

Rapid #: -25689953

CROSS REF ID: **19144203800005671**

LENDER: **BNG (Binghamton University) :: Main Library**

BORROWER: **LT1 (University of Technology Sydney) :: Blake Library**

TYPE: Article CC:CCG

JOURNAL TITLE: Jeon'gi haghoe nonmunji

USER JOURNAL TITLE: The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers

ARTICLE TITLE: A Study on the Performance of Bearingless PMSM Based on Rotor Permanent Magnet Arrangement

ARTICLE AUTHOR: Noh, Min-Soo

VOLUME: 74

ISSUE: 4

MONTH:

YEAR: 2025

PAGES: 739 - 746

ISSN: 1975-8359

OCLC #:

Processed by RapidX: 11/21/2025 1:36:05 PM

This material may be protected by copyright law (Title 17 U.S. Code)

A Study on the Performance of Bearingless PMSM Based on Rotor Permanent Magnet Arrangement

회전자 영구자석 착자 배열에 따른 베어링리스 PMSM의 성능에 관한 연구

Min-Soo Noh . Dong-Hyeon Kim . Youguang Guo . Ho-Joon Lee

노민수* . 김동현** . Youguang Guo*** . 이호준†

Abstract

Magnetic bearing motors are in high demand due to their ability to operate in special environments without mechanical friction and lubrication, effectively avoiding wear and contamination. To overcome the complexity and maximum speed limitations, bearingless PMSMs (Permanent Magnet Synchronous Motors) have been developed. This study explains the electromagnetic driving principles of bearingless PMSMs based on generation conditions and the components of suspension forces. Furthermore, the permanent magnets arranged on the rotor are designed to alter the magnetic flux distribution using various magnetization patterns. FEA(Finite Element Analysis) was conducted for each model, and the derived results were compared and analyzed. This study investigates the performance of bearingless PMSMs based on different rotor permanent magnet arrangements, and draws a comprehensive conclusion.

Key Words

Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor, Finite Element Analysis, Permanent Magnet array, Active Magnetic Bearings

1. 서론

국내 제조업의 전력 수요는 2020년대 50만 GW로 계속해서 증가하고 있다. 이러한 전기기기의 산업 내 전력 사용량 증가로 인해 에너지 정책의 중요성 또한 커지고 있다[1]. 에너지 효율 개선 정책에서 고효율의 전동기 개발은 중요한 과제이다. 그 중 영구자석 동기전동기(PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor)는 높은 효율, 높은 출력밀도로 인해 다양한 산업에서 폭넓게 활용되고 있다. 희토류 자석을 사용하는 전동기로 영구 자석을 이용해 비용 절감과 성능 개선이 중요한 연구 과제로 자리잡고 있다[2]. 주로 반도체 공정이나 의료산업 분야에 적용되고 있는 영구자석 동기전동기는 기계식 베어링으로 인한 마모, 오염 등의 문제도 가지고 있다. 베어링은 전동기가 구동할 때 기계적 마찰과 윤활유의 사용으로 인해 마모와 오염이 발생할 수 있다. 이를 위해 기계적 마찰이 없는 자기 베어링 전동기가 사용될 수 있다. 영구자석 동기전동기에 기존의 기계식 베어링을 대신해 샤프트를 부양할 수 있는 전자기력을 이용한다. 이 부양력을 서스펜션 힘(Suspension

force)이라 한다. 서스펜션 힘에 의한 자기 베어링은 구동 시 오염, 마모로 인한 문제점을 해결할 수 있다. 주로 에너지 저장 시스템, 정밀 기기, 의료 장비에 사용되고 있다[3]. 하지만 이는 구조가 복잡하고 공간적 제약, 성능 등 다양한 문제를 해결하기 위해 베어링리스 PMSM이 개발되었다. 자기 베어링 전동기에 비해 공간적 활용도가 높고 영구자석 동기전동기를 사용하여 높은 효율과 출력 밀도를 그대로 유지될 수 있다. 베어링리스 PMSM의 자기 베어링 전동기의 응용 분야와 동일, 주로 공작기계, 원심 펌프, 인공심장 펌프, 터보 펌프, 블로워, 플라이휠 에너지저장 장치에 사용된다. 하지만 제작 비용이 높고 위치 피드백을 통한 제어가 복잡하며 기계식 베어링에 비해 부하가 적어야 한다는 단점이 있어 응용 분야가 제한되어 있다[4-6].

본 논문에서는 고정자 슬롯에 토크 권선과 서스펜션 권선을 감은 베어링리스 PMSM을 설계하였으며 고정자 서스펜션 권선과 회전자 영구자석에 의해 생성되는 서스펜션 힘에 대해 설명하였다. 전자석을 이용해 힘을 제어하는 능동형 자기 베어링(AMB : Active Magnetic Bearings)의 원리이다. 또한 희토

† Corresponding Author : Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University, Republic of Korea.

