

Traction Motor 설계에 관한 연구

A Study of Basic Design for the Traction Motor

김원호* 배재남* 장익상* 이주†
Won-Ho Kim Jae-Nam Bae Ik-Sang Jang Ju Lee

ABSTRACT

A paradigm shift in driving system of transportation vehicle from engine to electric motor is required as the problems on air pollution and drain of petroleum resource are on the rise. Moreover while it is possible to control the motor with variable frequency driver, the application of motor in various kinds of vehicles is spread rapidly. In the paper, the effective design method of IPMSM for EV and HEV by using equivalent magnetic circuit and finite element method (FEM) is suggested. First of all, load conditions of the application are calculated. And basic design process of IPMSM is proposed with two design point. Finally, in order to verify the proposed design process, it was compared with the basic design parameter and the FEM analysis results.

1. 서론

산업 활동의 주 에너지원의 하나인 화석연료 고갈은 국가 발전과 에너지 안보에 직접적인 영향을 미치고 있으며, 급속한 산업화로 인한 대기오염 및 지구 온난화로 인해 세계적인 차원의 친환경 정책이 수립되고 있다. 이와 관련하여 화석 연료의 대부분을 소모하고 있는 운송시스템에 대한 탈석유화 및 탄소배출 저감이 강력히 요구되고 있는 실정이다. 고효율 하이브리드 전기추진 차량은 기존 내연기관과 전기구동계의 장점을 동시에 가지고 있어 탄소 배출을 현저히 줄일 수 있으며, 현재의 기술수준 (배터리 용량, 충전 시간 등) 으로 구현 가능한 단계에 있어 많은 관심이 집중되고 있다. 군수분야 역시 기존의 대형 고에너지 소모성 군용차량으로는 병력감축, 친환경, 에너지 고갈 및 임무장비 고성능화 요구에 능동적인 대처가 가능한 하이브리드 전기 차량에 대한 필요성이 강조되고 있다.

본 논문은 군용 하이브리드 자동차의 성능을 결정하는 가장 중요한 부분인 Traction 모터의 사양 결정 및 초기 설계에서 고려할 사항을 제시한다. 4륜구동 자동차의 부하 산정 방법과 이를 바탕으로 목표 성능을 만족할 수 있도록 모터의 사양을 결정하고 이 때 고려해야 할 사항들을 제시한다. 모터 사양이 결정되면 Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM)를 기준으로 초기 설계를 위한 설계 파라미터 범위 산정방법을 제시한다. 이를 위해 5톤급 4륜구동 High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle(HMMWV)에 적용 가능한 디젤 하이브리드 전기추진 시스템을 기준으로 사양을 결정하였으며, 목표성능은 표 1에 나타내었다.

† 정회원, 한양대학교, 전기 공학과, 정교수
E-mail : julee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0349 FAX : (02)2295-7111
* 정회원, 한양대학교, 전기 공학과, 박사과정

표 1. 목표 성능

항목	목표 성능
형태	직렬형 디젤 하이브리드
구성방식	4륜구동 방식
최대순항속도	포장로 100kph 이상
가속성능	포장로 0~60kph : 10초 이내
등판성능	경사로 60%@20kph 주행
저소음 주행거리	20kph, 비포장로 10km 이상

2. Traction 모터 사양 결정

2.1. 주행 부하 곡선 산출

Traction 모터의 출력 및 제어 방법을 결정하기 위해 먼저 차량의 주행 부하에 대한 고찰과 가감속 성능을 고려한 차량 출력에 대한 계산이 선행되어야 한다.

