

위성 구동기용 BLDC Motor 자석 형태 및 배치에 따른 성능

이정형[†] · 이준용 · 이헌조 · 오화석

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Effects of Permanent Magnet Configuration on the Performance of the BLDC Motor in a Satellite Actuator

Jung-Hyung Lee , Jun Yong Lee, Hun Jo Lee and Hwa-Suk Oh

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

The torque ripple that is generated by the irregularity of magnetic flux density on the BLDC motor in a satellite actuator degrades the satellite attitude control performance. In this paper, the performance analysis of permanent magnet configurations (shape, arrangement, and air gap) is simulated by the Finite Element Method (FEM) to find the appropriate combination of the configuration. The configuration is chosen by comparing between rectangular and arc-shaped permanent magnets and single-arrangement and dual-arrangement magnets. The performance is verified by a prototype.

초 록

위성의 자세제어 구동기에 사용되는 직접구동 모터(BLDC Motor)의 영구자석 자속밀도 분포 불균일은 위성 토크 리플을 발생시켜 자세에 지대한 영향을 미친다. 본 논문은 이러한 토크 리플을 줄이기 위해 영구자석의 형상, 배치, 공극에 따른 자속밀도를 이론과 유한요소법 시뮬레이션을 통하여 분석하고 가장 적합한 자석 형상조합을 찾고자 한다. 사각형과 아치형, 단일 자석 배치와 듀얼자석 배치형상의 자속밀도 성능비교를 통해 최적의 자석 배치형상을 구하였으며, 이의 검증을 위해 시제품 모터(Prototype Motor) 제작을 통하여 성능을 검증하였다.

Key Words : Coreless BLDC Motor(코어리스 직접구동 모터), Torque Ripple(토크 리플), Permanent Magnet(영구자석), Magnetic Flux Density(자속밀도)

1. 서 론

용량 대비 고토크 발생이 가능한 제어모멘트자이로(CMG, Control Moment Gyro)는 위성 구동기로 많이 쓰이고 있는 추세인데, CMG의 구성요소인 Gimbal Motor는 대부분 직접구동 모터(BLDC Motor)를 사용하고, CMG에서 원하는 토크를 생성하기 위해 Gimbal Motor의 저속, 고정밀 제어가 필요하다.

모터를 정밀제어하기 위해서는 토크 리플 저감이 필수적이다. 특히 코어리스 직접구동 모터는 일반적인 모터에서 발생하는 백래시, 코어의 코깅이 존재하지 않지만 베어링 불균형, 상전류 오차, 영구자석 불균일 등의 요인에 의해 토크 리플이 발생하고 이러한 영향을 저감할 필요가 있다[1].

영구자석의 자속밀도 불균일에 의해 발생하는 토크 리플 저감 연구 중 Ronghai Qu와 Thomas A. Lipo는 Dual Rotor에 부착된 영구자석 너비를 변화시켜 토크 리플 영향을 줄이는 형상을 분석하였고[2], YUKIO HONDA는 synchronous motor의 Dual Layer 영구자석 배치 종류에 따른 토크 리플 영향을 분석하였고

Received: Dec. 18, 2017 Revised: Mar. 27, 2018 Accepted: Mar. 30, 2018

† Jung-Hyung Lee

Tel: +82-10-2414-0824, E-mail: jhlee@kau.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

[3], Nekkhalapu Sameer는 dual rotor의 영구자석의 자기장 방향의 조합에 따른 토크 리플 영향을 분석하였다[4].

본 논문에서는 토크 리플에 영향을 미치는 모터 영구자석의 형상, 배치, 공극에 따른 자속밀도를 분석하여 코어리스 직접구동 모터에 적합한 조합을 찾고 이를 시제품 모터(Prototype Motor)를 통해 검증하였다.

2. 모터 구동원리

2.1 모터 토크 및 역기전력 발생

일반적인 직접구동 모터의 구동은 아래 식과 같은 움직이는 전하가 자기장 내에 있을 때 받는 힘(로렌츠의 힘의 법칙; Lorentz force law)으로 설명된다[5].

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

q 전하, \vec{v} 전하의 이동 속도, \vec{B} 자속밀도이다. 이와 같은 구조의 모터를 전기적인 등가회로로 나타내고 입력전압 V , 코일 인덕턴스 L , 입력전류 i , 코일 저항 R 일 때 이 회로의 전기적인 등가방정식은 식은 다음과 같다.