E-mail : hjlee81@dankook.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-4590-7832>

* Dept. of Electrical & Control Engineering, Cheonju University, Republic of Korea.
<https://orcid.org/0009-0004-5280-9108>

** Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Republic of Korea.
<https://orcid.org/0009-0007-8236-5976>

*** School of Electrical and Data Engineering, University of Technology Sydney, Australia.
<https://orcid.org/0000-0001-6182-0684>

Received : Jan. 03, 2025 Revised : Feb. 28, 2025 Accepted : Mar. 11, 2025

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

류 자석을 사용하는 PMSM이 능동형 자기 베어링과 결합했을 때 영구자석의 자화 방향이 미치는 영향을 확인하기 위해 베어링리스 PMSM의 회전자 영구자석에 대해 다양한 착자 배열을 적용하여 성능에 대한 비교 분석을 진행하였다. 극 수, 크기 등 동일한 조건에서 유한요소해석(FEA : Finite Element Analysis)을 진행하였다.

2. 베어링리스 PMSM 구동 원리

2.1 기본 구조

그림 1은 샤프트가 있는 (a) 자기 베어링 전동기와 (b) 베어링리스 PMSM에 대한 기본 구조이다. 샤프트를 마찰 없이 부양시키기 위해 영구자석 동기전동기의 양 옆에는 능동형 자기 베어링 구조물이 설치된다. 베어링리스 PMSM은 영구자석 동기전동기의 고정자 슬롯에 토크 권선과 서스펜션 권선이 감겨져 있다. 베어링리스 PMSM은 영구자석 동기전동기와 능동형 자기 베어링 원리가 통합되어 있어 토크 힘과 서스펜션 힘을 동시에 생성할 수 있다[6].

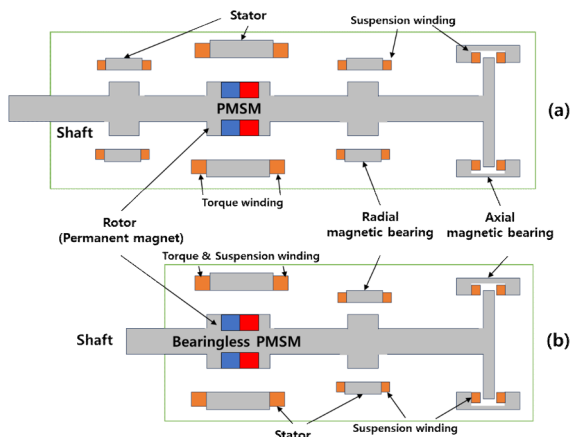


그림 1 자기 베어링 전동기와 베어링리스 PMSM의 기본 구조
Fig. 1 Basic structure of magnetic bearing motor and bearingless motor

2.2 생성 조건

고정자 슬롯에 감겨져 있는 서스펜션 권선 전류와 영구자석 자기장의 상호작용으로 서스펜션 힘이 생성된다. 이를 이용해 회전자를 부양하여 구동 시 물리적인 마찰이 없는 자기 부상 형태를 띤다. 고정자에는 토크 권선과 서스펜션 권선이 동일한 슬롯에 감겨져 있고 각각의 힘은 전자기적 간섭 없이 동시에 생성되기 때문에 극 쌍수를 다르게 설계하여 두 힘을 생성할 수 있다.

그림 2는 영구자석 동기전동기의 고정자 슬롯에 감겨져 있는 한 상의 토크 권선과 회전자 영구자석을 나타냈다. 토크 권선과 영구자석의 극 쌍수 2, 극 수 4로 동일하다. (a)의 토크 권선에 임의의 전류를 인가한 상태에서 (b)의 영구자석과 결합한 자기장은 동일한 극 수를 가지며 대칭적으로 분포된다.

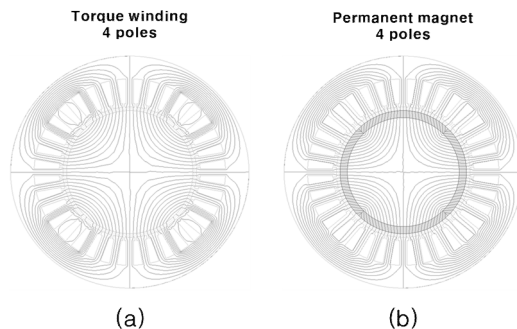


그림 2 토크 권선과 영구자석의 자속 선도
Fig. 2 Torque winding and permanent magnet magnetic flux line

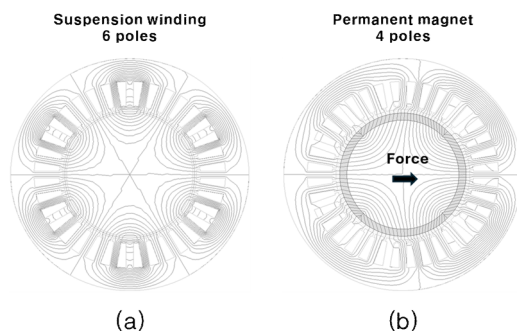


그림 3 서스펜션 권선과 영구자석의 자속 선도
Fig. 3 Suspension winding and permanent magnet magnetic flux line

그림 3은 베어링리스 PMSM의 고정자 슬롯에 감겨져 있는 한 상의 서스펜션 권선과 회전자 영구자석을 나타냈으며 자기장 분포 비교를 위해 토크 권선은 제외하였다. 그림에서의 서스펜션 권선 극 쌍수는 3이며 영구자석 극 쌍수는 2이다. (a)의 서스펜션에 임의의 전류를 인가한 상태에서 (b)의 영구자석과 결합하면 자기장은 영구자석 극 수와 동일한 분포를 갖지만 서스펜션 권선의 전류 방향에 따라 한쪽 방향의 자기력이 세지는 비대칭 분포를 가진다.

