

Plan

방향성 규소 강판 변압기 철심의 자기적 특성 분석: 주파수 분석을 위한 실험 및 계산 프레임워크 (50Hz – 400Hz)

1. 서론 및 프로젝트 배경

1.1 산업적 맥락 및 입법적 요인

글로벌 변압기 산업은 규제 프레임워크에 의한 높은 에너지 효율 요구와 고주파 전력 배전 시스템으로의 기술적 전환이라는 두 가지 압력에 직면해 있습니다. Carroll & Meynell Transformers Ltd(C&M)와의 협력을 통해 의뢰된 이 프로젝트는 기존의 50Hz 및 60Hz 주전원 주파수 패러다임을 벗어난 전기강판의 재료 특성 분석에 대한 구체적인 격차를 해결하는 것을 목표로 합니다.

역사적으로 C&M은 건설, 해양, 광업 및 전력 배전 부문을 중심으로 소형 장치부터 5톤 산업용 시스템에 이르는 변압기를 제조하는 선도적인 기업으로 자리 잡았습니다. 이러한 부문의 설계 철학은 전통적으로 50Hz에서 표준 방향성 규소 강판(GOSS)에 대해 잘 특성화된 데이터에 의존해 왔습니다. 그러나 운영 환경이 변화하고 있습니다. 재생 에너지 컨버터, 고주파 해양 전력 시스템 및 특수 해양 애플리케이션의 확산으로 인해 최대 400Hz의 주파수에서 작동해야 하는 경우가 빈번해졌습니다. 동시에, 2014년 유럽 연합 에코디자인 지침(EU Eco-design Directive)은 변압기 에너지 손실에 대한 엄격한 제한을 부과하여 제조업체가 전례 없는 정밀도로 철심 설계를 최적화하도록 강제하고 있습니다.,

이러한 전환 과정에서 근본적인 문제가 발생합니다. 철강 제조업체에서 제공하는 경험적 데이터는 거의 전적으로 50Hz 또는 60Hz 작동에 맞춰져 있다는 점입니다. 50Hz용으로 설계된 변압기를 400Hz에서 작동할 경우 철심 손실(Core Loss)은 선형적으로 비례하지 않습니다. 열 폭주를 방지하기 위해 자속 밀도(B)를 낮춰야 하는 경우가 많지만, 정적 히스테리시스 손실과 동적 와전류(Eddy Current) 손실 간의 복잡한 상호 작용은 급격하게 변화합니다. 400Hz에서는 표피 효과(Skin Effect)를 무시할 수 없게 되며, 이는 라미네이션의 유효 단면적을 줄이고 투자율(Permeability)을 변화시킬 수 있습니다. 고주파수에서 이러한 재료에 대한 경험적 특성 분석 없이는 설계 엔지니어가 보수적이고 비효율적인 안전 마진에 의존하거나 EU 에너지 손실 법규를 위반할 위험을 감수해야 합니다.

1.2 프로젝트 목표 및 범위

이 보고서는 표준 HWR90/32 C-코어를 특성화하기 위한 6주간의 실험 캠페인(50시간의 실험실 시간)에 대한 포괄적인 "요약 및 심층 계획"을 기술합니다. 주요 목표는 50Hz에서 400Hz 사이의 주파수 스펙트럼에서 GOSS 재료(0.3mm 및 0.1mm 두께)에 대한 B-H 히스테리시스 루프와 비철손(Specific Core Loss, W/kg)의 견고한 데이터 세트를 생성하는 것입니다.

이 보고서의 범위는 전체 프로젝트 수명 주기를 포괄합니다.

- 1. 이론적 정립:** 자기 손실의 물리학을 분해하여 고주파 거동에 대한 가설을 수립합니다.
- 2. 실험 설계:** 제공된 실험실 도구(오실로스코프, 전원 공급 장치, 절연 변압기)를 사용하여 고충실도 데이터를 수집하는 데 필요한 회로 토플로지, 권선 파라미터 및 계측을 지정합니다.
- 3. 계산 전략:** 원시 전압/전류 신호를 유효한 B-H 루프로 변환하는 데 필요한 디지털 신호 처리(DSP) 알고리즘을 정의하며, 특히 수치 적분 드리프트 및 위상 오차 보정 문제를 다룹니다.
- 4. 분석 및 보고:** 이중 주파수 방법(Two-Frequency Method)을 사용하여 히스테리시스 손실과 와전류 손실을 분리하는 방법론을 상세히 설명하고, C&M의 설계 프로세스를 지원하는 데 필요한 최종 결과물을 개략적으로 설명합니다.