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri + e \quad (2)$$

모터에 Loop 형태로 이루어진 권선은 자속이 Rotor의 각에 따라 역기전력이 발생하게 되는데 이것은 페러데이의 전자기 유도 법칙(Faraday's law)에 따른다. 즉, 자속 ϕ 의 시간적인 변화는 역기전력 e 를 형성한다는 것을 알 수 있다.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

또한 길이 l 인 1개의 권선이 자속밀도 B 에서 v 속도로 움직일 때 역기전력 e_1 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_1 &= -\oint (v \times B) \cdot dl = Blv \cos \theta \\ &= \left(\frac{\phi}{A} \right) l v \cos \theta = \left(\frac{\phi P}{2\pi l r} \right) l v \cos \theta = \left(\frac{\phi P}{2\pi} \right) \omega_r \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

자속밀도에 영향을 받는 권선의 면적 A , 자속과 권선면 사이의 각 θ , 휠 반지름 r , 휠 회전속도 ω_r , 극수 P 이다. 슬롯이 조밀하게 구성되어 있다고 가정하고 Z 를 슬롯 당 도체 수라 가정할 때 총 역기전력은 다음과 같다.

$$e = \frac{Z}{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e_1 d\theta = \left(\frac{Z\phi P}{2\pi n} \right) \omega_r = K_E \omega_r \quad (5)$$

K_E 는 기전력 상수이고, 이 권선에 의한 토크와 총 토크는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_1 &= F r \\ &= (qBv \cos \theta) r = (Bli) r \cos \theta = \left(\frac{\phi P}{2\pi} \right) i \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

$$T = \frac{Z}{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_1 d\theta = \left(\frac{Z\phi P}{2\pi n} \right) i = K_T i \quad (7)$$

K_T 는 토크 상수이다. 따라서 Eq. 2의 등가방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri + K_E \omega_r \quad (8)$$

정상상태를 가정하면 모터 회전속도는 다음과 같다.

$$\omega_r = \frac{V}{K_E} - \left(\frac{R}{K_E K_T} \right) T \quad (9)$$

위 식과 같이 영구자석이 균일한 자속밀도 형상을 가지게 되면 모터의 회전에 역기전력이 변하지 않게 된다. 하지만 영구자석이 불균일한 자속(ϕ) 형상을 가지게 되면 Eq. 5에 의해 기전력 상수(K_E)가 불균일해져 역기전력(e)이 불균일해지고 결과적으로 Eq. 9에 의해 회전속도(ω_r)의 안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서 영구자석 배치에 따른 자속밀도를 분석하여 직접구동 모터에 적합한 자속밀도 형상을 찾아 모터 회전속도 안정성을 향상시킬 수 있다.

2.2 영구자석 배치에 따른 자속밀도 분석

이상적인 직접구동 모터의 영구자석 자속밀도 형상은 N/S극 별로 일정한 크기로 이루어져 있다. 하지만 실제 직접구동 모터 영구자석의 경우 자석의 착자 방향, 형상, 배치 등에 따라 다른 자속밀도 분포를 갖는다.

본 논문에서는 직접구동 모터의 자속밀도 형상에 가장 적합한 영구자석 형상, 배치, 공극을 갖기 위해 동일한 회전자 형상에 두 종류의 영구자석 형상(아치형, 사각형), 두 종류의 영구자석 배치(Single layer, Double layer), 자석과 코일 사이의 공극(3mm, 6mm)을 종류별로 조합하였을 때 자속밀도 형상을 분석하였

다. 직접구동 모터에 적합한 자속밀도 분포를 찾기 위한 기준 성능으로 Flatness FL 를 다음과 같이 정의하였다.

$$B_{ref} = |\vec{B}(7.5deg)|$$

$$FL = \frac{|B_{ref} - |\vec{B}||}{B_{ref}} \times 100 \text{ @ first pole} \quad (10)$$

Figure 1과 같이 첫 번째 pole에 대하여 FL_5 에 해당하는 각도 θ_{FL_5} , 표준편차 σ_{FL_5} 값을 성능 지표로 하였다. 시뮬레이션은 유한요소 해석 프로그램인 Ansoft사의 Maxwell을 이용하였다.