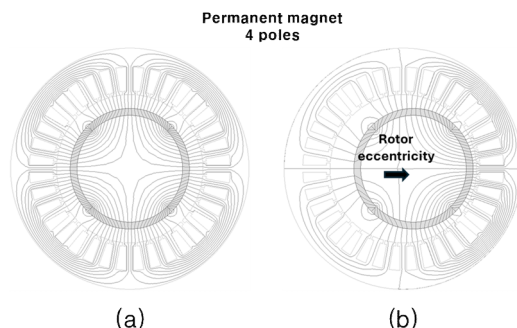


그림 4 회전자 영구자석의 편심에 따른 자속 선도
Fig. 4 Magnetic flux line according to the eccentricity of the rotor permanent magnet

그림 4는 영구자석 동기전동기의 회전자 편심이 있는 임의의 상태 자기장 분포를 나타냈다. 고정자와 회전자 사이 공극

길이는 (a)는 모든 방향에서 동일한 상태이며 (b)는 회전자 편심이 발생해 한 쪽의 공극 길이가 감소한 상태이다. 공극 길이가 좁아지면 자속은 밀집하게 되는데 자속 밀도가 증가할수록 자기장이 세진다. 따라서 x축 양의 방향 공극에서 자속 밀도 증가로 인해 자기장 세기가 세지며 반대 방향 공극은 자속 밀도 감소로 인해 자기장 세기가 약해진다. 자기장 세기가 강한 영역으로 회전자는 당겨지는 인력을 받는다. 자기장 불균형에 의한 힘이며 공극에서의 자기장 세기 차이로 인해 생성된다. 베어링리스 PMSM은 이러한 원리로 그림 3에서 서스펜션 권선 자기장과 극 쌍수가 다른 영구자석 자기장이 중첩되며 자기장 불균형을 생성한다. 이는 능동형 자기 베어링과 관련된 힘이다[4-5].

베어링리스 PMSM은 서스펜션 힘을 생성하기 위한 두 가지 조건을 바탕으로 설계한다. 회전자 영구자석의 극 쌍수와 고정자 서스펜션 권선의 극 쌍수가 서로 다른 연속적 값을 가져야 한다. 고정자 서스펜션 권선에 의해 생성된 자기장의 전류 주파수는 회전자 영구자석의 자기장 회전 속도와 동기화되어야 한다. 따라서 베어링리스 PMSM의 극 쌍수와 전류 주파수에 기반한 설계 조건은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\begin{cases} P_M = P_S \pm 1 \\ P_M \omega_M = P_S \omega_S \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_M 은 회전자 영구자석 극 쌍수, P_S 는 고정자 서스펜션 권선 극 쌍수, ω_M 은 회전자 영구자석 기계 각속도, ω_S 는 고정자 서스펜션 권선 기계 각속도이다. 연속적이지만 다른 극 쌍수를 가지는 베어링리스 PMSM은 서스펜션 권선과 영구자석 자기장 사이 위상 차이가 존재한다. 따라서 위상 차이를 이용해 회전 시 불균형 자기장을 공극 영역에 안정적으로 생성한다[4-5].

2.3 서스펜션 힘

회전자를 부양하는 서스펜션 힘은 두 방식으로 구분된다. 수동(Passive) 방식은 주로 영구자석을 사용하며 자연스럽게 발생하는 자기장이나 물리적인 특성을 이용해 능동적인 제어가 아닌 시스템 설계를 통해 안정성을 확보하고 전력 소모가 없다. 능동(Active) 방식은 전자석과 센서를 이용한 위치 제어 시스템을 사용해 실시간으로 제어하는 방식이다. 베어링리스 PMSM은 위치 피드백 제어를 통해 실시간으로 서스펜션 권선 전류를 조절하고 회전자 위치를 정밀하게 유지할 수 있다. 응답 속도가 빠르고 높은 정밀도와 안정성을 가진다.

방사형 서스펜션 힘(Radial Suspension Force)은 불안정성 원칙을 기반으로 고정자와 회전자 사이 공극에 발생한 힘, 위치 제어를 통한 회전자를 중심 위치로 유지시킬 수 있는 능동 방식 힘이다. 이 힘은 맥스웰 힘을 기반으로 한다.