2. 강자성 철심 역학의 이론적 프레임워크

실험 데이터를 효과적으로 해석하기 위해서는 강자성 재료가 에너지를 소비하는 방식에 대한 엄격한 이론적 모델을 수립하는 것이 필수적입니다. 변압기의 총 철심 손실(P_{total})은 단일한 양이 아니라 주파수(f) 및 피크 자속 밀도(B_{pk})의 변화에 다르게 반응하는 별개 물리적 메커니즘의 합입니다.

2.1 자화 및 히스테리시스의 물리학

GOSS에 사용되는 3% 규소-철(Si-Fe) 합금과 같은 강자성 재료는 원자의 자기 쌍극자가 평행하게 정렬된 미세 영역인 자기 구역(Magnetic Domains)으로 특징지어집니다. 자화되지 않은 상태에서 이러한 구역은 무작위로 배향되어 순 자속이 0이 됩니다. 1차 권선 전류를 통해 외부 자기장(H)이 인가되면 두 가지 주요 과정을 통해 자화가 발생합니다.

- 1. 자벽 이동 (Domain Wall Displacement):** 낮은 자기장 강도에서 구역 간의 경계(Bloch walls)가 이동하여 자기장과 정렬된 구역을 성장시킵니다. 이 과정은 초기에 가역적입니다.
- 2. 구역 회전 (Domain Rotation):** 더 높은 자기장 강도에서 구역 내의 자기 모멘트가 회전하여 외부 자기장과 완벽하게 정렬되며, 결국 자기 포화(B_{sat})에 도달합니다.

에너지 손실은 주로 자벽의 비가역적 이동에서 발생합니다. 자벽이 이동할 때 결정 격자 결함, 입계(Grain boundaries) 및 침전물을 만나 "고정(Pinning)"됩니다. 이러한 고정 위치에서 벗어나려면 에너지가 필요하며, 이는 열로 손실됩니다. 이것이 히스테리시스 손실(P_h)입니다. 이 에너지는 사이클 속도와 관계없이 완전한 자기 사이클당 한 번 소비되므로 전력 손실(단위 시간당 에너지)은 주파수에 선형적으로 비례합니다.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{pk}^n$$

여기서 K_h 는 DC 히스테리시스 루프 면적에서 유도된 재료별 계수이며, n 은 슈타인메츠(Steinmetz) 지수로, 자속 밀도 수준에 따라 현대 GOSS의 경우 일반적으로 1.6에서 2.0 사이입니다.

2.2 고전적 와류(Eddy Current) 역학

히스테리시스가 정적 현상인 반면, 와류는 동적입니다. 패러데이의 유도 법칙에 따르면 시변 자기 자속은 전도성 철심 재료 내에 기전력(EMF)을 유도합니다. 이 EMF는 강판 라미네이션 내에서 순환 전류(와류)를 구동하며, 이는 자속에 수직으로 흐르고 반대 자기장을 생성합니다(렌츠의 법칙).

이러한 전류는 줄 가열($P = I^2 R$)을 통해 에너지를 소비합니다. 유도 전압은 자속의 변화율($dB/dt \propto f$)에 비례하므로 전압은 주파수에 비례합니다. 결과적으로 전력 손실(V^2/R)은 주파수의 제곱에 비례합니다. 단위 부피당 고전적 와류 손실(P_e)은 다음과 같습니다.

$$P_e = \frac{\pi^2 \sigma d^2 B_{pk}^2 f^2}{6}$$

여기서:

- σ 는 강철의 전기 전도도입니다.
- d 는 라미네이션의 두께입니다.

이 관계는 라미네이션 두께의 중요성을 강조합니다. 두께를 표준 0.3mm에서 0.1mm로 줄이면 이론적으로 와류 손실이 9배($0.3^2/0.1^2 = 9$) 감소합니다. 와류가 지배적인 400Hz에서 이러한 감소를 검증하는 것이 이 프로젝트의 핵심 결과물입니다.