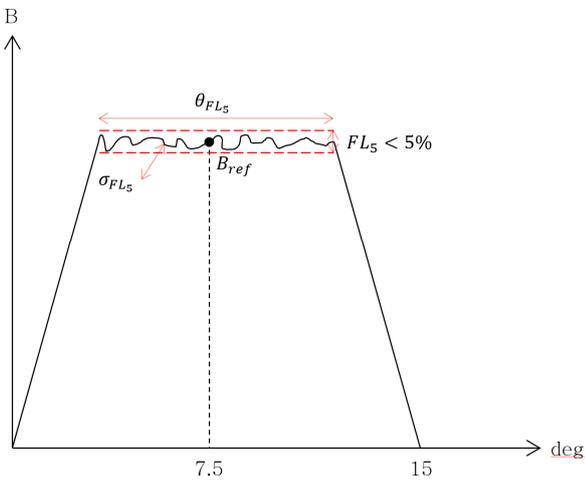


Fig. 1 Performance Indexes

Table 1 Simulation Parameters

Parameters	Value
Wheel Dimension	D300 mm * H80 mm
Magnet	24 poles, Neodymium
Cases	Case 1 사각형 자석, 공극 3 mm, 5T vs 3T2T
	Case 2 아치형 자석, 공극 3 mm, 5T vs 3T2T
	Case 3 아치형 자석, 공극 3&6 mm, 5T&3T2T

Table 2 Magnetic flux density Flatness, Case 1

	FL	
	θ_{FL_5} (%)	σ_{FL_5}
5T	10.4 deg (69 %)	80.6 G
3T2T	10.3 deg (69 %)	57.2 G

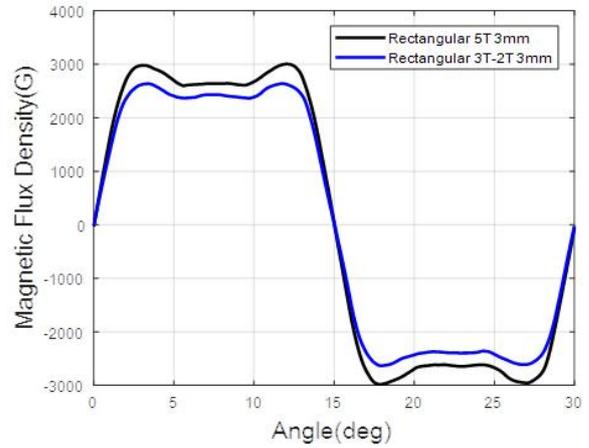
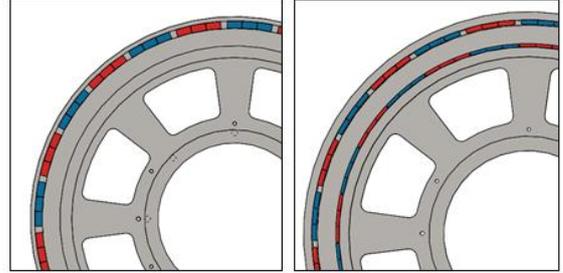
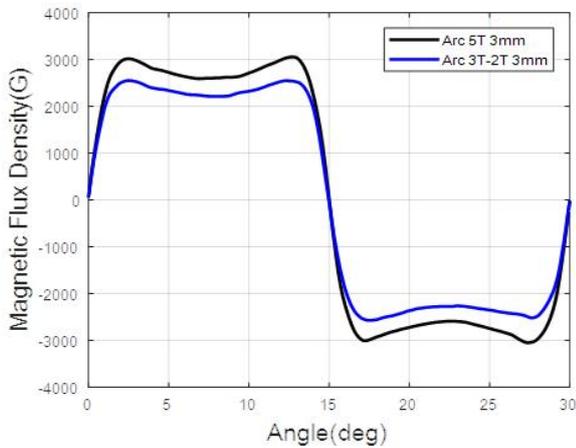
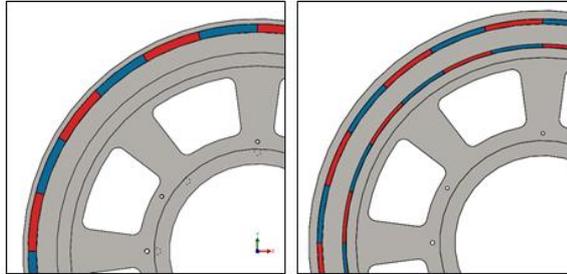