차량 바퀴에 필요한 출력은 식 (1)과 같이 회전저항을 극복하는 출력, 공기저항을 극복하는 출력, 경사면을 올라가거나 내려갈 때 필요로 하는 출력과 마지막으로 차량을 가감속시킬 때 요구되는 출력의 합으로 모델링되며, 각각의 세부적인 근사식을 (2), (3), (4), (5)에 나타내었다. [1] 식 (2)에서 M 은 차량의 총 질량(kg), g 는 중력가속도 상수 (m/s²), v 는 차량의 속도 (m/s)이고, C_r 은 지면 상태에 따른 타이어 점착영역과 타이어의 직경과 관련된 회전 저항 상수, α 는 경사각 (degree)이다. 식 (3)에서 ρ 는 공기의 밀도 (kg/m³), C_d 는 공기 저항 계수이고 A 는 차량과 탑승자 정면의 면적 (m²)이다. 즉, $C_d A$ 는 유효 정면 면적에 해당된다.

$$P = P_{\text{rolling}} + P_{\text{air-drag}} + P_{\text{slope}} + P_{\text{acceleration}} \quad (1)$$

$$P_{\text{rolling}} = Mg C_r v \cos\alpha \quad (2)$$

$$P_{\text{air-drag}} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^3 \quad (3)$$

$$P_{\text{slope}} = Mg v \sin\alpha \quad (4)$$

$$P_{\text{acceleration}} = Mv \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

만약 평지에서 등속으로 운전한다면, 회전 저항과 공기 저항 관련 출력만이 필요하다. 또한 저속에서는 회전 저항 관련 출력이 요구 출력의 대부분을 차지하고 고속에서는 공기 저항 관련 출력이 요구 출력을 지배한다.

모터의 회전 속도(rpm)과 실제 차량의 속도(kph)의 관계는 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 식 (6)에서 λ 는 기어비, r_d 는 유효 타이어 반경이다. 이 때 모터의 최고 속도는 10,000rpm 정도를 기준으로 감속 기어비를 선정한다. 10,000rpm 선정 기준은 볼 베어링 사용에 무리가 없는 최대 속도로, 이보다 기어비를 작게 가져가면 모터 회전자의 D2L은 토크에 비례하여 커진다.

$$v_{\text{vehicle}} = r_d \frac{2\pi \frac{n_{\text{motor}}}{\lambda}}{60} \quad (6)$$

또한 차체 무게중심에 따른 오르막 구배에서의 전, 후륜의 수직 하중은 식 (7), (8)에 의해 결정되며 이를 이용하여 구동모터의 출력을 분배한다. 이 때 l 은 차축 거리, l_f 는 무게중심과 전륜 차축과의 거리, l_r 는 무게중심과 후륜 차축과의 거리, h 는 무게중심높이를 나타낸다.

$$N_f = \frac{Mg}{l}(l_r \cos\alpha - h \sin\alpha) \tag{7}$$

$$N_r = \frac{Mg}{l}(l_f \cos\alpha + h \sin\alpha) \tag{8}$$

표 2는 주행 부하 곡선 산출을 위한 대략적인 HMMWV의 파라미터를 나타내었다. 이를 바탕으로 포장로에서 경사각 0%~ 60%의 부하 곡선을 그림 1에 나타내었다.

표 2. 주행 부하 곡선 산출을 위한 파라미터

Parameter	Value	Unit
회전저항상수	포장로 : 0.035 비포장로 : 0.065	
유효정면면적	26.5	ft2
유효타이어반경	0.45	m
기어비	15	
기어 효율	0.9	
차량 총 질량	5275	Kg
c.g에서 전륜차축	2.086	m
c.g에서 후륜차축	1.214	m
c.g 높이	0.922	m

