

## 비선형 데이터셋을 이용한 IPMSM의 운전 시뮬레이션

김원호\*, 장익상\*, 김미정\*, 이기덕\*, 이재준\*, 한정호\*, 정태철\*, 채웅찬\*, 이주\*  
한양대학교\*

### Driving Simulation of the IPMSM by Using Nonlinear Dataset

Won-Ho Kim\*, Ik-Sang Jang\*, Mi-Jung Kim\*, Ki-Doek Lee\*, Jae-Jun Lee\*, Jeong-Ho Han\*, Tae-Chul Jeong\*,  
Ung-Chan Chae\*, Ju Lee\*  
Hanyang University\*

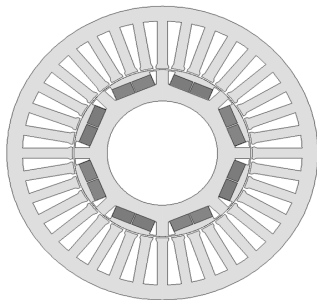
**Abstract** - 최근 화석 연료 사용으로 인한 대기 오염과 자원 고갈이 심각한 사회적 문제로 대두되면서 엔진 구동 시스템에서 전동기 구동 시스템으로의 차량의 패러다임 변화가 급격히 요구되고 있으며, 이런 추세는 고성능 균용 차량도 예외는 아니다. 그 안에 포함되는 핵심 부품인 견인용 전동기는 고효율, 고회전, 전 운전 범위의 고효율화 등의 운전 특성을 만족시키기 위해 IPMSM을 사용하는 것이 가장 적합하나, 마그네틱 토크뿐만 아니라 톨러턴스 토크까지 사용하며 파라미터의 비선형적 특성 등으로 인해 설계에 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 IPMSM의 2D-인덕턴스, 3D-철손, 4D-전압의 비선형 데이터 셋을 이용한 운전 시뮬레이션을 통해 제어시 필요한 전류-토크 테이블 및 정확도 높은 효율맵을 구성하였으며, 시작품을 통해 결과의 타당성을 검증한다.

#### 1. 서 론

본 논문에 사용된 IPMSM은 Hybrid HMMWV용으로 설계된 전동기이며 사양 및 전압, 전류 제한치는 표 1과 같으며, 최종 모델은 그림 1과 같다.

〈표 1〉 IPMSM의 사양 및 전압, 전류 제한치

항목	값	단위
순시 출력 (1분)	120	kW
순시 토크 @ 정격속도	403 @ 2,843	Nm @ rpm
순시 토크 @ 최대속도	115 @ 10,000	Nm @ rpm
연속 출력 (60분)	65	kW
연속 토크 @ 정격속도	218 @ 2,843	Nm @ rpm
연속 토크 @ 최대속도	62 @ 10,000	Nm @ rpm
상전압 제한값	346	V
상전류 제한값	550	A



〈그림 1〉 IPMSM 단면도

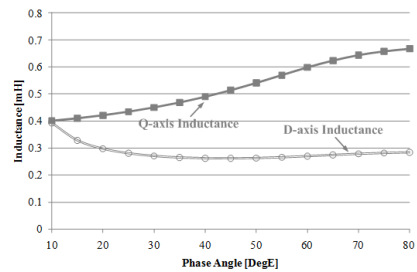
#### 2. 비선형 데이터셋

##### 2.1 2D-인덕턴스 데이터셋

d, q축 인덕턴스는 식 (1), 식 (2)와 같이 계산한다. d축 전류와 q축 전류는 전류 위상각에 따라 자동 결정되므로 최종 d, q축 인덕턴스는 전류 위상각별 2D 데이터 셋으로 나타낼 수 있다. 식에서 m은 m 차원의 데이터 셋을 의미한다. 그림 2는 500A에서 전류 위상각별 2D-인덕턴스 데이터 추이를 나타낸 것으로 d축 인덕턴스는 전류 위상각이 커질수록 폴피스가 포화되며 인덕턴스가 작아지며, q축 인덕턴스는 전류 위상각이 커질수록 포화가 풀려 인덕턴스가 커지는 것을 확인할 수 있다.

