

전동식 조향장치용 영구자석형 브러시리스 모터의 타입별 특성 비교

이 민 환^{*1)} · 김 일 용²⁾ · 이 충 성²⁾

만도브로제 주식회사 기술연구소¹⁾ · 주식회사 만도 중앙연구소²⁾

Characteristic Comparison of Brushless Motor Type for EPS System

Minhwan Lee^{*1)} · Ilyong Kim²⁾ · ChoongSung Lee²⁾

¹⁾R&D Center, Mando-Brose Corporation, MHE 3F, 10-42 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea

²⁾Central R&D Center, Mando Corporation, 413-5 Gomae-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-901, Korea

(Received 7 December 2010 / Revised 22 April 2011 / Accepted 28 July 2011)

Abstract : As enforced by the regulation on the improving fuel efficiency and increased the demand on green technology, many interests are focused on electric vehicles and hybrid vehicles. Thus the technology development in electrification of vehicle operation system, including steering and braking field, is actively progressive. Especially electric power steering substitutes for hydraulic power steering rapidly in the market, which is more complex and bigger in packaging volume compared with electric power steering system. The core component in electric power steering system is a motor, which is required to be silent and powerful to guarantee required system performance. Brushless synchronous motors are widely used and many variations of the motors are introduced in the market, while the performance of each type is not well defined or studied for electric power steering system. In this paper, recent developments in brushless synchronous motor are reviewed and compared applying finite element analysis in electromagnetic field. As results, each characteristic of different types of brushless synchronous motors is compared and summarized for optimized selection in electric power steering system.

Key words : PMSM(영구자석형 동기모터), Brushless motor(브러시리스 모터), EPS(전동식 조향장치), IPMSM(매입자석형 동기모터), SPMSM(표면자석형 동기모터)

Nomenclature

i_a : winding current, A_{rms}
 i_d, i_q : d, q axis winding current, A_{rms}
 v_d, v_q : d, q axis winding voltage, V_{rms}
 Ψ_a : flux linkage of permanent magnet, Wb
 Ψ_o : flux linkage of winding, Wb
 L_d, L_q : d, q axis inductance, H
 R_a : winding resistance, Ω
 ω : angular velocity, rad/sec
 P_n : no. of pole pair

β : current angle, deg
 T_m : magnetic torque, Nm
 T_r : reluctant torque, Nm

1. 서론

최근 연비 규제가 강화되고 친환경 차량에 대한 요구가 급격히 대두되면서 전기자동차 및 하이브리드 자동차 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 이러한 추세에 따라 내연기관 엔진을 이용하던 구동장치 즉 유압식 조향장치, 냉각장치, 제동장치 등의 전자화도 급속히 이루어지고 있다.¹⁾

특히 전동식 조향장치(EPS; Electric Power Steering)

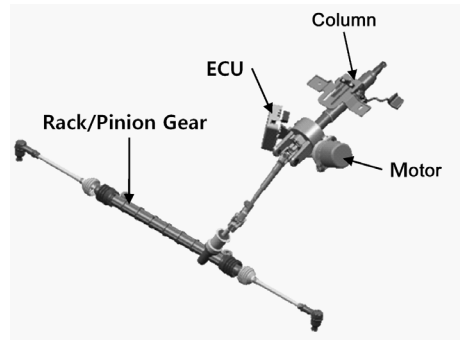
*Corresponding author, E-mail: mhwlee@mando.com

는 연비 향상을 위해 기존의 차량에서도 덩치가 크고 복잡한 시스템인 유압식 조향장치를 대체해 가고 있는 대표적인 부품이다. 현재 적용되고 있는 전동식 조향장치는 핸들의 컬럼(Column) 부분에 모터가 부착되어 기어박스에 구동 토크를 전달하는 컬럼타입과 기어박스에 모터가 부착된 랙(Rack)타입으로 구분된다.