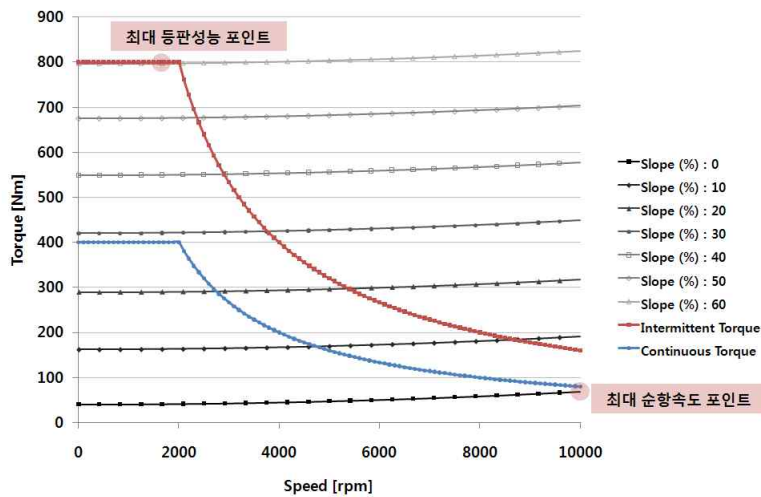


그림1. 포장로에서의 HMMWV 부하곡선

2.2. 모터 사양 결정

목표 사양 중 최대 등판 성능 포인트와 최대 순항속도 포인트를 그림 1에 나타내었다. 이 두 최대점이 HMMWV용 Traction Motor 사양 결정에 가장 중요한 포인트이다. 먼저 최대 순항 속도는 연속 정격(1시간) 사양으로 약계자제어에서 10000rpm을 만족하면서 이 때의 부하 69Nm를 이길 수 있도록 출력이 결정되어야 한다. 위 사양에서 결정된 연속 정격 출력은 84kW이며, 이 사양을 기준으로 0~60kph까지의 최대 가속도는 약 6.1초로 목표 가속 성능을 만족할 수 있다. 최대 등판 성능 포인트는 1670rpm에서 부하토크 800Nm 이상 출력이 되도록 결정해야 하며, 이것은 순시 정격(5분) 사양을 만족해야 한다.

일반적인 차량은 순시 정격으로 가속도 성능, 연속 정격으로 등판성능을 만족해야 하지만 군용 특수 차량의 무거운 중량과 높은 능판 성능 등의 특수한 상황에 맞추어 정격 포인트는 재산정 되어야 한다.

그림 2는 비포장로에서의 부하곡선이며 군용 차량의 스텔스 운전이 수행되는 포인트를 나타내었다. 이 점은 정격 출력 기준으로 운전에는 아무 문제가 없으나, 엔진을 정지한 상태에서 순수 배터리 용량으로 구동되기 때문에 모터 설계의 입장에서 이 점에서 효율을 극대화시키는 것이 중요하다. 이를 위해서 일반적인 IPMSM의 동손과 철손 증가시 효율의 변화를 그림 3에 나타내었다. 이를 바탕으로 저소음 주행 포인트에서 효율을 증가시키기 위해서는 철손을 최소화하는 설계를 수행해야 한다.

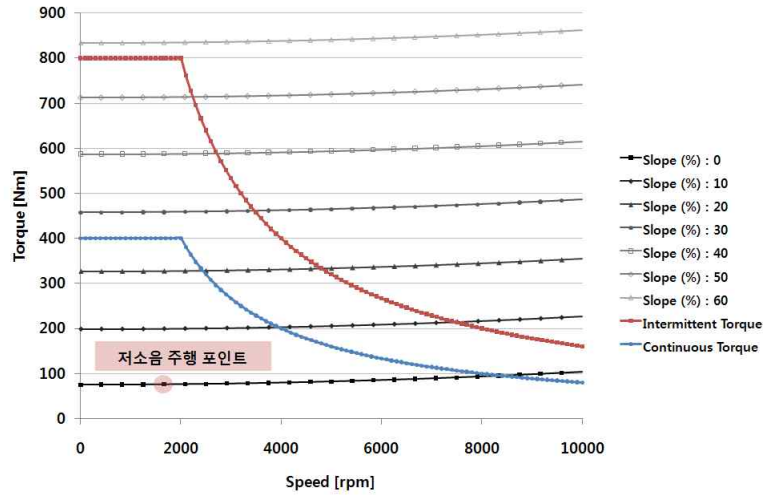
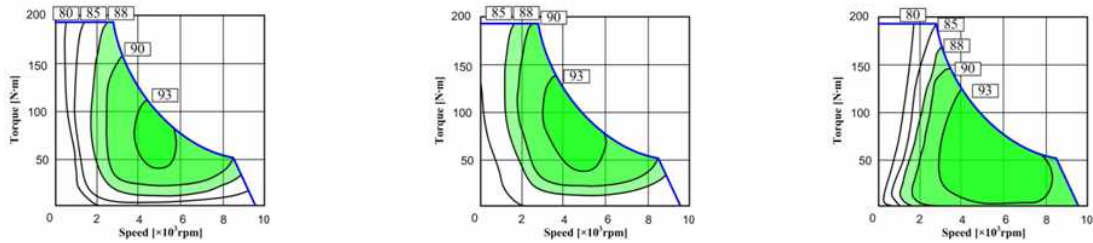