2.3 이상 손실 및 고주파 표피 효과

정적 히스테리시스와 고전적 와류 손실의 단순 합은 종종 측정된 총 손실을 과소평가합니다. 이 차이를 이상 손실(P_a) 또는 초과 손실이라고 합니다. 이는 고전적 와류 모델이 균일한 자속 분포와 균일한 투자율을 가정하는 반면, 실제 자화는 자벽의 불연속적이고 빠른 점프(Barkhausen jumps)를 통해 발생하여 평균보다 훨씬 강한 국부적인 미세 와류를 생성하기 때문에 발생합니다.

또한 주파수가 400Hz에 접근하면 표피 효과(Skin Effect)가 0.3mm GOSS의 제한 요인이 됩니다. 자기장 밀도가 표면 값의 $1/e$ (약 37%)로 감소하는 깊이인 표피 깊이(δ)는 다음과 같이 계산됩니다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$$

고투과성 GOSS($\mu_r \approx 10,000 - 40,000$)의 경우 400Hz에서 표피 깊이는 약 0.3mm 이하로 떨어질 수 있습니다. δ 가 라미네이션 두께의 절반($d/2$)과 비슷하거나 작으면 자기 자속이 시트의 외부 표면에 국한되어 철심 내부가 활용되지 않습니다. 이는 유효 단면적을 효과적으로 줄이고 겉보기 투자율을 감소시키며 손실을 급격히 증가시킵니다. 이 현상은 고주파 응용 분야에서 C&M이 더 얇은 0.1mm 라미네이션과 비정질 리본(Amorphous ribbons)에 관심을 갖는 이유를 정당화합니다.,

2.4 이중 주파수 손실 분리법 (Two-Frequency Method)

명시적으로 테스트되지 않은 주파수(예: 800Hz)에 대한 예측 기능을 C&M에 제공하기 위해 프로젝트는 히스테리시스 계수(K_h)를 와류 계수(K_e)로부터 분리해야 합니다. 이중 주파수 방법은 이를 위한 표준 접근 방식입니다.,

사이클당 총 손실($W_{cycle} = P_{total}/f$)은 다음과 같이 표현할 수 있습니다.

$$W_{cycle} = \frac{P_h + P_e}{f} = K_h B^n + K_e B^2 f$$

피크 자속 밀도(B_{pk})를 일정하게 유지하면서 여러 주파수(예: 50, 100, 200, 400Hz)에서 총 손실을 측정하여 W_{cycle} 을 주파수(f)에 대해 그래프로 나타낼 수 있습니다.

- 데이터는 직선(또는 이상 손실이 높은 경우 곡선)을 형성해야 합니다.
- Y절편($f = 0$ 일 때)은 주파수와 무관한 사이클당 히스테리시스 손실을 나타냅니다.
- 선의 기울기는 와전류 성분을 나타내며, 이는 에너지/사이클 도메인에서 주파수와 함께 선형적으로 증가합니다.

이 분리를 통해 C&M 엔지니어는 이러한 계수에 가중치를 둔 고조파 기여도를 합산하여 비정현파 조건(예: 고조파)에서 변압기의 열 부하를 모델링할 수 있습니다.

3. 실험 장치 및 설계 전략

실험 설정은 변압기 철심의 작동 조건을 재현하는 동시에 자기 상태 변수(B 및 H)에 정밀하게 접근할 수 있도록 설계되었습니다. 이 설정은 "전압-전류(Volt-Amperometric)" 방법을 사용하여 철심을 포화 상태로 구동하고 순간 전압 및 전류를 기록합니다.

3.1 코어 형상 및 사양: HWR90/32

이 프로젝트는 표준 "C" 코어, 구체적으로 HWR90/32 시리즈를 사용합니다. 이 코어는 규소 강판 리본으로 감겨 있고 수지로 함침된 후 두 개의 C자형 반쪽으로 절단됩니다. 이 형상은 반쪽을 함께 묶기 전에 림(limb)에 미리 감긴 코일을 설치할 수 있게 합니다.