Fig. 2 Simulation Results, Case 1

Case 1의 결과를 보면, 사각형 자석의 배치에 따른 자속밀도(Magnetic Flux Density) 차이를 보여준다. 5T와 3T2T 모두 비슷한 Flatness를 보인다. 5T와 3T2T 모두 작은 크기의 사각형 자석을 이어붙인 것이기 때문에 자석 사이의 연결부위의 불균일성, 원으로 되어있는 Wheel의 형상과의 오차 등의 이유로 일정 크기 이상의 자속밀도 구간에서의 σ_{FL_5} 값이 큰 것을 볼 수 있고, 특히 5T의 경우 자석의 극이 바뀌는 경계 부분에서 자속밀도가 커지기 때문에 편차가 더 크게 나타난다.

Table 3 Magnetic flux density Flatness, Case 2

	FL	
	θ_{FL_0} (%)	σ_{FL_0}
5T	11.5 deg (77 %)	93.0 G
3T2T	11.3 deg (75 %)	69.5 G

**Fig. 3** Simulation Results, Case 2

먼저 Case 1과 Case 2는 자석의 형상에 따른 자속 밀도 차이를 보여준다. 아치형 자석이 사각형 자석의 자속 밀도보다 완만하게 변하고, σ_{FL_0} 보다 더 작다. 아치형 자석의 곡률이 Wheel의 반경 곡률과 동일하기 때문에 동일한 공극에서 일정 크기 이상의 자속 밀도가 비교적 균일하게 나타난다.

Case 2에서는 아치형 자석의 배치에 따른 자속 밀도 차이를 보여준다. 5T는 3T2T보다 Flatness 구간에서 자속 밀도 크기가 크다. 같은 종류의 자석이지만 두께가 증가했기 때문에 자석과 가까운 공극 위치에서의 자속 밀도 크기가 커지기 때문이다. 또한 5T는 3T2T보다 σ_{FL_0} 가 더 큰 것을 볼 수 있는데, 5T의 경우 자석의 극이 바뀌는 경계부분에서 자속 밀도가 크지만 3T2T의 경우 2T의 자석이 이러한 현상을 상쇄해 주기 때문이다.

Case 3에서는 공극 거리에 따른 아치형 자석의 자속 밀도 차이를 보여준다. 5T, 3T2T 모두 공극 3 mm는 6 mm보다 σ_{FL_0} 가 더 큰 것을 볼 수 있다. 공극이 자석에 가까울수록 자석 사이의 극이 변하는 연결부위에서의 자속 밀도 영향이 더 크기 때문이다. 하지만 공극 6 mm가 자석에서 더 멀기 때문에 자속 밀도 크기는 줄어들게 된다. 따라서 자속 밀도에 의한 토크 리플 영향을 줄이기 위해서는 공극을 3 mm보다 크게 할수록 Flatness 성능이 향상됨을 알 수 있다. 또한 공극 6 mm에서 5T와 3T2T의 Flatness는 거의 비슷하지만 공극이 비교적 5T 자석에서 거리가 멀기 때문에 2T가 3T에서 나오는 자속을 이어주는 역할을 하는 3T2T의 자속 밀도 크기가 더 크다.

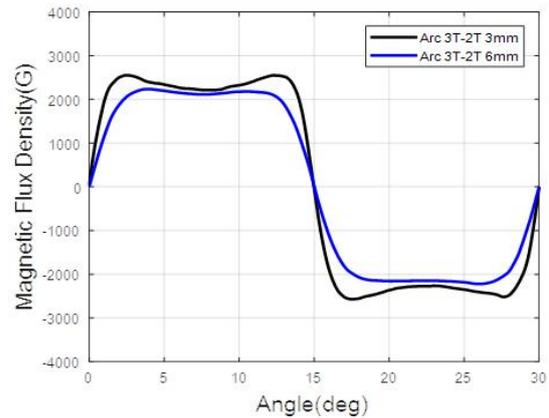
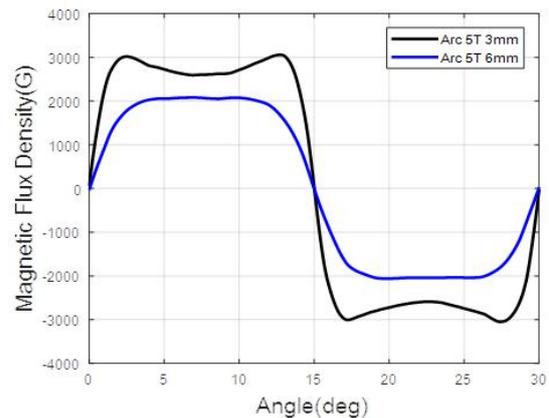
**Fig. 4** Simulation Results, Case 3

