

영구자석 동기모터(PMSM)의 효율 최적화를 위한 극저온 및 극고온 영역

고해상도 온도 센싱 회로 설계 및 제어 전략 연구

권 순 백*¹⁾

현대케피코¹⁾

High-Resolution Temperature Sensing Circuit Design and Control Strategy for Efficiency Optimization of PMSM in Extreme Temperature Ranges

Soonbaek Kwon*¹⁾

¹⁾HYUNDAI KEFICO, 102, Gosan-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Key words : Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM(영구자석 동기모터), NTC Thermistor(NTC 써미스터), Resolution(분해능), Extreme Temperature Range(극온도 구간)

교신저자, E-mail: 권순백, Soonbaek.kwon@hyundai-kefico.com

최근 친환경 자동차 산업의 급격한 성장과 함께 구동 시스템의 핵심 부품인 영구자석 동기모터(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)의 효율 제어 기술이 중요하게 대두되고 있다. PMSM은 출력 밀도가 높으나 온도 변화에 따른 성능 가변성이 매우 큰 특성을 지닌다. 따라서 모터 내부의 열 상태를 실시간으로 모니터링하기 위해 일반적으로 부특성 온도 계수(NTC: Negative Temperature Coefficient) 써미스터를 활용한 온도 센싱 회로가 탑재된다. NTC 써미스터는 온도 변화에 따라 저항값이 변화하는 특성을 이용하여 온도를 측정하며, 이를 통해 제어기는 모터의 효율을 최적화하고 시스템을 보호한다.

그러나 NTC 써미스터는 온도가 변화함에 따라 저항값이 지수함수적으로 변위하는 강력한 비선형적 특성을 나타낸다. 이러한 특성으로 인해 단일 센서를 활용한 종래의 기술은 특정 온도 구간에서 출력 전압의 기울기가 급격히 둔화되는 문제를 안고 있다. 특히 시스템의 신뢰성 확보를 위해 정밀한 관리가 요구되는 극구간(Extreme range; 극저온 약 -50°C ~ 0°C , 극고온 약 105°C ~ 160°C)에서 온도 변화에 따른 전압 변화율, 즉 분해능(Resolution)이 급격히 저하되는 문제가 발생한다.

이러한 센싱 정밀도의 저하는 모터 제어 로직의 불확실성을 초래한다. 구체적으로 고온 구간에서는 영구자석의 비가역 감자(Demagnetization) 현상이 가속화되어 토크 출력이 급감하고 전동기 효율이 저하된다. 반면, 극저온 구간에서는 윤활유 및 오일의 점도 상승에 따른 내부 마찰 손실이 증대되며, 베어링의 기계적 마모 및 잠재적 손상 가능성이 커진다. 결과적으로 센싱 분해능의 부족은 모터의 가혹 조건 보호 실패와 비효율적인 에너지 소비로 직결된다.

본 연구에서는 상기 언급된 비선형성 문제를 해결하고자, 임계 온도 구간에서의 분해능을 극대화할 수 있는 복수 센서 기반 보상 회로 설계 및 제어 알고리즘을 제안한다. 본 연구의 주요 목적은 시스템별로 상이한 NTC 부하 특성에 유연하게 대응하면서도 극저온 및 극고온 구간에서 선형적인 출력 특성을 도출하는 데 있다.

이를 위해 본 논문에서는 두 개의 NTC 써미스터와 다단 증폭 회로를 결합하여, 각 센서가 담당하는 최적 측정 범위를 분할 및 중첩하는 방식을 채택하였다. 제어기는 복수의 센싱값으로부터 도출된 전압 데이터를 특정 유효 범위 내로 가공 및 변동시킴으로써, 미세한 온도 변화를 유의미한 디지털 신호로 변환한다. 이 과정에서 각 구간의 감도(Sensitivity)를 보상하여 전체 운용 범위에서의 데이터 신뢰도를 확보한다.

본 연구에서 제시한 고해상도 온도 센싱 기술은 NTC 써미스터의 태생적 한계인 비선형성을 회로 설계적 측면에서 보완함으로써, 가혹한 온도 조건에서도 신뢰할 수 있는 모터 상태 정보를 제공한다. 이를 통해 PMSM의 불필요한 출력 제한을 최소화하고 운전 효율을 극대화함으로써 전기자동차의 주행 거리(Range) 연장 및 연비

상승에 기여할 수 있다.

또한, 센싱 데이터의 유효값 범위를 명확히 설정함으로써 하드웨어 고장(SCG, SCB, OL) 시 발생하는 이상 전압과 정상적인 열 변동 신호를 엄격히 구분할 수 있게 되었다. 이는 능동적인 고장 진단을 가능케 하여 시스템의 안전성을 한층 강화한다. 본 연구는 향후 고출력 친환경차 구동 시스템의 내구성과 효율을 동시에 확보할 수 있는 새로운 하드웨어 설계 방안을 제시할 것으로 기대된다.

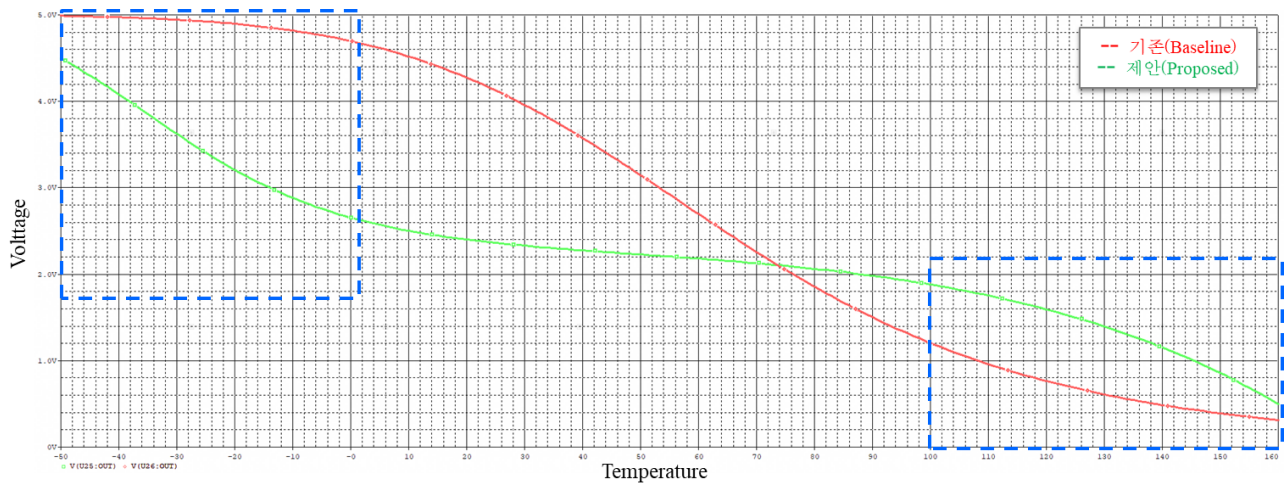


Fig. 1 기존 단일 NTC 와 제안된 고해상도 센싱 회로의 출력 파형 비교