그림2. 비포장로에서의 HMMWV 부하곡선



(a) 일반적인 IPMSM 효율맵 (b) 동손 저감시 효율맵 (c) 철손 저감시 효율맵

그림3. IPMSM의 동손과 철손 저감에 따른 효율맵 변화

3. 전류 벡터 제어법

3.1. 전류 벡터 제어법

위에서 계산된 운전 특성을 만족하는 Traction Motor는 정격 속도 및 최대 속도에서 부하를 이길 수 있는 토크를 발생 시켜야 한다. 이는 제어법이 다른 두 설계 포인트를 모두 만족시키는 설계가 이루어져야 한다. 따라서 설계 전에 제어법 및 사양을 고려해 설계 파라미터를 한정하는 과정이 반드시 필요하다. IPMSM을 고성능 운전하기 위해서 일반적으로 실제의 전류가 전류 지령치에 추정하기 위한 전류 피드백 제어가 수행된다. 이 경우 전류 지령치를 어떻게 결정할 것인지가 중요한 문제가 되고, 이것이 모터의 운전 특성을 결정하게 된다. 본 논문에서는 전압 제한을 만족하면서 최대 출력을 얻는 최대 출력 제어를 사용한다. [2]

3.2. 정토크 구간 제어

IPMSM의 경우 동일 전류에 대하여 발생 토크를 최대로 하는 전류 위상이 존재한다. 이것은 결국 전기자 전류에 대하여 가장 효율적으로 토크를 발생하는 조건에 해당하며, 항상 이런 상태가 되도록 전류 벡터를 제어하는 방법을 토크 / 전류 최대 제어라 한다. 이 조건을 만족하는 최적 전류 위상은 I_u 와 β 로

표기한 식 (6)의 토크식을 β 로 편미분하여 0을 만족하는 β (식 (7)) 에서 약계자 영역에 도달할 때 까지 제어한다.

$$T = P_n \left\{ \Psi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad (6)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{-\Psi_a + \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \right) \quad (7)$$

$L_d = L_q$ 인 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)의 경우 $\beta=0$ 에서 최대 토크를 발생하며, $i_d=0$ 제어와 동일하다.

3.3. 정출력 구간 제어

영구자석에서 계자자속을 얻는 PMSM에서는, 권선계자형 동기모터의 경우처럼 계자자속을 직접 제어하는 것이 가능하지 않다. 대신 음의 d축 전류를 흐르게 함으로써, d축 전기자반작용에 의한 감자효과를 이용하여 d축 방향의 자속을 감소시키는 것이 가능하고, 등가적인 약계자 제어가 실현 가능하다. 계자자속을 직접 제어하는 약계자 제어와 구분하여 이 제어법을 약자속제어라 부른다. 이 때 전압 제한원과 전류 제한원이 만나는 교점 (i_d, i_q) 는 식 (8), (9)에 나타내었다.

$$i_d = \frac{\Psi_a L_d - \sqrt{(\Psi_a L_d)^2 + (L_q^2 - L_d^2) \left\{ (L_q I_{am})^2 - \left(\frac{V_{om}}{\omega} \right)^2 \right\}}}{L_q^2 - L_d^2} \quad (8)$$