자속 밀도(B)와 자기장 강도(H)를 계산하려면 코어의 물리적 치수에 대한 정확한 지식이 필수적입니다. HWR90/32 시리즈의 제조업체 데이터 시트,를 기반으로 실험 계산을 위해 다음 파라미터가 설정됩니다.

- 코어 유형: HWR90/32 (영국 표준 명칭)

- 재료: 방향성 규소 강판(GOSS), 아마도 M4 또는 M5 등급.
- 스트립 폭 (): 32 mm
- 빌드업 (): 16 mm (창 및 전체 치수에서 유도됨)
- 창 치수 (): 19 mm 51 mm
- 기하학적 단면적 (geo): $= 3.2 \cdot 1.6 \approx .12^2$
 - 참고: 일부 데이터 시트는 4.8에서 6.0 cm² 사이의 유효 면적을 나열합니다. 학생들은 geo 를 확인하기 위해 제공된 샘플의 스택 높이와 너비를 물리적으로 측정해야 합니다.
- 적층 계수 (Stacking Factor, k_{st}): 0.30 mm 강판의 경우 0.95; 0.10 mm 강판의 경우 0.90.
- 유효 자기 면적 (e): $geo \cdot k_{st} \approx 4.6^2$ (0.3mm의 경우).
- 평균 자기 경로 길이 (): 19.1 cm ~ 22.0 cm.
 - 공식: $= 2 + 2 + \pi \approx 2.1 + 21.9 + \pi \cdot 1.6 \approx 19.0$.
 - 데이터 시트 값은 종종 약 20 cm를 인용합니다. 초기 계산에는 **0.20 m**을 사용할 것입니다.

3.2 권선 설계 계산 (Winding Design)

"계획" 단계에서 중요한 단계는 1차(여자) 및 2차(감지) 권선의 턴 수를 결정하는 것입니다. 설계는 50Hz에서 높은 자속과 400Hz에서 관리 가능한 전압이라는 상충되는 요구 사항을 수용해야 합니다.

변압기 방정식:

$$V_{rs} = 4.44 \cdot f \cdot e \cdot B_{pk}$$

설계 포인트 1: 50Hz에서의 포화

전체 B-H 루프를 특성화하려면 코어를 깊은 포화 상태(GOSS의 경우 약 $B_{sat} = 1$. 테슬라)로 구동해야 합니다.

실험실 전력 증폭기의 최대 청정 출력 전압이 헤드룸을 허용하여 $V_a \approx 100$ (RMS)라고 가정합니다.

$$1 = \frac{V_{rs}}{4.44 \cdot f \cdot e \cdot B_{pk}} = \frac{100}{4.44 \cdot 0 \cdot 0.00046 \cdot 1} \approx 1$$

설계 포인트 2: 400Hz에서의 전압 제약

515턴을 사용하는 경우 400Hz에서 1.8T에 도달하는 데 필요한 전압은 다음과 같습니다.

$$V_{400} = 100 \cdot \frac{400}{0} = 00$$

이 전압은 표준 실험실 전원 공급 장치의 기능을 벗어날 가능성이 높으며 심각한 안전 위험(절연 파괴)을 초래합니다.

설계 포인트 3: 절충안 및 전류 제한

400Hz에서 전압을 관리 가능한 수준(예: 200V 이내)으로 유지하려면 턴 수를 줄여야 합니다.

400Hz에서 최대 200V를 목표로 합시다.

$$n_e = \frac{200}{4.44 \cdot 400 \cdot 0.00046 \cdot 1} \approx 130$$

그러나 턴 수를 줄이면 필요한 자화력(H)을 생성하기 위해 50Hz에서 필요한 전류가 증가합니다.

$$H \cdot = \cdot I.$$

GOSS의 포화 필드는 대략 $H_{sat} \approx 00 - 1000$ /입니다.

$$I_{peak} = \frac{H \cdot}{130} = \frac{1000 \cdot 0.20}{130} \approx 1.4$$

이 전류는 표준 5A 실험실 전원 공급 장치의 범위 내에 충분히 들어옵니다.