그림 5는 베어링리스 PMSM의 방사형 서스펜션 힘 생성 원

리를 나타냈다. 방사형 서스펜션 힘이 생성된 초기 위치는 임의로 설계된 x축 기준이다. (a)의 방사형 서스펜션 힘은 Area 1의 공극 내의 자속 밀도가 증가한 상태이다.

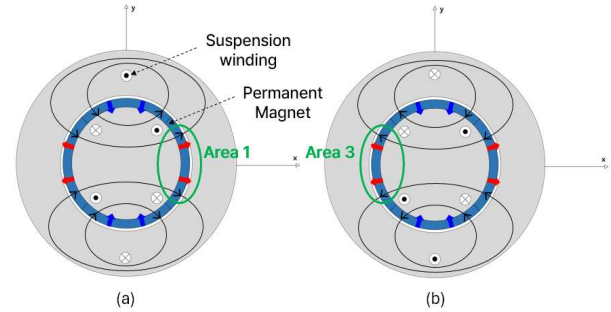


그림 5 방사형 서스펜션 힘 생성 원리

Fig. 5 Principle of radial suspension force generation

서스펜션 권선 전류가 그림 5의 (a)와 같이 인가되면 자기장의 방향이 결정되고 회전자 영구자석 자기장과 중첩한다. 중첩된 두 자기장은 Area 1의 자속 밀도의 증가로 인해 공극 내 자기장 세기가 강해진다. (b)는 (a)와 반대로 Area 3의 공극 내 자속 밀도가 증가한 상태이다. 서스펜션 권선에 인가된 전류는 (a)와 반대 방향이다. 중첩된 자기장은 동일한 원리로 Area 3의 공극 내 자속 밀도가 증가하며 자기장 세기 강해진다. 따라서 방사형 서스펜션 힘의 생성 원리는 그림 3과 같이 공극 내 자기장 불균형에 의한 힘이다. 이 힘은 맥스웰 힘을 기반으로 하며 Maxwell Stress Tensor Method를 이용해 계산한다[4].

접선형 서스펜션 힘(Radial Suspension Force)은 회전자의 회전 축을 기준으로 접선 방향으로 작용하는 힘이다. 베어링리스 PMSM의 토크 힘과 관련이 있으며 로렌츠 힘을 기반으로 한다.

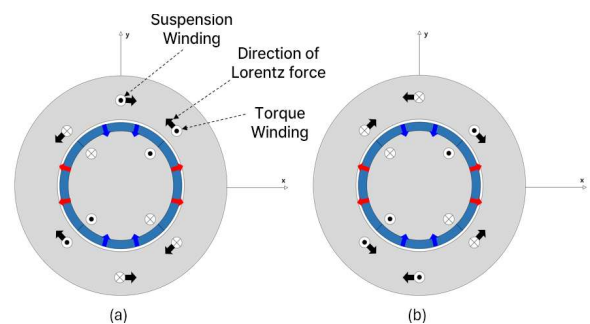


그림 6 접선형 서스펜션 힘 생성 원리

Fig. 6 Principle of tangential suspension force generation

그림 6은 베어링리스 PMSM의 접선형 서스펜션 힘과 생성 원리를 나타냈다. 그림 5와 동일한 조건을 가지며, 서스펜션 권선은 영구자석 자기장과의 중첩, 토크 권선은 서스펜션 권선 자기장과의 중첩으로 생성된 로렌츠 힘의 방향을 (a)와 (b)

에 각각 나타났다. 이 힘은 생성 조건에 따른 서스펜션 권선 자기장에 의해 생성된 로렌츠 힘이 있음을 나타낸다.

식 (1)의 생성 조건을 기반으로 설계된 베어링리스 PMSM은 서스펜션 권선을 이용해 맥스웰 힘과 로렌츠 힘을 생성하고 이를 이용해 회전자를 부양하고 회전 힘에 관여하는 토크를 동시에 생성할 수 있다[4-5].

2.4 수학적 계산식

베어링리스 PMSM의 방사형 서스펜션 힘은 맥스웰 힘을 기반으로 하며 Maxwell Stress Tensor Method를 이용해 공극 내 방사형 서스펜션 힘을 계산할 수 있고 다음의 식 (2)와 같다.

$$F_r = \int_A \frac{(B_r^2 - B_t^2)}{2\mu_0} dA \quad (2)$$

식 (2)에서 F_r 는 방사형 서스펜션 힘[N], μ_0 는 진공에서의 투자율[H/m], A 는 회전자 표면 면적, B_r 는 공극 내 방사 방향 자속 밀도[T], B_t 는 공극 내에서의 접선 방향 자속 밀도[T]이다[4].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} &= l_s g_s \int_{-\pi}^{\pi} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_r^2 \\ B_t A_s \end{bmatrix} d\alpha \\ &= \begin{bmatrix} F_r \sin((\omega_s - P_M \omega_m)t + \theta) \\ -F_r \cos((\omega_s - P_M \omega_m)t + \theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 행렬 연산(Matrix Operation)의 회전 행렬을 통해 회전 좌표계에서 x, y 방향의 방사형 서스펜션 힘(F_x, F_y)의 성분을 계산할 수 있다. l_s 와 g_s 는 적층 철심의 길이[mm], 공극의 반지름[mm]이다. $B_r^2/2\mu_0$ 은 Maxwell Stress Tensor Method, A_s 는 고정자 전류 밀도, θ 는 회전자 자기장과 고정자 자기장 사이의 각도 차이이다[5].