Table 4 Magnetic flux density Flatness, Case 3

(5T)	FL	
	$\theta_{FL_5}(\%)$	σ_{FL_5}
3 mm	11.5 deg (77 %)	93.0 G
6 mm	8.1 deg (54 %)	15.2 G
(3T2T)	FL	
	$\theta_{FL_5}(\%)$	σ_{FL_5}
3 mm	11.3 deg (75 %)	69.5 G
6 mm	9.5 deg (63 %)	20.7 G

3. 시제품 모터(Prototype Motor) 통한 검증

3.1 시제품 모터(Prototype Motor)

시뮬레이션을 통해 영구자석 형상, 배치, 공극을 비교/선택한 결과를 검증하기 위해 위성 구동기 CMG의 Gimbal Motor 시제품(Prototype)을 제작하였다. CMG는 Momentum Wheel Assembly(MWA)와 Gimbal Motor로 구성되어있고, Gimbal Motor의 회전으로 고속으로 회전하는 MWA의 각운동량 방향을 변화시켜주기 때문에 MWA의 용량을 고려하여 Fig. 5~7과같이 제작하였다.

Case 1, 2, 3을 통해서 Flatness 성능이 우수한 아치형 자석을 선정하였고, σ_{FL_5} 가 작은 공극 6 mm로 선정하였다. 같은 공극에서 영구자석 5T와 3T2T의 자속밀도 형상을 비교하기 위해 Fig. 6과 같이 5T와 3T2T자석을 부착한 휠을 제작하였고 Table 5와 같은 성능으로 제작하였다.

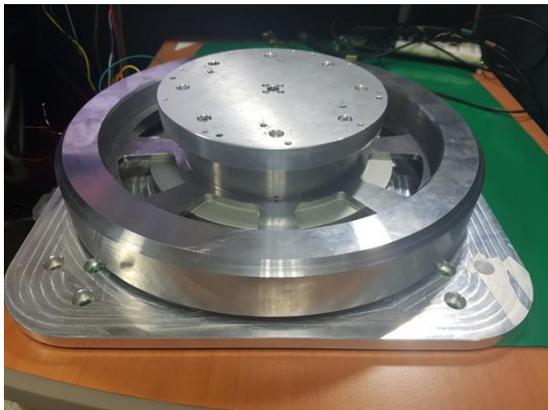


Fig. 5 Prototype Motor



Fig. 6 Prototype Motor Wheel (5T & 3T2T Magnet)

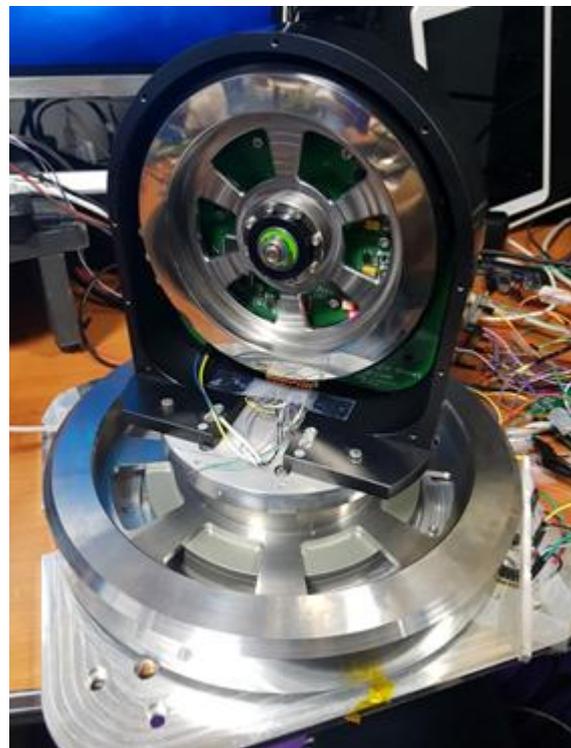
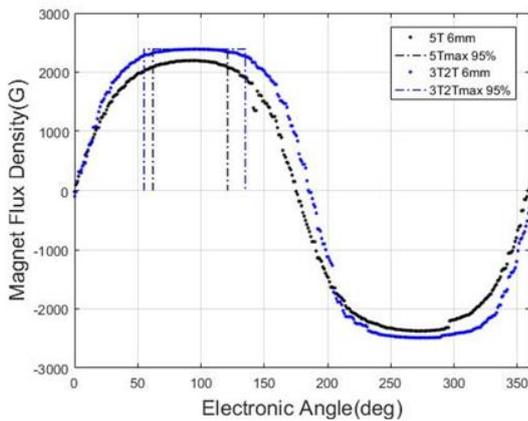