$$i_q = \sqrt{I_{am}^2 - i_d^2} \quad (9)$$

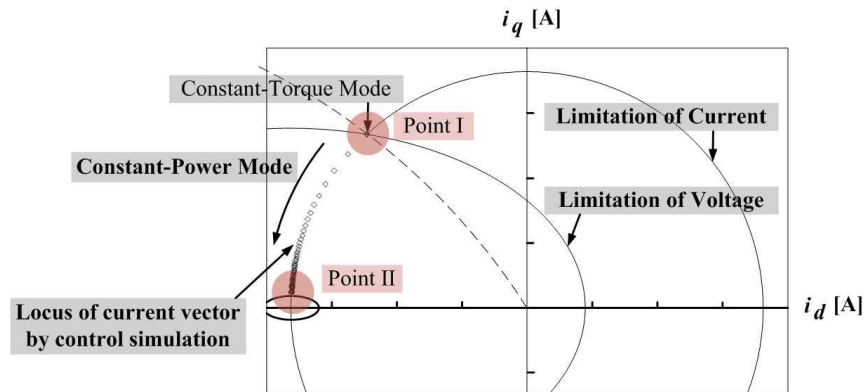


그림 4. 제어방식에 따른 전류 벡터 궤적

위 제어식을 살펴 보면 운전 영역은 기기정수(Ψ_a, L_d, L_q)와 전압, 전류 제한값에 의존하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 정토크 구간과 정출력 구간의 제어를 종합하여 전류 벡터 궤적에 나타낸 것이다.

4. 설계 파라미터 결정

4.1. 설계 파라미터 산정 알고리즘

IPMSM의 설계 파라미터 중 가장 중요한 것은 영구자석에 의한 쇄교 자속 Ψ_a , d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스 L_d, L_q 이다. 여기서 돌극비 (L_q/L_d)를 가정하고, 모든 L_d 와 Ψ_a 에 대하여 전압, 전류 제한치, 최대 속도 등을 계산하여 맵핑시킨다. 이를 바탕으로 설계 포인트 I과 II를 만족하는 L_d 와 Ψ_a 를 계산한다. 자세한 알고리즘은 그림 5에 나타내었다. 이 알고리즘을 통해 그림 4의 설계 Point I과 II를 동시에 만족

시키는 L_d 와 ψ_a 를 결정할 수 있다.