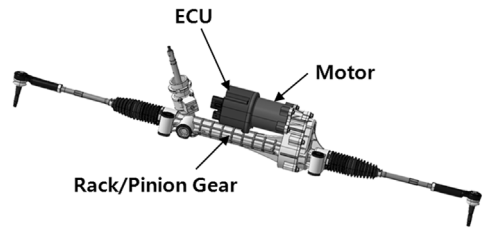
Fig. 1은 컬럼타입의 전동식 조향장치(CEPS; Column-Type Electric Power Steering)와 랙타입 전동식 조향장치(REPS; Rack-Type Electric Power Steering) 구조를 각각 나타낸다. 컬럼타입 전동식 조향장치는 구조가 상대적으로 간단하지만 강성이 약해 출력이 작은 소형차에 주로 적용되고 랙타입 전동식 조향장치는 컬럼타입에 비해 기어박스의 구조가 복잡하나 상대적으로 강성이 크고 출력증대가 용이하기 때문에 주로 중·대형 차량에 적용된다.

이러한 전동식 조향장치에서 가장 핵심을 이루는 부품 중의 하나가 모터이다. 전동식 조향장치는 모터의 회전특성이 운전자에게 직접적으로 전달되기 때문에 저진동 및 저소음 모터 개발이 필수적이다. 또한 배터리의 제한된 전원에서부터 고토크 및 고응답성이 요구되어 지기 때문에 고효율의 모터 개발이 중요한 이슈로 부각되고 있다.

자동차용 브러시리스 모터의 연구 동향으로서 Kim, Vodyakho는 전기자동차용 구동모터 제어법으로 기존의 히스테리시스 제어법 대신 공간 벡터를 이용한 전류제어를 통하여 모터의 토크 리플 감소 기법을 개발하였고²⁾ Lee, Hong 등은 쇠교자속의 고조파 분석을 통하여 전류 파형의 보정함으로써 매입자석형 동기모터(IPMSM; Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 토크리플 저감 기법을 제안하였다.³⁾ Murakami, Honda 등은 에어컨 컴프레서용 모터의 고정자 치형 형상 변형을 통해 모터의 진동 및 소음 저감기법을 개발하였고,⁴⁾ 매입자석형 동기모터, 표면자석형 동기모터(SPMSM; Surface Permanent Magnet Synchronous Motor), 동기형 릴럭턴스 모터(SynRM)의 특성 비교를 통해 매입자석형 동기모터가 에어컨 컴프레서 모터로 최적임을 밝혔다.⁵⁾ Hwang은 조향장치용 브러시리스 모터의 코깅토크 발생에 대한 매커니즘을 규명하고 회전자의 영구자



(a) CEPS System



(b) REPS System

Fig. 1 Electric power steering system

석 스큐(Skew)를 통한 저감기법을 개발하였다.^{6,7)}

이와 같이 이전의 연구 동향은 주로 모터제어, 소음/진동 개선, 코깅토크 저감 등에 대해 연구되었으나 자동차용 저전압 배터리를 전원으로 하는 전동식 조향장치용 모터의 형태에 따른 특성 연구는 부족한 편이다.

본 논문에서는 전동식 조향장치에 적용되고 있는 다양한 최신 브러시리스 모터들에 대해 시스템 사양에 부합되는 설계 사양을 정의하고 특성을 시뮬레이션 한 다음 그 결과를 항목별로 비교함으로써 각각의 모터특성을 고찰하고자 한다.

2. 전동식 조향장치용 브러시리스 모터

현재 전동식 조향장치에 적용되고 있는 모터는 크게 직류 모터(DC Motor)와 브러시리스 모터(Brushless Motor)로 구분할 수 있다. 직류 모터의 경우 소형 차량 위주로 적용되고 있으나 요구 사양이 점차 고성능화됨에 따라 브러시리스 모터로 대체되고 있다. 그리고 브러시리스 모터에서도 유도 모터(Induction Motor)와 영구자석형 동기모터(PMSM;

Permanent Magnet Synchronous Motor)으로 나눌 수 있는데 조향장치용으로는 사이즈가 작고 출력밀도가 높은 영구자석형 동기모터가 주로 쓰이고 있다.

