

약계자 영역을 고려한 온라인 전기버스용 영구자석 전동기의 특성산정 연구

손락원, 이종인, 김완기, 김근웅
현대중공업 기계전기연구소

Study on the characteristic estimation of Permanent Magnet Synchronous Motor for On-Line Electric Vehicle considering field weakening region

Rak-Won Son, Jong-In Lee, Wan-Gi Kim, Keun-Woong Kim
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Electro-Mechanical Research Institute

Abstract - 온라인 전기버스용 전동기는 차량의 운전특성을 고려하여 가속성 향상을 위한 높은 기동토크가 요구되며, 넓은 속도영역 운전을 위한 약계자 제어성능이 우수해야 한다. 특히 전동기의 최대 동작속도가 배터리 전압에 의해 결정되므로, 고속 운전영역 확보를 위해 전압제한을 고려한 설계가 필요하다.

본 연구에서는 정격속도 대비 최대속도의 비가 1:4로서 넓은 약계자 영역이 요구되는 온라인 전기버스용 전동기에 대해 개념설계를 진행하여 Active Part의 치수를 산출하고, 고정자 권선의 턴수 및 회전자 형상 변화에 따른 전압 및 출력특성을 비교·분석하여, 온라인 전기버스용 전동기에 요구되는 약계자 제어특성을 만족하도록 설계안을 도출하였다. 또한 전동기의 고속 동작시 주 손실인 철손에 의한 온도상승을 고려하여 영구자석의 감자안정성을 분석하였으며, 전자장 FEM 해석을 적용하여 설계결과의 타당성을 검증하였다.

최고 회전속도에서 전동기의 제어 가능성을 확보하기 위해서는 약계자 제어시 배터리 전압 범위 내에서 전동기의 단자전압이 결정되어야 하므로, 단자전압 제한을 고려한 고정자 권선설계가 필요하다. 이를 위해 최고 속도에서 고정자 권선의 직렬턴수 변화에 따른 단자전압의 추이를 분석하였고, 그 결과를 그림 1에 제시하였다. 단자전압 제한치를 만족하는 13턴 이하의 직렬턴수에 대해 기본설계안을 도출하였으며, 주요 설계사양은 표 1과 같다.

1. 서 론

온라인 전기버스는 도로에 매설된 급전선로로부터 주 전력을 공급받으므로 일반 전기버스 대비 배터리 의존도가 20% 수준으로 경제성이 뛰어나며, 천연가스버스에 비해 배기가스 및 엔진소음이 없는 장점을 가지고 있다. 온라인 전기버스용 추진 전동기는 정격 2,000rpm에서 최대 8,000rpm까지 회전하므로 넓은 약계자 영역에서 동작하며, 정격 이상의 회전속도에서 배터리 전압을 고려한 전동기의 약계자 제어가 요구된다.

본 논문에서는 전동기의 약계자 제어특성을 고려하여 고정자 권선설계 및 회전자 형상변화에 따른 특성 분석을 다루었다. 또한 전동기의 고속 동작시 주 손실인 철손에 의한 온도 상승을 고려하여, 영구자석의 감자안정성을 분석함으로써 온라인 전기버스용 전동기에 적절한 설계안을 도출하였다. 이때 각 설계안에 대해 전자장 FEM 해석을 적용하여 설계결과의 신뢰성 및 타당성을 검증하였다.

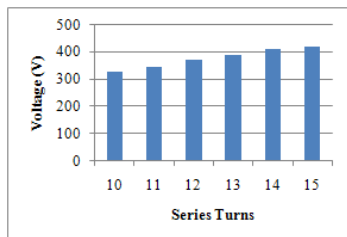
2. 본 론

2.1 전동기 설계사양

온라인 전기버스용 전동기에 요구되는 약계자 특성을 만족시키는 동시에 필리턴스 토크를 유효하게 사용하기 위해, 영구자석을 회전자 내부에 삽입하는 매입형 타입의 회전자 구조를 채택하였다. 또한 고속운전시 회전자 표면의 강성을 고려하여 회전자의 외경 및 브리지부 두께를 선정하였으며, 등가자기회로법을 이용하여 전동기의 Active Part에 대한 기본적인 치수를 산출하였다.

〈표 1〉 설계사양

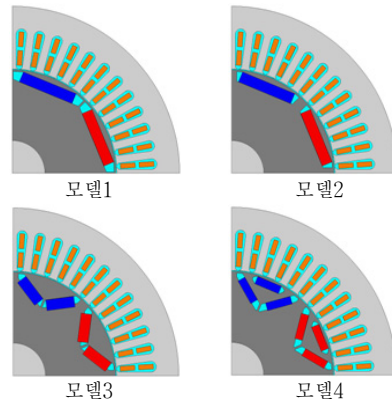
항목	단위	특성치
최대토크	Nm	955
최대속도	rpm	8,000
극수/상수/슬롯수	—	3/8/48
잔류자속밀도	Tesla	1.25