$$F_x = l_s g_s \int_0^{2\pi} \frac{(B_r^2 - B_t^2)}{2\mu_0} \cos\theta d\theta \quad (4)$$

$$F_y = l_s g_s \int_0^{2\pi} \frac{(B_r^2 - B_t^2)}{2\mu_0} \sin\theta d\theta$$

식 (4)는 Maxwell Stress Tensor Method로 계산된 방사형 서스펜션 힘을 적분과 삼각 함수를 사용해 방향 별로 계산한 식이다. 정적 좌표계에서의 방사형 서스펜션 힘의 성분을 의미한다. 방사형 서스펜션 힘을 계산하기 위해서는 생성 조건 식 (1)의 $P_s = P_M \pm 1$ 을 항상 만족해야 한다.

베어링리스 PMSM의 출력 토크는 고정자 토크 권선 극 쌍수 P_T 와 영구자석 극 쌍수가 동일한 $P_T = P_M$ 조건에서 생성

된다. 생성 조건 식 (1)을 만족하지 않는 상태에서는 서스펜션 힘이 생성되지 않는다. 출력 토크는 로렌츠 힘 방법을 이용해 계산하며 다음의 식 (5)와 같다[5].

$$T = l_s g_s \int_{-\pi}^{\pi} B_r A_s d\theta_r \quad (5)$$

베어링리스 PMSM은 서스펜션 권선과 토크 권선을 독립적으로 제어하며 동시에 토크 힘과 서스펜션 힘을 생성할 수 있다. 이를 통해 동기화와 안정성을 유지하며 전자기적 상호 간섭을 최소화한다.

3. Bearingless PMSM 성능 비교

3.1 영구자석 착자 배열

회전자 표면 부착형 영구자석은 고속의 회전 속도를 견딜 수 있고 높은 출력을 달성할 수 있다. 영구자석 동기전동기는 영구자석의 위치에 따라 종류가 다양하며, 착자 배열을 고려하면 구동 특성에 맞게 설계할 수 있다.

그림 7은 영구자석 착자 배열에 따른 자속을 나타낸 것이다. (a)는 영구자석의 평행(Parallel) 착자 배열이다. Parallel 배열은 한 극의 자화 방향이 동일한 방향으로 배열된 형태이며 일관된 자기장 분포를 가진다. (b)는 영구자석의 Halbach 배열이다. 한 극의 자화 방향이 Parallel 배열과 수직인 착자 배열이 배열된 형태이며 한쪽 면의 자속 밀도가 밀집되는 자기장 분포를 가진다. 자속 밀도로 인해 자기장 세기가 세지는 효과는 희토류 자석을 사용하는 전동기의 출력을 향상시킬 수 있다. 하지만 복잡한 제조로 인해 비용이 높고 정밀도를 요구하는 제작 난이도가 높아 고효율 전동기에 주로 사용되고 있다[7-8].

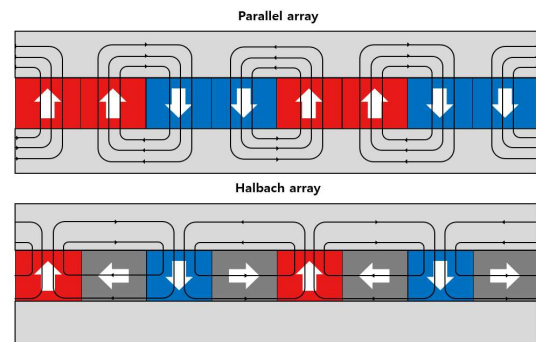


그림 7 영구자석 착자 배열에 따른 자속

Fig. 7 Magnetic flux according to the permanent magnet arrangement

그림 8은 영구자석 동기전동기의 회전자 영구자석 착자 배열을 간단한 그림으로 나타낸 것이다. 설계된 베어링리스 PMSM은 4극이며 4극의 영구자석 중 한 극의 영구자석이 차지하고 있는 각도는 90[deg]이다. 극호비(Pole Arc Ratio)는 한

극의 영구자석이 차지하고 있는 각도 중 Parallel 배열을 가지는 값이다. (a)는 그림 7의 (a)와 동일한 Parallel 배열의 가지는 영구자석 착자 배열이며 극호비는 $1(90[\text{deg}]/90[\text{deg}])$ 이다. (b)는 영구자석 한 극당 2 세그먼트를 가지며 각각은 기존의 Parallel 배열과 수직 방향의 배열이 있는 Halbach 배열이다. 따라서 전체 영구자석의 세그먼트 수는 8이며 한 극의 영구자석은 기존의 Parallel 배열과 수직 방향인 Halbach 배열을 가진다. 한 극당 parallel 배열이 차지하는 각도는 Halbach 0.7모델은 $63[\text{deg}]$ 이며, Halbach 0.8모델은 $72[\text{deg}]$ 이다. 본 논문에서의 Halbach 배열이 있는 모델의 극호비는 경험적 치수에 의한 0.7모델과 0.8모델로 선정하였다.