최종 권선 사양:

- **1차 (₁): 200 턴.** 이를 통해 400Hz에서 약 300V(관리 가능)로, 50Hz에서 약 37V로 포화에 도달 할 수 있습니다. 와이어 게이지는 가열 없이 3-5 암페어를 처리할 수 있도록 18-20 AWG여야 합니다.
- **2차 (₂): 200 턴.** 1:1 비율을 유지하면 계산이 단순화되고 2차 전압이 오실로스코프 프로브(10x 감쇠) 범위 내에 있도록 보장됩니다.

3.3 실험 회로 토플로지

회로는 견고하고 안전해야 합니다. 레이아웃은 다음과 같습니다.

1. **신호 소스:** 50Hz에서 400Hz까지 깨끗한 사인파를 제공하는 디지털 함수 발생기.
2. **전력 증폭:** 선형 전력 증폭기(DC - 20kHz 대역폭). 스위칭(Class D) 증폭기는 고주파 PWM 리플이 미분 dB/dt 신호에 노이즈를 유발할 수 있으므로 가능하면 피하십시오.
3. **절연:** 증폭기와 테스트 회로 사이에 배치된 절연 변압기(Isolation Transformer) (1:1).

- **이유:** 이를 통해 테스트 회로가 접지(Earth Ground)에 대해 플로팅(floating) 상태가 될 수 있습니다. 오실로스코프 접지 클립은 접지 기준이므로 이는 매우 중요합니다. 절연 없이는 전류 션트에 프로브를 연결하면 증폭기 출력이 접지로 단락될 수 있습니다.

4. **전류 션트 (R_{sense}):** 1차 권선과 직렬로 연결된 정밀 전력 저항기.

- 값: **1.0**, 50 Watt (무유도).
- 배치: 스코프의 공통 모드 전압 스트레스를 최소화하기 위해 1차 회로의 "로우 사이드(low side)"(귀환 경로)에 배치합니다.

5. **테스트 대상 장치 (DUT):** 권선이 있는 HWR90/32 코어.

6. **오실로스코프:** 4채널 DSO.

- 채널 1 (X축): R_{sense} 에 연결됨. $V_R \propto I \propto H$ 측정.
- 채널 2 (Y축): 2차 권선 I_2 에 연결됨. $V_{sec} \propto dB/dt$ 측정.

4. 실험 방법론 및 프로토콜

6주간의 일정은 두 가지 코어 재료에 대한 모든 주파수 포인트와 자속 레벨을 캡처하기 위해 규율 있는 데이터 수집 접근 방식을 요구합니다.

4.1 보정 및 설정 (1주차)

1. **물리적 계측:** 모든 코어 샘플의 질량과 치수를 측정합니다. 스택 높이의 0.5mm 변화도 자속 밀도 계산을 5% 변경할 수 있으므로 각 특정 코어에 대한 정밀한 단면적($cross$)을 계산합니다.
2. **프로브 보정:** 스코프의 구형파 보정 출력을 사용하여 평탄한 주파수 응답을 보장하도록 10x 오실로스코프 프로브의 가변 커패시턴스를 조정합니다.
3. **위상 디스균(De-skew):** 변압기 대신 저항성 더미 부하(무유도)를 사용합니다. 전압 및 전류 신호는 완벽하게 위상이 맞아야 합니다. 측정된 위상 변이는 프로브/케이블로 인한 것이므로 나중에 빼 수 있도록 시스템 오류(체계적 위상 지연)로 기록해야 합니다.

4.2 데이터 수집 프로토콜 (2-4주차)

각 재료(0.3mm GOSS, 0.1mm GOSS, 가능한 경우 비정질)에 대해:

1단계: 50Hz 기준선

- 주파수를 50Hz로 설정합니다.
- B-H 루프가 명확한 포화(S자 모양의 "꼬리"가 평평해짐)를 보일 때까지 전압을 0V에서 천천히 증가시킵니다.
- 피크 전류와 전압을 기록합니다.

- 데이터 캡처: 단순한 화면 캡처 대신 **CSV** 파일 형식 데이터(Time, Ch1_Volts, Ch2_Volts)를 USB 드라이브에 저장합니다. 최소 5개의 전체 사이클을 캡처합니다. 이 원시 데이터는 디지털 적분 알고리즘에 필수적입니다.
- 중간 자속 레벨(예: 0.5T, 1.0T, 1.2T, 1.5T, 1.7T)에 대해 반복합니다.