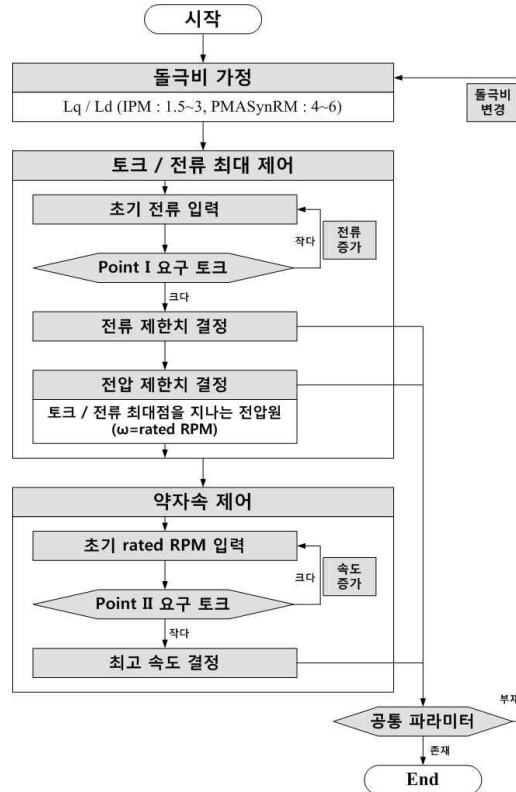


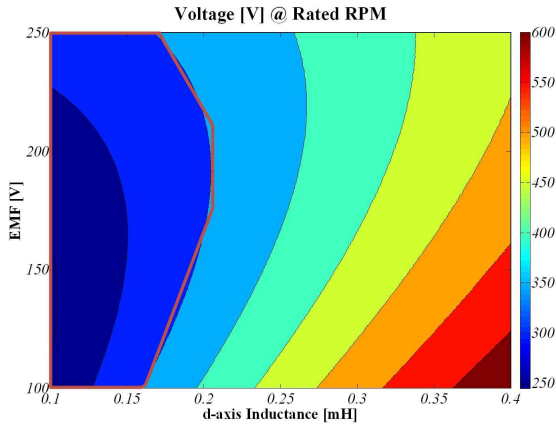
그림 5. 설계 파라미터 결정 알고리즘

4.2. HMMWV 설계 파라미터 산정

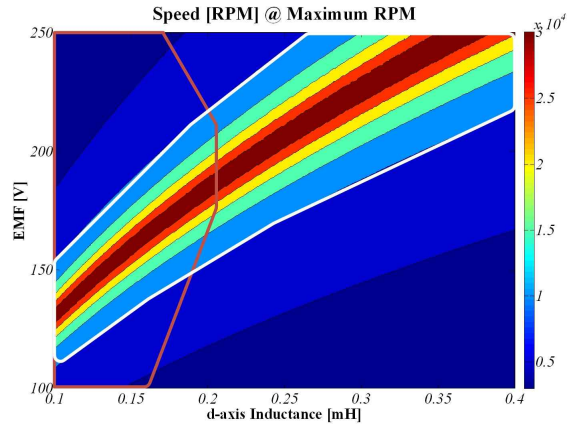
실제 목표 사양이 표 3과 같을 때 그림 6은 알고리즘을 이용하여 설계 파라미터를 결정한 것이다. 이 때, 돌극비는 1.5로 결정하였다. (a)는 정격 속도에서의 전압값으로 DC 링크단 전압과 PWM 방식을 고려하여 전압 제한범위를 결정하며, 여기에서는 350V 이하로 범위를 한정한다. (b)는 약계자 영역 끝단에서 요구 토크를 만족하는 최고 속도를 매핑한 것으로 10,000rpm 이상의 범위로 한정한다. (c)는 정격 속도에서 입력 전류값으로 위 두 조건을 만족하면서 최소의 전류가 들어가는 부분을 최종 설계 포인트로 결정한다. 최종 결정된 설계 파라미터는 표 4에 나타내었으며, 이 값을 이용하여 전동기 설계를 수행할 수 있다.

표 3. IPMSM 목표 사양

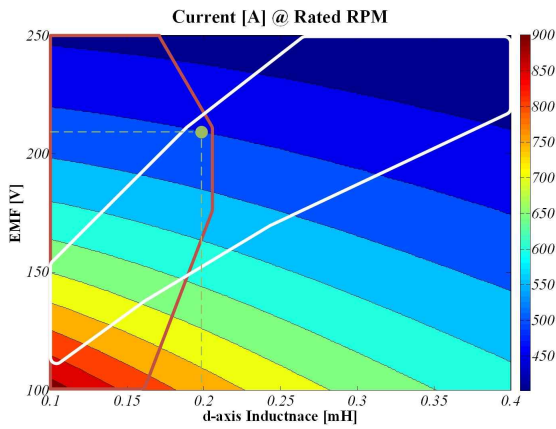
항목	목표 성능
순시 정격 속도	2000 [rpm]
토크 @ 정격 토크	800 [Nm]
순시 최대 속도	10000 [rpm]
토크 @ 최대 속도	70 [Nm]
DC 링크단 전압	600V
PWM 방식	공간벡터 PWM



(a) 전압맵 @ 정격속도



(b) 속도맵 @ 최고속도



(c) 전류맵 @ 정격속도

그림 6. 설계 파라미터 산정

5. 결론

Hybrid-HMMWV용 Traction 모터의 부하를 산정하고 이를 바탕으로 목표 사양을 만족하는 모터의 정격을 산정하였다. 이 때, 군용 자동차의 특수 상황을 고려하여 연속 정격과 순시 정격을 결정하였다. 또, 제어 모드가 다른 두가지 설계 포인트를 동시에 고려하는 알고리즘을 통해 설계 파라미터를 한정하였다. 이는 정격 사양만으로 설계한 후 제어 시뮬레이션을 통해 Try-and Error를 하는 방식에 비해 많은 시간을 단축할 수 있다.

참고문헌

1. J. Larminie, J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons, Ltd., 2003
2. 한양대학교 에너지변환연구실 역, 매입자석 동기모터의 설계 및 제어, 인터비전, 2007