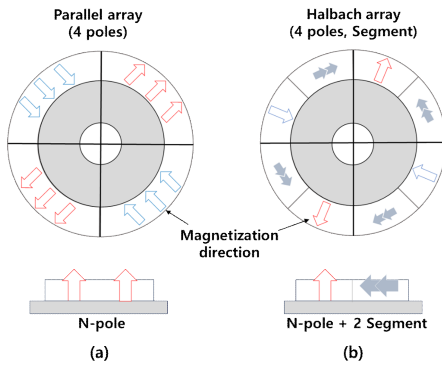


그림 8 회전자 영구자석 착자 배열
Fig. 8 Rotor permanent magnet arrangement

총 영구자석 사용량은 세 모델 모두 동일하다. 영구자석 사용량은 동일하지만 자화 방향에 따라 자속 분포, 자속밀도의 세기, 출력, 토크 등 전체적인 성능에 큰 영향을 미친다. 이는 베어링리스 PMSM이 기계적 마찰 없어 유지보수가 적기 때문에 착자 배열에 따른 성능 연구가 전력 사용량 감소에 기여할 수 있다. 장기적으로 사용한다면 제작 비용보다 크게 절감할 수 있음을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 영구자석 착자 배열에 따른 전체적인 성능을 비교 분석함을 목적으로 세 모델(기존 모델, Halbach 0.7모델, Halbach 0.8모델)을 설계하여 해석 연구를 진행하였다.

3.2 설계 사양

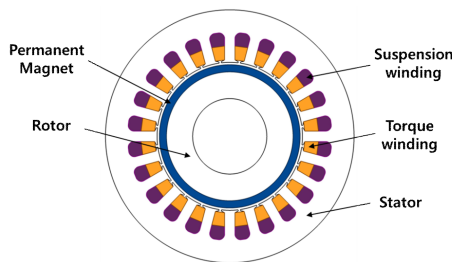


그림 9 베어링리스 PMSM 2차원 모델
Fig. 9 2D model of Bearingless PMSM

베어링리스 PMSM의 기본 설계 사양은 표 1과 같다. 생성 조건은 $P_M = P_S + 1$ 이므로 회전자 영구자석 극 쌍수 2, 고정자 토크 권선 극 쌍수 2, 서스펜션 권선 극 쌍수 1이다. 슬롯수는 24, 상 수는 3으로 결정하였다. 고정자와 회전자 철심 재질은 35PN230이며 영구자석은 잔류 자속밀도 $B_r = 1.23[\text{T}]$ 의 NdFeB-35 등급으로 설계하였다.

표 1 베어링리스 PMSM의 설계 사양

Table 1 Design Parameters of Bearingless PMSM

Items		Bearingless PMSM	unit
Pole number of	Permanent magnet	4	-
	Suspension winding	2	-
Number of Slots		24	-
Stator outer radius		53	mm
Rotor outer radius		30	mm
Stack length		20	mm
Air-gap length		1	mm
Number of Turns in the winding		22	-
Rated speed		3,000	RPM

그림 9는 베어링리스 PMSM의 2차원 모델이다. 회전자 영구자석은 표면부착형(Surface-mounted)으로 설계하였다. 고정자 슬롯은 2층권 구조로 각각 토크 권선과 서스펜션 권선이 있다.

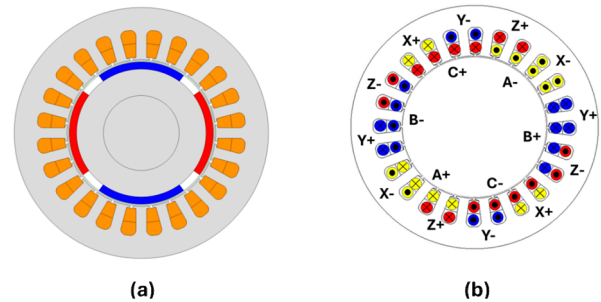


그림 10 유한요소 2차원 모델과 고정자 권선 배치도
Fig. 10 Finite Element 2D model and Winding distribution diagram