2.1 영구자석형 동기모터의 종류

2.1.1 표면자석형 동기모터(SPM) (SPMSM)

표면자석형 동기모터(Type 1)는 Fig. 2(a)와 같이 원주형태의 영구자석을 회전자 표면에 부착시킨 형태의 모터로서 영구자석의 마그네틱 토크(Magnetic Torque)만을 이용하여 토크를 발생시킨다. 따라서 출력이 매입자석형 동기모터에 비해 작지만 상대적으로 코깅토크 및 토크리플이 작고 제어가 쉬운 편이다.⁸⁾

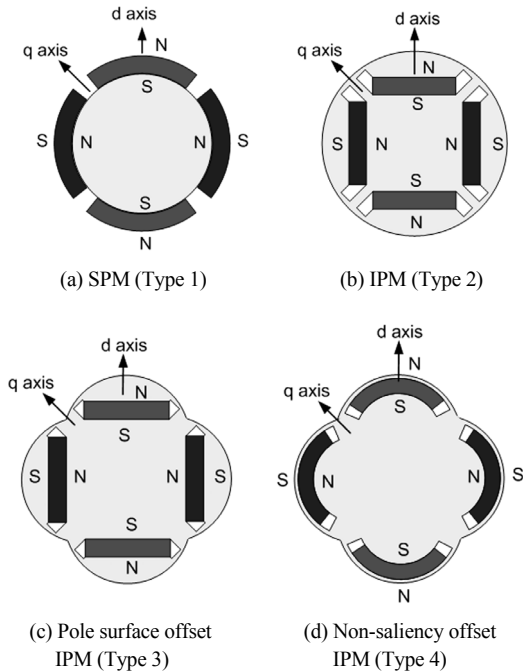


Fig. 2 PMSM rotor type for EPS system

2.1.2 매입자석형 동기모터(IPMSM)

매입자석형 동기모터(Type 2)는 Fig. 2(b)와 같이 영구자석이 회전자 속에 매입되어 있는 구조로 자석의 마그네틱 토크(Magnetic Torque)와 인덕턴스의 차에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크(Reluctant Torque)를 함께 이용할 수 있기 때문에 출력이 커지는 장점이 있다. 그러나 릴럭턴스 토크로 인해 토크

리플 및 코깅토크가 나빠지는 경향이 있다.^{8,9)} 최근 이러한 고전적인 매입자석형 모터의 단점을 극복하기 위하여 Fig. 2(c)와 같이 자속 밀도가 높은 자극면 모서리 부분의 공극을 증가시킨 자극면 편심 매입자석형 모터(Pole Surface Offset IPM, Type 3)나 Fig. 2(d)와 같이 영구자석을 원주형태로 배치시켜 표면자석형 모터와 매입자석형 모터를 복합한 비돌극 편심형 매입자석 모터(Non-Saliency Offset IPM, Type 4)가 제안되었다.¹¹⁾

2.2 이론적 출력 특성

2.2.1 동기모터의 등가 모델 및 기본 특성식

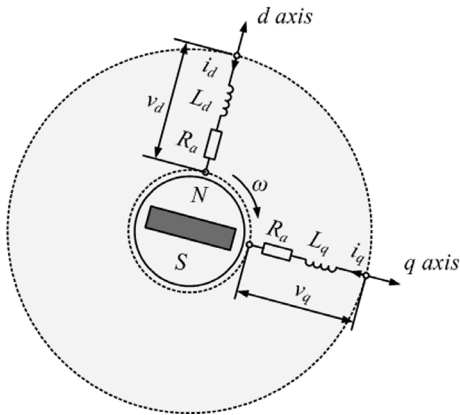
1) 등가 모델에 의한 토크식

Fig. 3은 이론적 특성 해석을 위한 동기모터의 d-q축 등가 모델과 기본 벡터도를 각각 나타낸다. 등가 모델로부터 식 (1)과 같이 전압 방정식을 유도할 수 있다. 우측 제1항의 1행 1열과 2행 2열은 전기자 권선저항에 의한 전압강하 성분이고, 1행 2열 및 2행 1열은 q축 및 d축 전기자 반작용을 나타낸다. 제2항은 영구자석의 전기자 쇄교자속에 의한 유기전압으로 q축에서만 발생한다. 이를 영구자석형 동기모터의 정상운전시의 벡터도로 나타내면 Fig. 3(b)와 같다.