$$L_d = \frac{\lambda_o J_2 \cos[\alpha]_2 - \lambda_{PM}}{i_d J_2} \quad (1)$$

$$L_q = \frac{\lambda_o J_2 \sin[\alpha]_2}{i_q J_2} \quad (2)$$

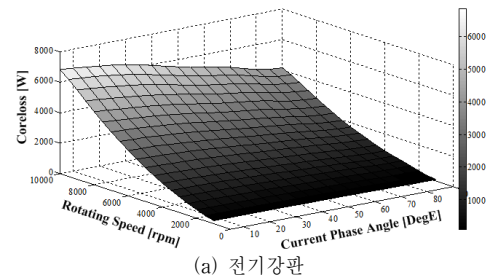


〈그림 2〉 2D-d, q축 인덕턴스 데이터셋 @ 500A

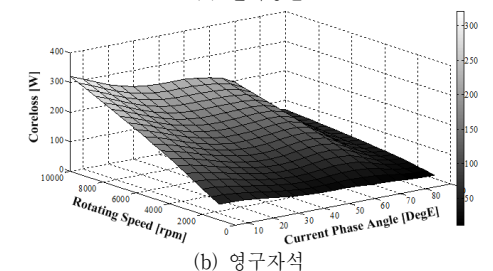
##### 2.2 3D-철손 데이터셋

전기장관의 철손과 영구자석의 철손은 식 (3)과 같이 주파수, 즉 속도에 따라서 비선형성을 보이므로 전류 위상각별 회전 속도별 3D 데이터 셋으로 유한 요소 해석을 통해 반영하여야 정확한 손실 예측 및 공극 자속을 계산할 수 있다. 그림 3은 500A에서 전기장관과 영구자석에서 발생하는 3D-철손 데이터를 나타낸 것으로 전기장관과 영구자석의 철손 모두 고속에 낮은 전류 위상각에서 큰 철손을 발생함을 확인할 수 있다.

$$P_{coreloss} = P_{hysteresis} + P_{eddy-current} + P_{excessive} \\ = K_{hysteresis} f(B_m)^2 + K_{eddy-current} (fB_m)^2 + K_{excessive} (fB_m)^{1.5} \quad (3)$$



(a) 전기장관



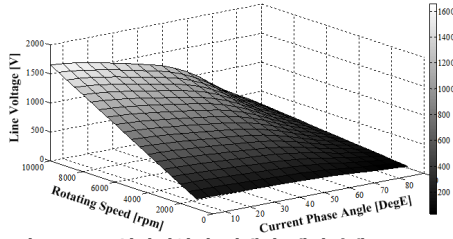
(b) 영구자석

〈그림 3〉 3D-철손 데이터셋 @ 500A

### 2.3 4D-상전압 데이터세트

일반적으로 상전압 기본과 성분을 계산해 제한치로 놓는 경우 고조파에 의해 전압 제한치 위로 튀는 전압이 존재하여 전류 파형의 왜곡을 가져올 수 있다. 본 논문에서 제안하는 운전 시뮬레이션에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위해 상전압 파형 전체를 뽑아 그 최대값을 전압 제한치로 둔다. 이를 위해 전류 위상각별 회전각별 3D-토탈 자속 세트와 3D-상전류 데이터 세트를 이용해 고정자 저항을 고려한 위상각별 회전각별 3D-상전압 데이터를 계산하면 식 (4)와 같고, 이 값을 속도별로 계산하면 4D-상전압 데이터를 만들 수 있다. 그림 4는 속도별 전류 위상각별 선간전압의 최대값을 통해 3D-Plot으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} [V_{phase}]_3 &= [I_{phase}]_3 R_{phase} + [V_o]_3 \\ &= [I_{phase}]_3 R_{phase} + \frac{d\theta}{dt} \frac{d[\lambda_o]_3}{d\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