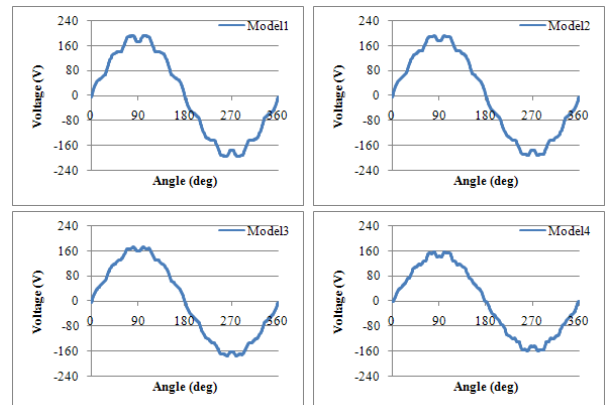
〈그림 1〉 직렬턴수 변화에 따른 단자전압의 변화 추이

2.2 회전자 형상변화에 따른 특성 분석

매입형 영구자석 동기전동기는 회전자 내부의 영구자석 배치에 따라 d축과 q축 자기회로가 변하게 되므로, 코깅 토크와 토크 리플 등의 고조파 특성 및 제작성과 조립성을 고려한 회전자 형상설계가 필요하다. [1] 온라인 전기버스용 전동기에 적합한 회전자 형상을 검토하기 위해, 그림 2와 같이 4가지의 회전자 형상을 설계하였다. 기본설계를 통해 선정된 기준 모델은 모델 1이며, 모델 1에 대해 Rib의 폭을 변경하여 모델 2를 도출하였다. 또한 모델 3과 4는 모델 2 대비 영구자석을 각각 2개와 3개로 분할한 모델이다. 이때, 각 모델의 영구자석 체적 및 극간격 대비 영구자석 폭의 비율인 극호비를 동일한 수준으로 설계하였으며, 무부하시 각 모델의 역기전력 파형 및 고조파 분석결과를 그림 3과 표 2에 제시하였다. 역기전력 파형을 분석한 결과, 모델 3과 4의 THD가 모델 1 대비 약 70% 수준이므로, 제어성 및 고조파 특성이 양호한 수준임을 알 수 있다.



〈그림 2〉 회전자 형상

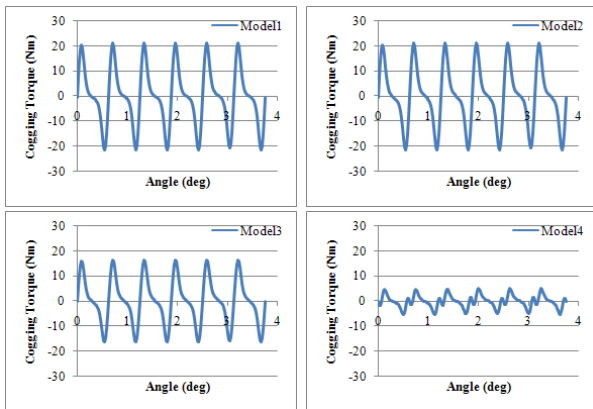


〈그림 3〉 역기전력 파형

〈표 2〉 역기전력 분석

항목	단위	Model1	Model2	Model3	Model4
BEMF 비	%	100.0	99.7	90.6	81.2
THD 비	%	100.0	81.1	69.2	72.2

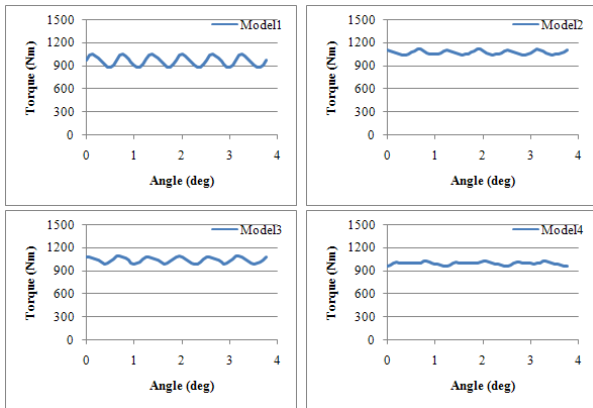
각 모델에 대한 코깅토크 분석결과를 그림 4와 표 3에 제시하였으며, 모델 4의 Peak-Peak값과 RMS값이 4모델 중 가장 작으므로 고조파의 영향이 최소화 된다. 한편 온라인 전기버스에 탑승한 승객의 승차감 향상을 위해, 토크리플의 최소화가 요구된다. 그림 5 및 표 4에 제시한 바와 같이 최대출력 조건에서 전동기의 토크리플을 분석한 결과, 모델 1 대비 모델 2, 3, 4의 토크리플 비율은 각각 51.3%, 61.4%, 36.2% 수준임을 알 수 있다. 또한 출력특성을 간략히 정리한 표 5로부터 출력비는 2 > 3 > 4 > 1의 순서로서, 동일한 고정자 기자력이 인가되는 조건에서 모델 2의 출력밀도가 가장 높은 것을 확인하였다. 이때 모델 3의 손실이 모델 1 대비 105.9% 수준으로 약간 높으나, 출력밀도가 상대적으로 높으므로 각 모델간의 효율은 95.5~95.8% 수준으로 큰 차이가 없다.