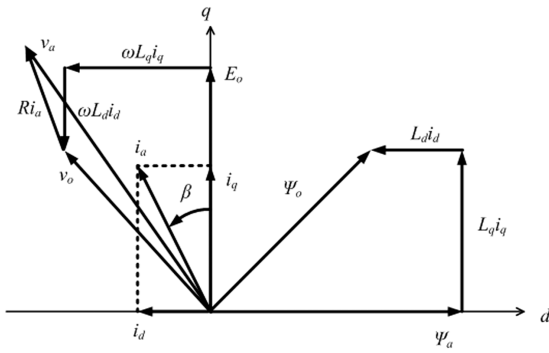
그리고 식 (1)과 Fig. 3(b)를 이용하여 식 (2)와 같이 토크식을 구할 수 있다. 이때, i_a 는 전기자 전류, i_d, i_q 는 d, q축 전기자 전류, v_d, v_q 는 d, q축 전기자 전압, Ψ_a 는 영구자석에 의한 쇄교자속, Ψ_o 는 전기자 쇄교자속, L_d, L_q 는 d, q축 인덕턴스, p 는 미분연산자 (d/dt), R_a 는 권선저항, ω 는 각속도, P_n 은 극쌍수, β 는 q축으로 부터의 전류 위상을 나타낸다. 식 (2)에서 토크는 마그네틱 토크(T_m)와 릴럭턴스 토크(T_r)로 구분할 수 있다.^{8,9)}

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T &= P_n \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \\ &= P_n \Psi_a i_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) i_a^2 \sin 2\beta \\ &= T_m + T_r \end{aligned} \quad (2)$$



(a) d-q transformation model



(b) Basic vector diagram of PMSM

Fig. 3 d-q equivalent model of PMSM

2) 전압 및 전류 제한시 전류 제어

자동차용 모터는 배터리 전원을 이용하기 때문에 전압과 전류에 제한이 크다. 따라서 이 제한을 고려한 설계와 운전시의 제어기법이 성능에 큰 영향을 미친다.

전기자 쇠교자속 Ψ_o 는 d, q축의 인덕턴스와 영구자석의 쇠교자속 Ψ_a 를 이용하여 식 (3)과 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$\begin{bmatrix} \Psi_{od} \\ \Psi_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \Psi_o &= \sqrt{\Psi_{od}^2 + \Psi_{oq}^2} \\ &= \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (4)는 식 (3)을 이용하여 나타낸 전기자의 역기전력과 전압 제한 v_{om} 과의 관계를 나타낸다. 여기서

전압 제한 v_{om} 은 식 (5)와 같이 인가 전압 v_{am} 과 권선저항에 의한 전압강하 $R_a i_{am}$ 을 고려하여 구해진다.

$$\begin{aligned} v_o &= \omega \Psi_o \\ &= \omega \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \leq v_{om} \end{aligned} \quad (4)$$

$$v_{om} = v_{am} - R_a i_{am} \quad (5)$$

식 (6)은 d-q 좌표계에서 전류 제한 영역에 대한 식을 나타내고 식 (7)은 식 (3)과 식 (4)를 통하여 전압 제한 영역에서의 운전 영역을 나타낸다.

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_{am} \\ i_d^2 + i_q^2 &\leq i_{am}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_d^2 + v_q^2 &\leq v_{am}^2 \\ (L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2 &\leq \left(\frac{v_{om}}{\omega}\right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 4는 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 d, q축에 표시한 전류 벡터의 선택 영역을 나타낸다. 선택 가능한 전류 벡터는 전류 제한 원과 전압 제한 타원이 교차하는 영역 내에서 선택할 수 있다. 이때 전류 제한원은 전류 크기에 따라 영역이 커지지만 전압 제한 타원은 속도가 증가할수록 역기전력이 증가하기 때문에 그 영역이 작아져 점 $M(i_d = -\Psi_a/L_d)$ 에 접근하게 된다.⁸⁾

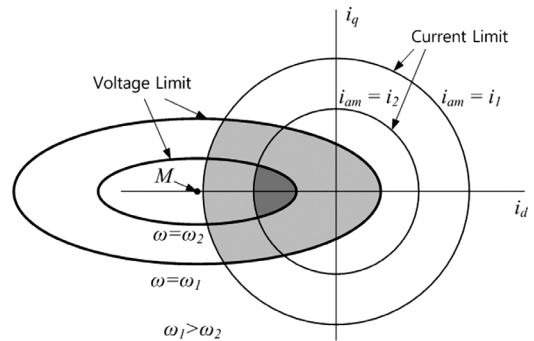


Fig. 4 Current vector region at voltage and current limit

3. 시뮬레이션을 통한 특성 해석

모터 시뮬레이션은 크게 자기 회로 모델 해석법과 유한 요소 해석법으로 나눌 수 있다. 자기 회로 모델 해석은 등가 모델을 이용하여 이론적으로 해

석하는 방법으로 시간이 빠르지만 등가 모델에 따라 오차가 크고 인덕턴스와 같이 비선형 파라미터 해석에는 한계가 있다.^{1,9)} 따라서 기본적인 파라미터는 자기 회로 모델 해석을 통해 산출하고 보다 정밀한 해석은 유한요소 해석을 통해 이루어진다.

