다. 작은 코일의 하부에 있는 적분 회로를 통하여 출력 신호를 구하였고, 이를 통하여 양호한 주파수 특성을 구할 수 있었습니다. 이러한 관찰 결과 자기 차폐에 수납된 작은 코일 역시 Rogowski 센서와 유사하게 대전류를 측정할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었습니다. 다음으로, 그림 16에서는 자기 차폐 내 자기 센서를 사용하여 대전류를 측정한 결과를 확인할 수 있습니다. 작은 코일의 경우 이 또한 자기 차폐가 포화되지 않았고, 도출한 사인파는 참조용 CT 전류 센서를 통하여 감지한 것과 유사하였습니다. 또한 신호 왜곡은 약 1%를 유지하였기 때문에 이 자기 센서를 대전류 측정에 사용할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었습니다.

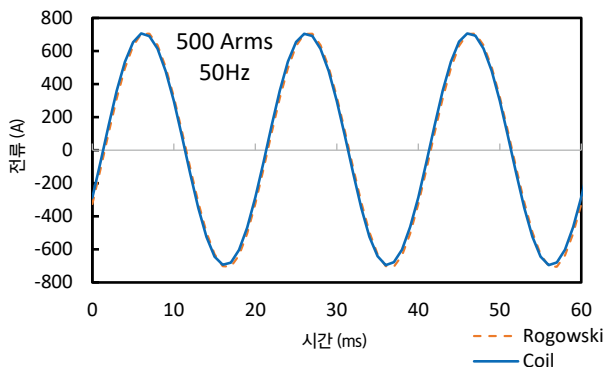


그림15 자기 차폐 내 작은 코일에 의한 사인파 전류 측정 결과

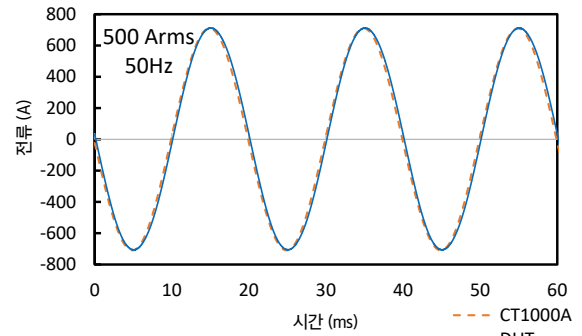


그림16 자기 차폐 내 자기 센서에 의한 사인파 전류 측정 결과

결론

이 논문은 병렬의 도체에 흐르는 전류를 측정하는 데 사용되는 위치 추정 알고리즘에 기초한 전류 센서 및 3상 교류를 측정하기 위한 자기 차폐 전류 센서를 제시하였습니다. 위치 추정 알고리즘에 기초한 전류 센서에서 센서 헤드, 신호 처리 및 알고리즘의 조합을 사용하여 다양한 유형의 전류를 측정할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었습니다. 자기 차폐 전류 센서의 내부 위치를 조정하여 운영 시 문제없는 S/N 비를 보장할 수 있는 작은 자기 차폐를 구현할 수 있었습니다. 또한 자기 센서와 작은 코일을 사용하여 대전류를 측정할 수 있다는 사실도 확인할 수 있었습니다.

우리는 이러한 기술을 활용하여 새로운 코어리스 전류 센서를 개발할 것을 고려하고 있습니다. 앞으로 1,000A의 대전류, 수십 kHz 이상의 고주파, 3상 교류 전류 또는 이와 유사한 전류를 측정하여 우리 기술의 실용성을 검증할 계획입니다.

REFERENCES

- (1) Tomoyuki Ikeyama, Kazuo Sueyoshi, "Yokogawa's Activities on International Standardization for Energy Management," Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 64, No. 2, 2021, pp. 31-37 (pp. 97-103)
- (2) Naoki Noguchi, Kotaro Ogawa, et al., "Coreless current sensor enabling DC and high frequency measurement," T. Mag. Soc. Jpn. (Special Issues), Vol. 4, No. 1, 2020, pp. 27-31 (in Japanese)
- (3) Minako Terao, Kotaro Ogawa, et al., "Design of magnetic shield case for small sized AC/DC current sensor by electromagnetic simulation," The 44th annual conference on magnetism in Japan, 2020, p. 58 (in Japanese)

* All company names, organization names, product names, service names and logos that appear in this paper are either trademarks or registered trademarks of Yokogawa Electric Corporation or their respective holders.