2단계: 주파수 스위핑 (60, 100, 200, 300, 400Hz)

- 주파수를 다음 단계로 증가시킵니다.
- 50Hz 기준선과 동일한 피크 자속 밀도(B_{pk})를 달성하도록 전압을 조정합니다.
 - 중요 사항:** $V \propto f$ 이므로 주파수가 상승함에 따라 전압을 높여야 합니다. Ch2(2차)의 스코프 "Mean RMS" 값을 확인하십시오. V_{sec} 가 50Hz에서 10V였다면 동일한 B 를 유지하려면 400Hz에서 대략 80V여야 합니다.
- 열 관리:** 400Hz에서 와류 손실은 코어를 빠르게 가열합니다. 측정은 신속하게(30초 이내) 수행하고 고자속 테스트 사이에 코어를 냉각시킵니다. 온도가 변하면 저항률이 변하므로 가능한 경우 IR 온도계를 사용하여 코어 온도를 기록하십시오.

3단계: 히스테리시스 분리 데이터

- 고정된 B_{pk} (예: 1.5 T)에 대해 정확히 50, 100, 200, 300, 400Hz에서 유효한 데이터 포인트가 있는지 확인합니다. 이 데이터 세트는 Steinmetz/Bertotti 회귀 분석에 사용됩니다.

4.3 C-코어 공극(Air Gap) 처리

HWR90/32는 절단된 코어입니다. 클램핑 시에도 접합면에 미세한 공극이 존재합니다. 이 공극은 자기 저항(R_{gap})을 도입하여 B-H 루프를 기울어지게 만들어 재료가 더 낮은 투자율을 갖는 것처럼 보이게 합니다(동일한 B 에 대해 H 값이 더 크게 나타남).

- 프로토콜:** 클램핑 힘이 일정하도록 합니다. 제공된 스틸 밴드나 토크 제한 나사 클램프를 사용하십시오.
- 분석:** 보고서는 C-코어 어셈블리의 유효 **B-H** 루프를 제시해야 합니다. 이는 C&M이 변압기 제작에 필요한 실질적인 특성이기 때문입니다. 공극은 C-코어 제품 라인의 고유한 특징이므로 고유 재료 특성을 찾기 위해 공극을 수학적으로 제거하려고 시도하지 않을 것입니다.

5. 계산 프레임워크 및 데이터 처리

수집된 원시 데이터(센트 전압, 2차 전압)는 정확한 B-H 루프를 산출하기 위해 상당한 디지털 신호 처리(DSP)가 필요합니다. 주요 과제는 적분 드리프트(Integration Drift)입니다.

5.1 필드 변수의 수학적 유도

자기장 강도 (H):

양페르의 법칙은 자기장과 전류를 다음과 같이 관련시킵니다.

$$Ht = \frac{1 \cdot t}{e \cdot ffecte}$$

션트 전압 $shnt$ 대입:

$$Ht = \frac{1}{\cdot R_{sense}} \cdot shnt$$

결과: A/m 단위의 H 값 벡터 배열.

자속 밀도 (B):

파러데이의 법칙은 유도 전압과 자속의 변화율을 다음과 같이 관련시킵니다.

$$sec t = -2 \cdot e \cdot \frac{dB}{dt}$$

재배열 및 적분:

$$Bt = -\frac{1}{2 \cdot e} sec t dt$$

결과: 테슬라(Tesla) 단위의 B 값 벡터 배열.

5.2 수치 적분 드리프트 해결

AC 신호를 수치적으로 적분할 때(예: Python/MATLAB의 `cumtrapz` 사용), 프로브 신호의 미세한 DC 오프셋 또는 양자화 노이즈 비대칭이 시간이 지남에 따라 누적되어 결과 Bt 파형이 "드리프트"하거나 선형적으로 상승/하강하게 됩니다. 이로 인해 닫힌 루프 대신 나선형 모양이 생성됩니다.

드리프트 보정 알고리즘:

1. **DC 제거:** 원시 sec 신호에서 평균을 뺍니다.
2. **적분:** 누적 사다리꼴 적분을 수행합니다.