본 논문에서는 도출된 기본적인 파라미터들에 대해 Maxwell 2D를 이용한 유한요소 해석 결과를 이용하여 각 모델에 대한 장단점을 비교하였다.¹⁰⁾

3.1 해석 모델의 사양 및 해석 조건

Table 1은 Fig. 2의 모델들에 대해 전동식 조향장치의 요구조건에 부합하는 기본적인 설계 사양들을 나타낸다. Fig. 5는 해석 모델들의 타입별 단면 형상을 나타낸다. 효율적인 해석을 위해 1/2모델을 이용하여 해석을 수행하였다.

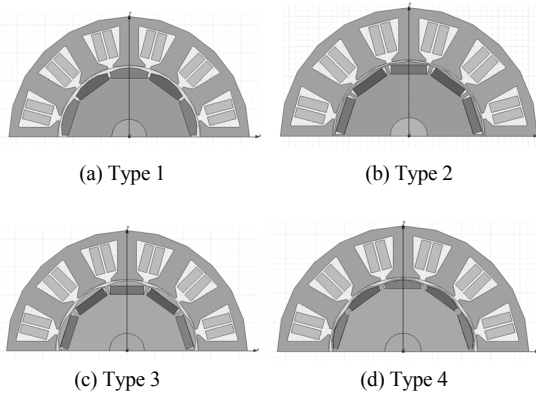


Fig. 5 Design model for simulation

Table 1 Basic design specifications for EPS PMSM

Item	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
No. of pole/slot	10/12			
Magnet material	Nd-Fe-B (Br : 1.27 T)			
No. of phase	3			
Winding connection	Y connection			
Steel material	S60			
Slot open (mm)	2			
Tooth width (mm)	6.8			
Stator dia. (mm)	86			
Rotor dia. (mm)	49.4	50		
Phase resistance (mΩ)	9.4	10.5		
Length (mm)	52	60		
Magnet width (mm)	13	12		
Pole Surface offset (mm)	10	0	10	10

Table 2 Analysis conditions for simulation

Item	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Input current (Arms)	100			
Input current pattern	Sinusoidal wave			
Input voltage (Vdc)	12			
Modulation ratio	0.95			
Control mode	With/Without field weakening control			
Current angle (β) range	0°~90°			

3.2 해석 결과 및 고찰

3.2.1 특성 파라미터 해석

Table 3은 모터의 특성을 평가하는 주요 파라미터인 코깅토크, 토크리플 및 역기전력 상수에 대한 해석 결과를 정리한 것이다. 그리고 전류 위상각(β)의 변화에 대한 L_d , L_q 평균값의 돌극비(Saliency Ratio)를 함께 표시하였다.

코깅토크는 표면자석형인 Type 1이 제일 작고 매입자석형인 Type 2가 가장 크다. 그리고 Type 3과 Type 4는 Type 2에 비해 현저히 작으나 Type 1에 비해서는 약간 큰 편이다. 코깅토크가 발생하는 이유는 공극과 영구자석내의 정자기 에너지의 변화에 의한 것이다.⁷⁾ Type 2의 경우 영구자석이 사각 블록 형태로 회전시 고정자 치(tooth)와의 거리변화가 Type 1에 비해 크기 때문에 그만큼 정자기 에너지의 변화가 커진다. Type 3과 Type 4의 경우는 정자기 에너지의 변화가 가장 큰 영구자석의 모서리 부분에서의 공극이 상대적으로 크기 때문에 자기 에너지의 전달이 감소한다.⁷⁾ 따라서 Type 2에 비해 코깅토크가 작다.