〈그림 4〉 코깅토크 파형

〈표 3〉 코깅토크 분석

	단위	Model1	Model2	Model3	Model4
Peak-Peak 비	%	100.0	99.5	76.2	25.2
RMS 비	%	100.0	100.4	78.1	22.8



〈그림 5〉 토크리플 파형

〈표 4〉 토크리플 분석

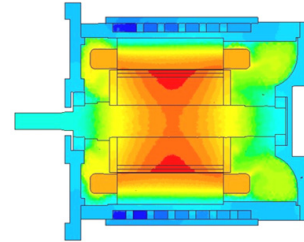
	단위	Model1	Model2	Model3	Model4
Peak-Peak 비	%	100.0	51.3	61.4	36.2

〈표 5〉 출력특성 비교

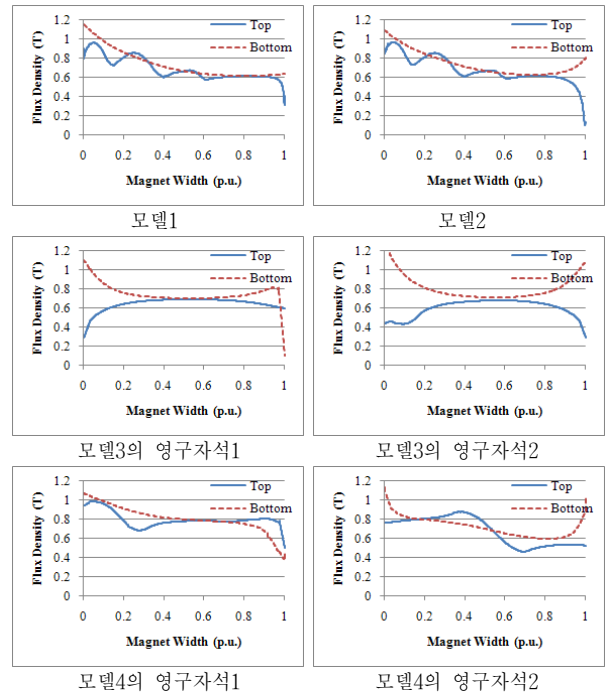
	단위	Model1	Model2	Model3	Model4
출력비	%	100.0	111.0	108.0	103.1
손실비	%	100.0	102.6	105.9	103.1
효율	%	95.5	95.8	95.6	95.5

2.3 영구자석의 감자안정성 분석

영구자석의 감자발생 유·무는 영구자석 동기전동기의 수명과 직결되는 중요한 설계인자이므로[2], 전동기의 고속 동작시 주 손실인 철손에 의한 온도 상승을 고려하여 영구자석의 감자안정성을 검토하였다. 먼저 전동기의 최고속도 동작시 온도특성을 분석한 결과를 그림 6에 제시하였으며, 영구자석의 최고온도는 약 140°C 수준으로 계산되었다. 영구자석의 최고온도에 대해 인버터의 최대전류가 영구자석의 d축에 인가되는 조건을 기준으로 영구자석의 안정성을 분석하였다. 각 모델의 영구자석 상부와 하부표면에 대해 자속밀도 분포를 분석한 결과를 그림 7에 제시하였으며, 모델 4의 영구자석3은 다른 영구자석에 비해 자속밀도가 높으므로 생략하였다. 모델 1 대비 Rib의 폭이 감소한 모델 2의 경우, 영구자석 측면부의 공극영역 감소에 의한 역자계 침투깊이 증가효과로 인해 영구자석 상부의 최저 자속밀도가 약 0.2T 하락하는 현상이 발생하였다. 또한 모델 3과 4는 영구자석 분할효과로 인해 영구자석에 미치는 전기자 반작용 자속의 영향이 줄어들어 평균 자속밀도가 모델 1에 비해 높게 나타나고 있다.



〈그림 6〉 전동기 내부의 온도분포도



〈그림 7〉 영구자석 내부의 자속밀도 분포도

3. 결 론

본 논문은 정토크 대비 정출력 구간이 1:4로서 넓은 약계자 영역에서 구동되는 온라인 전기버스용 영구자석 동기전동기에 대해, 고정자 권선 설계 및 영구자석 배치형상에 따른 특성을 비교·분석하였다. 또한 최고속도 동작시 온도상승을 고려한 감자안정성 분석을 통해, 각 설계안의 신뢰성 및 타당성을 검증하였다. 본 연구결과는 넓은 약계자 영역을 가지는 영구자석형 추진 전동기의 설계시 도움이 될 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] 이갑재, 김기찬, 이종인, 권중록, “극호비 변화에 따른 영구자석 매입형 동기전동기의 토크 특성 해석”, 전기학회논문지, 제54권 제2호, pp.81-87, 2005
 [2] “Magnetization of Permanent Magnets for Electrical Machines”, Seminar at the Royal Institute of Technology, Sweden, 2001