3. **디트렌딩(Detrending):** 적분된 자속 Bt 는 정상 상태 AC 여자에 대해 주기적이어야 합니다. 적분 결과에 직선을 맞추고 이를 빼는 선형 디트렌딩 함수를 적용하여 사이클의 시작점과 끝점을 강제로 정렬합니다.
4. **중심화:** 계산된 B 파형의 평균을 빼서 0 테슬라를 중심으로 대칭적으로 진동하도록 합니다(DC 바이어스가 적용되지 않았다고 가정).

5.3 계산 로직 (의사 코드)

다음 로직은 CSV 데이터를 처리하기 위해 Python(NumPy/SciPy 사용)으로 구현됩니다.

Python

```

import numpy as np
from scipy.integrate import cumtrapz
from scipy.signal import detrend

def process_transformer_data(time, v_shunt, v_sec, params):
    """
    Inputs:
        time: 시간 스텝프 배열
        v_shunt: 전류 감지 저항(shunt) 양단의 전압 배열
        v_sec: 2차 권선 양단의 전압 배열
        params: N1, N2, R_sense, Ae, Lm을 포함하는 딕셔너리
    """

    # 1. 하드웨어 상수
    N1 = params['N1']
    N2 = params['N2']
    R = params
    Ae = params['Ae'] # m^2 단위
    Lm = params['Lm'] # m 단위

    # 2. H 필드 계산 (Ampere-turns / meter)
    # H는 전류에 정비례함
    current = v_shunt / R
    H_field = (N1 * current) / Lm

    # 3. 적분을 통한 B 필드 계산 (Tesla)
    # 먼저, 원시 프로브 신호에서 DC 오프셋 제거
    v_sec_ac = v_sec - np.mean(v_sec)

    # 수치 적분 (누적 사다리꼴)
    # B = (-1 / (N2 * Ae)) * integral(v_sec dt)

```

```

# 렌츠의 법칙에서 오는 음의 부호는 크기 플롯에서는 종종 무시되지만 위상에는 중요함
B_raw = -(1 / (N2 * Ae)) * cumtrapz(v_sec_ac, time, initial=0)

# 4. 드리프트 보정 (DRIFT CORRECTION)
# DC 제거 후에도 적분 상수는 드리프트함.
# 주기성을 강제하기 위해 선형 디트렌딩(linear detrending) 사용
B_detrended = detrend(B_raw, type='linear')

# 5. 중심화 (Centering)
# B-루프는 AC 여자에 대해 0을 중심으로 대칭이어야 함
B_final = B_detrended - np.mean(B_detrended)

# 6. 손실 계산 (사이클당 에너지)
# Energy = Integral(H dB)
# P_avg = Average( Instantaneous Power )
# 순간 전력 P(t) = v_primary(t) * i_primary(t)
# 이상적으로는 한 주기 T 동안 H * dB/dt를 적분함

# dB/dt 계산 (v_sec에 비례)
dB_dt = -(v_sec_ac) / (N2 * Ae)

# 순간 전력 손실 밀도 (W/m^3)
p_loss_density = H_field * dB_dt

# 에너지 밀도를 얻기 위해 한 주기 T 동안 적분 (Joules/m^3/cycle)
# 정확히 한 사이클 또는 정수 배 사이클의 인덱스 찾기
# (간결함을 위해 영점 교차 감지 로직은 생략)
energy_per_cycle = np.trapz(p_loss_density[start_idx:end_idx],
time[start_idx:end_idx])

# 총 전력 손실 (Watts/kg)
# 비율 = (Energy_per_cycle * frequency) / Density_of_Steel
frequency = 1 / (time[end_idx] - time[start_idx])
mass_density = 7650 # Si-Fe의 경우 kg/m^3
specific_loss = (energy_per_cycle * frequency) / mass_density

return H_field, B_final, specific_loss

```

6. 프로젝트 계획 및 일정 (6주)

"고품질 최종 보고서"를 기한 내에 전달하기 위해 팀은 다음 실행 일정을 준수할 것입니다.