토크리플에서도 역시 Type 2가 가장 크게 나타난다. Type 2와 같은 일반적인 매입자석형 모터는 L_q/L_d 의 돌극비가 크다. 따라서 식 (2)에서와 같이 L_q , L_d 의 차이에 따른 릴럭턴스 토크가 증가하여 더 많

Table 3 Simulation result of characteristic parameter

Item	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Cogging torque (mNm)	11.6	277.8	43.8	43.2
Torque ripple (%) (@ Max. Torque)	2.5	5.9	1.9	2.4
Back EMF constant (Vrms/krpm)	3.18	3.34	3.10	3.24
Saliency ratio (L_q/L_d)	1.0	1.4	1.3	1.1

은 토크를 낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 전류가 증가하면 자로의 포화로 인해 q축 인덕턴스의 변동이 커지고 그만큼 릴럭턴스 토크의 변동도 커진다.⁹⁾ Type 3은 돌극비가 Type 2에 비해 작지 않지만 토크리플은 오히려 Type 1보다 작다. 이것은 코깅토크와 같이 자석의 모서리부에서의 공극 증가로 자속의 포화가 줄어든 만큼 L_q 의 변동 폭이 작아지기 때문이다. 즉, Type 3은 릴럭턴스 토크를 유지하면서도 릴럭턴스 토크에 의한 토크리플을 감소시키는 특성을 가진다. Type 4는 돌극비 및 토크리플에서도 Type 1과 특성이 거의 유사하다.

전동식 조향장치용 모터에서 가장 중요한 평가 요소가 토크리플로서 코깅토크 또한 토크리플에 작용하는 한 요소로 볼 수 있다. 그리고 돌극비 및 역기전력 상수는 모터의 출력에 관여하는 요소로 클수록 높은 성능을 나타낸다. 해석 결과를 비교해 볼 때 전체적으로 Type 3이 전동식 조향장치용 모터로서 가장 좋은 특성을 보이고 다음으로 Type 4와 Type 1 순으로 평가할 수 있다. Type 2의 경우 과도한 코깅토크와 토크리플이 다른 모델에 비해 2배 이상 크기 때문에 조향장치용으로는 적합지 않다.

3.2.2 토크-속도 특성 곡선 해석

Fig. 6은 해석 모델 및 해석 조건을 이용하여 모터의 특성 해석의 가장 기본이 되는 토크-속도 특성 곡선(T-N Curve)을 해석한 것이다. 특히, 자동차용 모터와 같이 전압 및 전류 제한이 있는 경우 토크-속도 특성곡선에 Fig. 6(a)에서 표시된 것과 같이 기저 속도점(Basic Speed Point)이 존재하는데 이것은 모터의 크기와 출력 특성을 결정짓는 중요한 요소가 된다. Table 4는 각각의 모터 타입에 대한 기저 속도점과 최대 출력점을 정리한 표이다.

토크-속도 특성곡선은 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크, 출력 토크, 철손 및 와전류 손실을 고려하여 산출되었고 약계자 제어(Field Weakening Control)가 적용되지 않았을 때의 특성도 함께 표시하였다.

Type 1에서는 표면자석형 모터의 전형적인 특성을 볼 수 있는데 약계자 제어를 릴럭턴스 토크가 거의 없어 출력 토크가 마그네틱 토크와 거의 일치한다. 그리고 최대 출력점이 기저 속도점 근방이고 상대적으로 마그네틱 토크가 크기 때문에 모터의 길

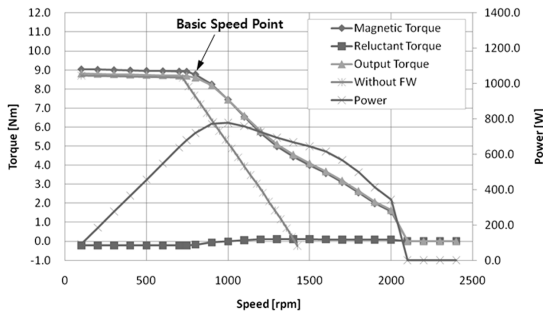
이를 줄일 수 있다. 기저 속도점에서의 동일 출력 토크를 기준으로 했을 때 Table 1에서의 설계 사양에 서와 같이 약 13%정도 길이를 줄일 수 있다. 그러나 약계자 제어를 하더라도 전압 제한에 따른 역기전력의 포화로 인해 모터 속도를 2000rpm 이상 올릴 수 없다. 또한 영구자석의 사용량이 많고 형상이 복잡할 뿐만 아니라 d축 자속에 따른 감자 영향이 크기 때문에 고사양의 자석을 사용해야한다. 따라서 모터 가격에서 영구자석이 차지하는 비중이 크다.