그림 10의 (a)는 표 1의 설계 사양과 그림 9의 베어링리스 PMSM 2차원 모델을 바탕으로 설계된 유한요소 2차원 모델이다. (b)는 고정자 슬롯에 배치된 권선의 배치도이다. 고정자 슬롯은 2층(2-layer) 구조로 나뉘어져 외부층에는 토크 권선이 배치되어 있다. 위상의 순서는 X-Y-Z 순이며 극 수는 영구자석과 동일한 4극이다. 내부 층에는 서스펜션 권선이 배치되어 있다. 위상의 순서는 A-B-C 순이며 극 수는 2극이다. 고정자 두 권선의 초기 배치를 이용해 서스펜션 힘의 초기 방향을 결정할 수 있다. 두 권선의 구동 전류는 3상 대칭이며 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{cases} i_X = I_m \cos(\omega t + \theta_m) \\ i_Y = I_m \cos(\omega t + 120\deg + \theta_m) \\ i_Z = I_m \cos(\omega t + 240\deg + \theta_m) \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)은 토크 권선 X, Y, Z상 인가 전류이며, 토크 힘을 생성한다. θ_m 은 토크 권선의 초기 전기각이다.

$$\begin{cases} i_A = I_s \cos(\omega t + \theta_s) \\ i_B = I_s \cos(\omega t + 120\deg + \theta_s) \\ i_C = I_s \cos(\omega t + 240\deg + \theta_s) \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)은 서스펜션 권선 A, B, C상 인가 전류이며, 서스펜션 힘을 생성한다. θ_s 은 서스펜션 권선의 초기 전기각이다. 서스펜션 권선 전류의 위상 조절을 통해 방사형 서스펜션 힘이 회전자를 중심 위치에 안정적으로 제어할 수 있다[4,5].

3.3 역기전력과 토크 해석

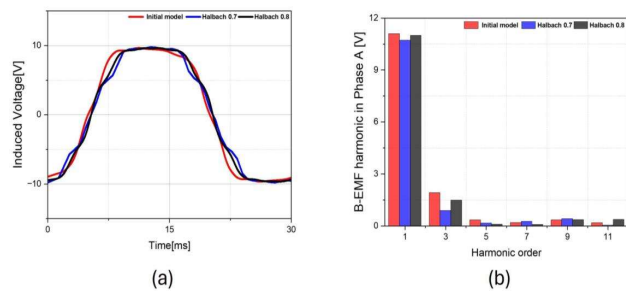


그림 11 역기전력 파형과 고조파 성분 해석 결과
Fig. 11 Analysis results of B-EMF waveform and harmonics

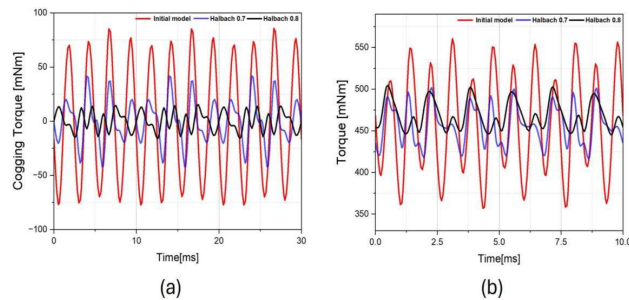


그림 12 코깅 토크와 토크 해석 결과
Fig. 12 Analysis Results of Cogging Torque and Torque

그림 11에서는 무부하 조건의 토크 권선 A상 역기전력 (B-EMF) 파형과 고조파 성분의 분석 결과를 나타냈다. (a)에서 세 모델의 역기전력은 9.7~9.8[Vmax]로 동일하였다. (b)는 (a)의 역기전력에 대해 고조파 성분을 분석하였다. 각 모델의 총 고조파 왜곡률(Total Harmonic Distortion, THD)을 계산하였을 때, 기존 모델은 17.92[%], Halbach 0.7모델은 9.44[%], Halbach 0.8모델은 14.29[%]이다. 결과적으로 Parallel 배열보다 Halbach 배열의 전체적인 고조파 성분이 개선되었다. 특히

Halbach 0.7모델이 3차 고조파 성분이 낮음을 확인하였다. 고조파 성분을 낮추면 THD를 감소시킬 수 있다. 이는 두 힘의 전자기적 간섭에 개선 효과를 줄 수 있다[8-9].

그림 12은 코깅 토크와 토크에 대한 해석 결과이다. 영구자석 사용량과 턴 수, 전류는 동일하다. 토크 권선 전류는 3[A], 서스펜션 권선 전류는 4[A]를 인가하였다. (a)에서 Halbach 배열의 코깅 토크가 기존 모델에 비해 70%이상 감소하였다. (b)에서 세 모델의 토크 평균 값은 유사한 값을 갖지만, Halbach 모델의 토크 리플이 큰 폭으로 개선되었다.

표 2 Bearingless PMSM의 2D 유한요소해석 결과

Table 2 2D Finite Element Analysis results of Bearingless PMSM

Item	Initial model	Halbach 0.7	Halbach 0.8	Unit
B-EMF (Torque winding)	9.7	9.8	9.7	V
THD	17.9	9.4	14.3	%
Cogging Torque	161.1	83.2	29.7	mNm
Torque	449.5	452.1	462.4	
Torque Ripple	45.2	18.5	13.3	%
Loss	Core	5.0	4.2	W
	Eddy current	1.5	1.2	

표 2는 설계된 베어링리스 PMSM 2D 모델의 유한요소해석 결과를 정리한 표이다. 영구자석 착자 배열을 변경함에 따라 변화되는 값으로는 역기전력, 총 고조파 왜곡률, 코깅 토크, 평균 토크, 토크 리플, 손실 등이 있으며 전반적인 성능이 달라진다. 기존 모델과 비교했을 때 Halbach 0.8모델의 평균 토크는 2.87[%] 증가하였다. 또한 진동, 소음 등과 연관이 있는 코깅 토크는 약 81[%], 토크 리플은 약 70[%] 정도 감소하는 등 큰 폭으로 성능이 개선됨을 해석적으로 확인하였다.