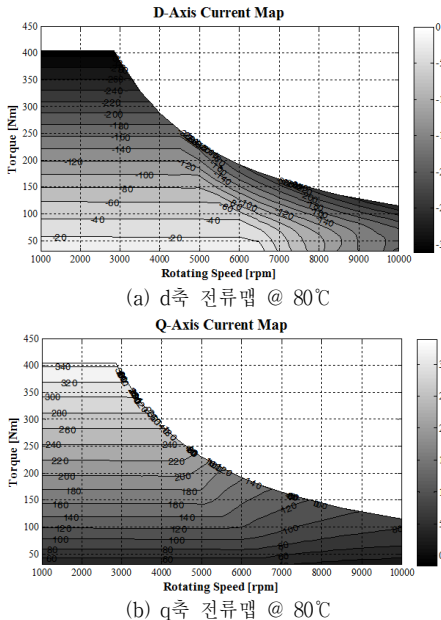


<그림 4> 3D-선간전압의 최대값 데이터세트 @ 500A

### 3. 시뮬레이션 결과

#### 3.1 d, q축 전류맵

위의 방법으로 정격 운전 범위 안에서의 d축 전류, q축 전류 분포를 나타내면 그림 5와 같다. 이 때, 계산 온도는 80°C로 시험 환경에서 모터가 올라가는 실제 온도의 평균값을 가정한 것이다. 실제 차량 제어의 경우, 차량이 임의의 운전 속도에서 원하는 가속력을 얻을 수 있도록 토크가 제어되어야 한다. 이 때 토크와 전류 및 전류 위상각의 계산은 비선형 파라미터들이 많아 실제 구현에 어려움이 많다. 이런 어려움을 해결하기 위해 실제 운전 영역 내의 속도, 토크 격자점에 대해 최대 출력 제어의 d, q축 전류를 직접 2차원 테이블로 저장하는 방법이 대부분 사용되고 있으며, 전류맵들을 이용하면 보다 정확한 데이터 테이블 제공이 가능하다.



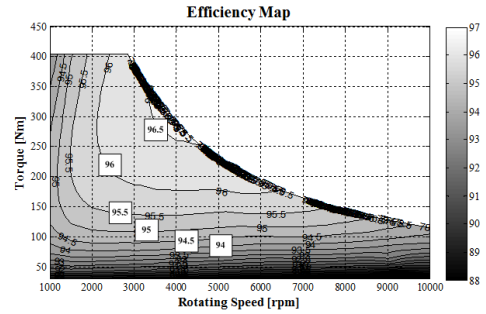
<그림 5> 시뮬레이션을 이용한 d, q축 전류맵

#### 3.2 효율맵

마지막으로 효율맵을 구성하면 그림 6과 같다. 효율 계산에서 철손은 유한 요소 해석을 통해 계산된 값이며, 표류부하손은 IEC 60034-2-1의 규격을 통해 식 (5)로 계산하였다. [1] 또한 풍손은 속도의 3승에 비례하는 항목으로 비례상수는 비슷한 용량의 데이터를 참고하여 결정하였다. [2] 마지막으로 베어링 마찰은 2Nm로 계산되었다. 시뮬레이션 결과를

보면 최대 효율은 약 4000rpm 근처에서 약 96.5%를 가지며, 전 영역에서 90% 이상의 효율을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

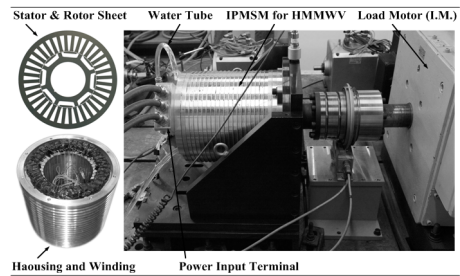
$$P_{stray} = P_{input} \left[ 0.025 - 0.005 \log_{10} \left( \frac{P_{output}}{1kW} \right) \right] \quad (5)$$



<그림 6> 효율맵 @ 80°C

### 4. 성능 시험

그림 7과 같이 시작품을 제작하여 시험을 통해 위 시뮬레이션의 타당성을 검증하였다. 이 때, 제안한 전류 테이블을 이용해 제어하며 토크, 효율 등의 결과는 표 2에 나타내었으며, 오차 범위 3% 이내의 정확성을 보임을 확인하였다.



<그림 7> IPMSM 시작품 및 시험 구성

<표 2> IPMSM의 사양 및 전압, 전류 제한치

속도 [rpm]	토크 [Nm]		효율 [%]	
	시험	시뮬레이션	시험	시뮬레이션
2000	407.74	403	94.79	95.66
4000	291.07	286.43	96.12	96.59
6000	194.26	190.95	95.87	96.17

### 5. 결론

비선형 특성이 큰 대전류의 견인용 IPMSM의 운전 특성을 제어성과 손실 등을 고려하여 보다 정확하게 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 통해 제어시 전류 테이블을 구성할 수 있으며, 이를 반영한 효율맵 구성이 가능하다. 마지막으로 시험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 이는 다른 영구자석형 전동기에도 모두 적용 가능하며, 특정 속도에서의 자속 데이터만을 이용해 모든 데이터를 뽑아내므로 시뮬레이션 횟수도 줄일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청/민군겸용기술센터의 민군겸용 기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [09-DU-EN-02. 특수임무 차량용 고기동 하이브리드 추진시스템 개발]

### [참고 문헌]

- [1] International Standard, IEC 60034-2-1, 2007
- [2] Ajisman, Jun Kobuchi, Ken Obayashi, Uyuichi Shimada, "Windage Loss Reduction of Flywheel / Generator System Using He and SF6 gas Mixtures," Energy Conversion Engineering Conference, Vol 3, pp. 1754-1757, 1997.