Type 2는 매입자석형 모터의 특징으로 마그네틱 토크에 부가되는 릴럭턴스 토크로 출력 토크가 증가하는 것을 잘 볼 수 있다. 그리고 약계자 제어를 역기전력에 의한 전압포화가 표면자석형보다 작아 모터 회전 속도를 2500rpm 이상 증대가 가능하다. 그러나 회전수가 증가할수록 손실이 커져 출력이 감소하기 때문에 최대 출력점이 Type 1보다 낮은 속도에서 생성되고 기저 속도점도 상대적으로 저속이다. 영구자석은 표면자석형보다 형상이 단순하고 감자영향이 작으므로 상대적으로 저급 사양의 자석을 사용할 수 있어 경제적이다.

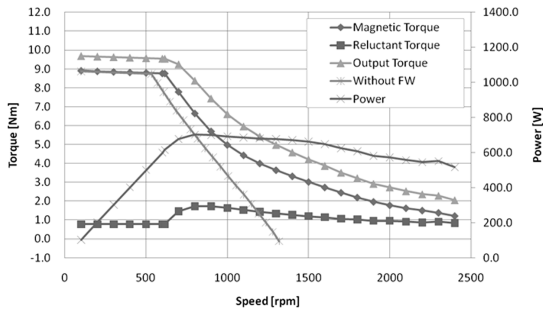
Type 3과 Type 4는 Type 2와 특성이 유사하나 회전자 자극면 편심(Offset)의 영향에 따라 기저 속도점에서의 토크는 감소하고 속도는 증가하는 경향을 보인다. 최대 출력점은 Type 3과 Type 4는 거의 같고 철손 및 와전류 손실이 Type 2보다 작기 때문에 상대적으로 높은 속도 영역에서 생성된다. 특히 Type 4는 표면자석형 모터와 매입자석형 모터의 중간 특성을 보여주고 있다. 즉 기저속도점 이하에서는 릴럭턴스 토크가 거의 없고 기저속도점 이상에서의 릴럭턴스 토크도 그 크기가 Type 2와 Type 3에 비해 현저히 작다. 그러나 상대적으로 마그네틱 토크가 높기 때문에 최종 출력은 Type 3과 거의 유사하다.

약계자 제어에 따른 모터 출력을 비교해보면 Type 1이 기저 속도점에서의 출력이 가장 높지만 속도가 높아질수록 급격히 출력이 감소한다. 그러나 Type 2, Type 3, Type 4는 기저 속도점에서의 출력이 상대적으로 Type 1에 비해 낮지만 속도 증가에 따른 출력감소가 현저히 작다. 특히 Type 3의 경우는 고속 영역에서도 거의 동일한 출력을 유지한다.

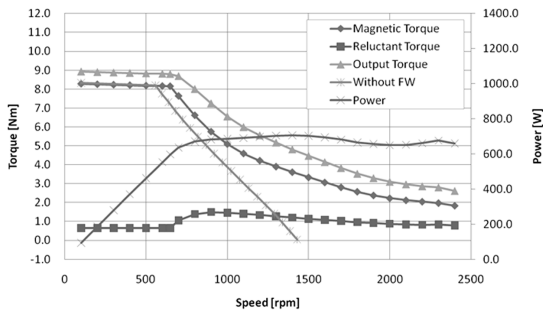
전동식 조향장치용 영구자석형 브러시리스 모터의 타입별 특성 비교



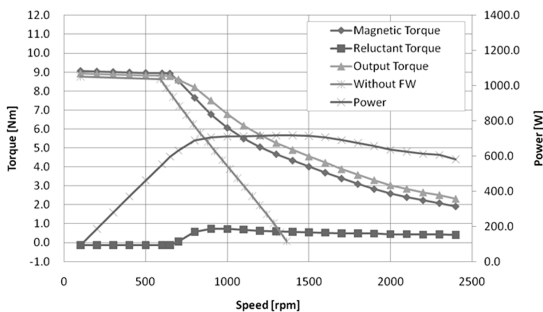
(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3