주차	단계	주요 활동 및 마일스톤
1주차	설정 및 보정	<ul style="list-style-type: none"> - 절연 변압기를 포함한 회로 구성. - HWR90/32 코어 권선 작업 (200T/200T). - 코어 치수 및 질량 측정. - 마일스톤: 50Hz/1.0T에서 유효한 B-H 루프 캡처.
2주차	데이터 수집 (1부)	<ul style="list-style-type: none"> - 0.3mm GOSS의 완전한 특성 분석. - 50, 60, 100, 200 Hz에서 자속 스윕 (0.2T - 1.8T). - 저항 가열 및 프로브 드리프트 모니터링.
3주차	데이터 수집 (2부)	<ul style="list-style-type: none"> - 0.3mm에 대한 고주파 테스트 (300, 400 Hz). - 0.1mm GOSS의 완전한 특성 분석 (가능한 경우). - 마일스톤: 모든 원시 CSV 데이터 수집 및 백업.
4주차	계산 분석	<ul style="list-style-type: none"> - Python 처리 스크립트 개발 및 디버깅. - 모든 CSV 파일에 대한 일괄 처리(batch processing) 실행. - 예비 B-H 루프 플롯 및 손실 곡선 생성. - 분리 분석 수행 (P/f 대 f).
5주차	종합 및 해석	- 0.3mm 대 0.1mm 결과 비교.

주차	단계	주요 활동 및 마일스톤
		<ul style="list-style-type: none"> - 표피 깊이 계산 및 손실 이상과의 상관관계 분석. - 보고서의 "결과" 및 "토의" 섹션 초안 작성.
6주차	최종 보고	<ul style="list-style-type: none"> - 서식 및 표 마무리. - C&M을 위한 요약 및 권장 사항 작성. - 결과물: 최종 연구 보고서 제출.

7. 예상 결과 및 결과물

최종 보고서는 C&M의 엔지니어링 요구에 맞춘 세 가지 특정 형식으로 결과를 제시할 것입니다.

7.1 B-H 루프 아틀라스 (The B-H Loop Atlas)

히스테리시스 플롯의 포괄적인 세트입니다. 주파수가 50Hz에서 400Hz로 증가함에 따라 루프가 상당히 넓어질 것으로 예상합니다. 이 확장은 반대 방향의 와류를 극복하는 데 필요한 증가된 보자력(H_c)을 나타냅니다. 루프의 "두께"는 에너지 손실의 시각적 표현입니다.

7.2 손실 분리 분석 (Loss Separation Analysis)

사이클당 비에너지 손실(Specific Energy Loss per Cycle, J/kg) 대 주파수(Hz)를 나타내는 그래프입니다.

- 예상: 선형 관계 ($y = +c$).
- 해석:
 - 절편(c)은 정적 히스테리시스 손실(상수)을 정량화합니다.
 - 기울기()는 와전류 계수를 정량화합니다.
 - 플롯이 400Hz에서 비선형적으로 위쪽으로 구부러지면 표피 효과의 시작 또는 과도한 이상 손실을 확인하는 것이며, 이는 해당 주파수에서 0.3mm 재료의 부적합함을 알립니다.

7.3 최종 권장 사항 표

보고서는 C&M 설계자를 위한 조회 테이블로 결론을 맺을 것입니다.

재료	주파수 (Hz)	최대 효율 자속 (B_{opt})	총 손실 @ 1.5T (W/kg)	권장 사항
0.3mm GOSS	50	1.7 T	~1.0	표준 사용.
0.3mm GOSS	400	0.8 T	높음 (>15)	상당한 경감(De-rate) 필요.
0.1mm GOSS	400	1.5 T	보통	해양/항공우주용으로 권장.

8. 결론

이 프로젝트 계획은 Carroll & Meynell의 중요한 설계 질문에 답하기 위한 강력하고 과학적으로 엄격한 경로를 제공합니다. 정밀한 실험 계측과 고급 계산 신호 처리를 결합함으로써 팀은 손실을 정량화할 뿐만 아니라 이를 유발하는 메커니즘(히스테리시스 대 와류)을 설명할 것입니다. 결과 데이터는 C&M이 EU 규정을 준수하고 자신 있게 고주파 변압기 계약에 입찰하여 설계 역량을 50Hz 시대에서 현대의 다양한 주파수 전력 환경으로 전환할 수 있도록 할 것입니다.

방법론 참고 문헌:

- HWR90/32 Core Dimensions.
- Two-Frequency Loss Separation Method.
- Integration Drift Correction Algorithms.
- Skin Effect in 3% Silicon Steel.