Fig. 7 Integration of MWA & Gimbal Motor

Table 5 Measurement Parameters

Parameters	Value
Wheel Dimension	D300 mm * H80 mm
Magnet	24 poles, Neodymium
Measurement	Air gap 6 mm, 5T&3T2T

시제품 모터를 통한 자속밀도를 측정한 결과는 Fig. 8, Table 6과 같다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 3T2T의 자속밀도 크기가 더 크게 측정되었고, Flatness Angle 크기도 크다. 하지만 시뮬레이션 상 영구자석 결과에 비해 실제 영구자석의 착자 상태, 제작상의 오차, 측정 거리의 오차 등의 요인이 있기 때문에 시뮬레이션 상의 θ_{FL_5} , σ_{FL_5} 결과보다 실제 측정 결과 값 성능이 나쁜 것을 볼 수 있다.

**Fig. 8** Prototype Motor Magnetic flux density Results**Table 6** Prototype Motor Magnetic flux density Flatness, Case 3

(6 mm)	FL	
	θ_{FL_5} (%)	σ_{FL_5}
5T	4.9 deg (33 %)	49.8 G
3T2T	6.7 deg (45 %)	45.7 G

4. 결 론

위성 구동기용 직접구동 모터 영구자석에 가장 적합한 형상, 배치, 공극을 갖기 위해 동일한 회전자에 적

절한 영구자석 형상, 배치, 공극위치를 시뮬레이션과 측정을 통하여 비교/분석 하였다. 그 결과 회전자 곡률과 동일한 아치형 자석을 회전자 외륜과 내륜에 적절하게 분포 배치하고, 공극 위치를 자석에 편향되지 않게 배치한 듀얼모드 형상의 자석 형상이 직접구동 모터에 가장 적합한 120도 평평한 자속밀도 분포를 갖게 된다. 이를 통해 자속밀도의 분석을 통해 균질한 형상의 자석 배치를 통하여 우주용 구동기 CMG의 Gimbal Motor 개발에 참고가 될 수 있다.

후 기

본 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행된 과제번호 UD150046CD 순수기초연구과제 “우주용 저속 직접 구동모터 및 구동기 적용 기반기술연구” 과제의 일환으로 수행 되었습니다.

References

- [1] Junyong Lee, Hunjo Lee, Jichul Kim, Hwasuk Oh, “Analysis of Magnetic Field by Permanent Magnets Arrangement of Rotor for a Coreless BLDC Motor”, 2017 SASE Spring Conference, Apr. 2017
- [2] Ronghai Qu, Thomas A. Lipo. “Dual-Rotor, Radial-Flux, Toroidally-Wound, Permanent-Magnet Machines,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 39, no. 6, 24 Nov. 2003
- [3] YUKIO HONDA, SHIZUKA YOKOTE, and TOSHIRO HIGAKI, “Magnet Design and Motor Performances of a Double-Layer Interior Permanent Magnet Synchronous Motor,” *Electrical Engineering in Japan*, vol. 128, no. 1, 1999
- [4] Nekkhalpu Sameer, S.A.Prashanth, Ankit Dalal, Praveen Kumar, “Design and Optimization of Dual Rotor Motor for Electric Vehicle Application,” PEDES, 2014 IEEE International Conference, Dec. 2014
- [5] Boldea and S. A. Nasar, *Linear Motion Electromagnetic Systems*. John Wiley and Sons, 1985.