(d) Type 4

Fig. 6 T-N characteristic simulation result

Table 4 Specific point at the T-N characteristic curve

Item		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Basic speed point	Torque (Nm)	8.7	9.5	8.8	8.8
	Speed (rpm)	746	615	648	648
Max. output point	Power (W)	779	702	706	718
	Torque (Nm)	7.4	8.4	4.8	4.9
	Speed (rpm)	1000	800	1400	1400

4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자동차 배터리와 같은 저전압원에서는 영구자석의 쇠교자속이 큰 표면자석형 모터(Type 1)의 최대 토크가 매입자석형 모터(Type 2)의 것보다 크다.
- 2) 코깅토크는 표면자석형 모터(Type 1)가 가장 작고 토크리플은 자극면 편심 매입자석형 모터(Type 3)가 가장 작다.
- 3) 자극면 편심 매입자석형 모터(Type 3)는 일반 매입자석형 모터(Type 2)의 릴럭턴스 토크 및 제어 특성을 유지하면서 약점인 코깅토크와 토크리플을 표면자석형 모터 수준으로 줄일 수 있기 때문에 전동식 조향장치용 모터로 가장 적합한 형태이다.
- 4) 비돌극 편심형 매입자석 모터(Type 4)의 전체적인 출력 특성은 자극면 편심 매입자석형(Type3)과 유사하나 자석 형상 및 배치가 상대적으로 불리하다.
- 5) 표면자석형 모터(Type 1)는 역기전력 포화에 따른 운전가능 영역 및 출력감소가 크기 때문에 고출력 조향장치용 모터에는 운전영역이 넓고 속도에 따른 출력감소가 작은 매입자석형 모터들(Type 2, Type 3, Type 4)이 더 적합하다.

References

- 1) B. W. Kim and J. Hur, "A Study on Development of Electric Motor for High Voltage Automotive System," Journal of KSPE, Vol.25, No.2, pp.80-95, 2008.
- 2) T. Kim and O. Vodyakho, "Brushless PM Machine Drive in Electric and Hybrid Electric Vehicle Based on the Space Vector Current

- Control,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.10, No.6, pp.711-717, 2009.
- 3) G. H. Lee, S. I. Kim, J. P. Hong and J. H. Bahn “Torque Ripple Reduction of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Harmonic Injected Current,” *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.44, No.6, pp.1582-1585, 2008.
 - 4) H. Murakami, H. Kataoka, Y. Honda, S. Morimoto and Y. Takeda, “Highly Efficient Brushless Motor Design for an Air-conditioner of the Next Generation 42V Vehicle,” *Industry Applications Conference, 36th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE*, Vol.1, pp.461-466, 2001.
 - 5) H. Murakami, Y. Honda, H. Kiriyaama, S. Morimoto and Y. Takeda, “The Performance Comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in Use as Air-conditioning Compressor,” *Proceeding of IEEE Industry Application Conference*, Vol.2, No.11, pp.840-845, 1999.
 - 6) S. M. Hwang, “Design Techniques for Reduction of Cogging Torque in Brushless DC Motors Used for Electric Power Steering,” *Transactions of KSAE*, Vol.6, No.3, pp.106-114, 1998.
 - 7) S. M. Hwang, “Sensitivity Analysis of Design Parameters for Reduction of Cogging Torque in Brushless DC Motors Used for Automobile Part,” *Transactions of KSAE*, Vol.6, No.2, pp.235-243, 1998.
 - 8) N. Matsui, Y. Takeda, S. Morimoto and Y. Honda, *Design and Control of IPMSM*, Interscience Publication, Korea, pp.5-9, 12-48, 114-117, 2007.
 - 9) G. C. Kim, *A Study on the Optimal Design and Control Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV/HEV*, Ph.D. Dissertation, Hanyang University, Seoul, Korea, pp.79-94, 133-154, 2008.
 - 10) *Maxwell/Simplorer Tips & Solutions Seminar*, Ansoft Korea, pp.71-127, 2008.
 - 11) G. Ombach, J. Junak and H. Steegmüller, *Permanent Magnet Synchronous Motor and Electric Power Assisted Steering System*, International Patent, No. WO2010/028639-A1, 2010.