

실차 데이터 기반 600V급 SPMSM-인버터 시스템의 저전압 운용 특성 검증

박 민 수 · 전 진 우 · 박 민 규

호서대학교 미래자동차공학과

Driving Data Based Verification of Low Voltage Operation of a 600V Class SPMSM-Inverter System

Minsoo Park · JinWoo Jeon · MinGyu Park

Hoseo University

Key words : SPMSM(표면부착형 영구자석 동기 전동기), Flux Weakening Control(약자속 제어), Efficiency Map(효율 맵), FTP-75(FTP-75 주행 사이클)

교신저자, E-mail: hjchung@hoseo.edu

본 논문은 정격 600V급 SPMSM-인버터 시스템을 300V 배터리 팩으로 운용할 때 발생하는 저전압 운용 특성의 실차 데이터 기반 정량 검증에 대한 연구이다. SPMSM은 고속 영역에서 역기전력 상승에 따라 전압 여유가 부족해지고, 이로 인해 자속 약화(Flux Weakening, FW) 진입이 빨라지며 토크 유지력이 저하되는 특성을 가진다. 이러한 현상은 이론적으로는 알려져 있으나, 실제 차량 환경에서 정격 전압 대비 저전압 운용이 성능에 미치는 영향을 정량적으로 검증한 사례는 드물다.

본 연구에서는 총 중량 210kg 차량(18인치 타이어, 최종 감속비 3.72)을 대상으로 FTP-75 주행 사이클을 Chassis Dynamometer에서 재현하였다. 시험은 실내 온도 20-25℃, 배터리 SOC(셀 충전 상태) 70~80% 조건에서 수행하였으며, 속도 공차 2 km/h 이하, 누적 위반 5 s 이하 기준을 만족한 랩만 분석하였다. 전압·전류(DC/AC)·토크·회전수 데이터를 500Hz 주기로 동시 샘플링 하였다. 비교 기준은 제조사 제공 630V 모터 단독 벤치 효율 맵이며, 실험에서는 회생제동을 배제하고 주행거리와 소비에너지의 비로 전비(km/kWh)를 산출하였다. 분석 결과, 300V 조건에서는 동일 부하에서도 최대 회전수가 약 500rpm 낮게 제한되었고, 자속 약화 진입 이후 토크 추종성이 평균 8% 감소하였다. 또한 고속 영역에서 모터-인버터 통합 효율이 데이터시트 대비 최대 10% 낮아졌으며, 이로 인해 FTP-75 전체 사이클에서 전비가 평균 30% 감소하였다. 이러한 결과는 고속 영역에서 역기전력($E \propto \omega$) 증가와 전압 공간 소진으로 인해 FW 개입이 조기화 되면서 발생한 것으로 해석된다.

또한 동일한 조건에서 배터리 팩 전압을 600V로 변경하여 동일 kWh급 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 전체 전비는 600V 조건에서 뚜렷한 개선을 보였다. 이는 실차 실험에서 관찰된 저전압 운용의 비효율성과 정합되며, 전압 등급 차이가 고속 성능과 전비에 미치는 영향을 모델링 관점에서도 재확인하였다.

전비 감소를 방지하기 위하여, 본 연구는 Id(d축 전류) 개입을 최소화하고 속도 기반 Iq(q축 전류) 감쇠를 적용하는 경량 제어 전략을 제안하였다. FTP-75 조건에서 정량 제어 적용을 통해, 기준(Id=0) 대비 제안 전략은 평균 속도 22% 향상, 전비 31% 개선, 토크 추종 RMS 안정성 향상을 확인하였다. 본 연구의 의의는 단일 차량 로그라는 한계에도 불구하고, 표준화된 드라이브 사이클과 모델링 검증을 병행하여 저전압 운용 시 전압 한계-FW 개입-토크/효율 저하의 연쇄 과정을 정량적으로 규명하고, 데이터시트 기반 성능 예측과 실차 결과 간의 괴리를 실험적으로 입증한 데 있다. 결론적으로, 저전압 조건에서는 단순 Iq 제어만으로는 성능 유지가 어렵고, 정출력(Constant Power) 영역 진입 속도를 고려한 토크 디레이팅과 자속 약화 제어 최적화가 필요함을 확인하였다. 이는 향후 저전압 기반 플랫폼 설계 및 제어 전략 수립에 실질적 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Category	Setting	Notes
Drive Cycle	FTP-75	Same Cycle Repeated
Test environment	20-25°C	Start after temperature stabilization
SOC window	70-80%	Recovery time secured between laps
DC-bus voltage	284V	Low-voltage condition
Repetitions	N=5 per condition	Only valid laps included

Table 1. Test Condition Summary

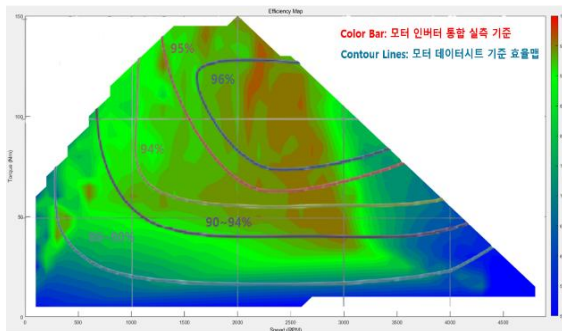


Figure 1. Test Condition Summary

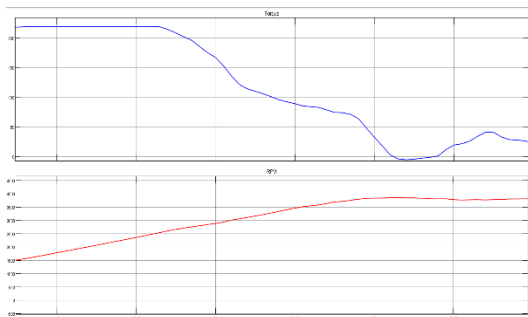


Figure 2. Torque derating at high speed

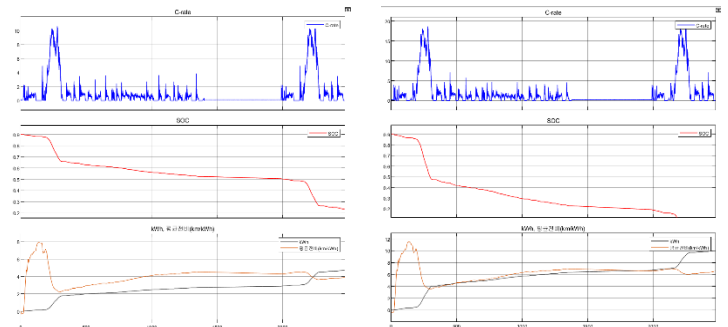


Figure 3. FTP-75: SOC, C-rate (Left 300V, Right 600V)

Metric	Id = 0	Id, Iq derating = set	Improvement [%]
Average speed [km/h]	32.91	40.17	+22.06
Energy economy [km/kWh]	3.10	4.06	+30.97

Table 2. FTP-75 Chassis Dynamometer Result