3.4 서스펜션 힘 해석

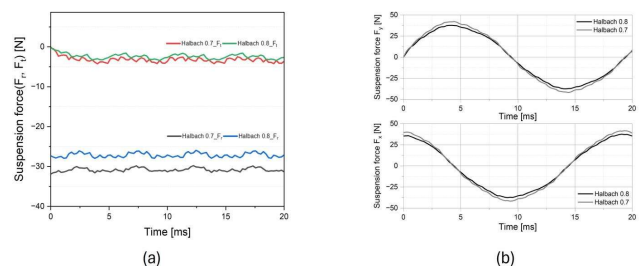


그림 13 서스펜션 힘 해석 결과
Fig. 13 Analysis results of suspension force

서스펜션 힘은 Halbach 배열의 두 모델에 대해 비교 분석하

였다. 회전자 편심이 없는 상태에서 결과를 도출하였다. 회전자 편심이 생기면 서스펜션 권선 간 자기장에 의해 토크가 추가로 생성될 수 있다. 편심에 의해 생성된 힘은 서스펜션 권선 전류와 공극 간 거리[mm]에 비례한다.

그림 13는 무부하 상태에서의 서스펜션 힘에 대한 해석 결과이다. (a)에서 F_r 은 방사형 서스펜션 힘이며 F_t 는 접선형 서스펜션 힘을 의미한다. 방사형 서스펜션 힘을 측정하였을 때, 기존 모델은 22.14[N], Halbach 0.7모델은 30.99[N], Halbach 0.8모델은 27.26[N]이다. 방사형 서스펜션 힘 F_r 은 절댓값으로 표현할 수 있다. (b)는 x축과 y축 방향으로 생성된 서스펜션 힘이다. F_x 는 서스펜션 힘 중 x축 방향으로 생성된 힘이며 코사인 값을 가진다. F_y 는 서스펜션 힘 중 y축으로 방향으로 생성된 힘이며 사인 값이다. (a)에서 Halbach 0.7모델은 7.8[%], Halbach 0.8모델은 9.4[%]의 서스펜션 힘에 대한 리플 값을 가진다. 기존 모델의 서스펜션 리플은 18.1[%]이며 기존 모델 대비 서스펜션 리플이 각각 약 57[%], 약 48[%] 감소하였다.

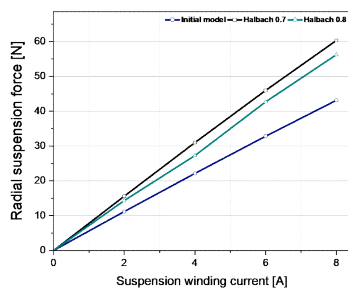


그림 14 서스펜션 권선 전류에 따른 방사형 서스펜션 힘 해석 결과
Fig. 14 Analysis results of radial suspension force according to suspension winding current

그림 14는 세 모델의 서스펜션 권선 전류에 따른 방사형 서스펜션 힘을 해석한 결과이다. 이론적 수학식에서 서스펜션 힘은 회전자 표면 면적과 서스펜션 권선 전류에 비례하여 증가한다. 서스펜션 권선 전류에 비례하여 생성된 방사형 서스펜션 힘은 기존 모델이 약 5.5[N/A]이며, Halbach 0.7모델은 7.5[N/A], Halbach 0.8모델은 7.0[N/A]이다.

4. 결론

본 논문에서는 베어링리스 영구자석 동기전동기의 구동 원리 및 서스펜션 힘의 생성에 관한 연구와 영구자석 착자에 따른 전동기의 성능 개선에 관한 비교 분석을 진행하였다. 이를 위해 2차원 모델을 설계할 진행하였으며, 타당성을 입증하기 위해 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. 특히, Halbach 배열 모델이 기존 Parallel 배열 모델 대비 토크 리플과 고조파 성분이 낮아지는 경향성을 확인하였다. 향후 연구에서 베어링리스 영구자석 동기전동기의 성능 개선 및 최적화 설계 기법

에 관한 연구를 진행할 계획이다.

Acknowledgements

This work was supported by "Human Resources Program in Energy Technology" of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry&Energy, Republic of Korea. (No.RS-2023-00243214)

References

- [1] S. Y. Kim, "Factor decomposition analysis on Electricity consumption of domestic manufacturing industry," Korea Energy Economic Review, vol. 22, no. 1, pp. 73-99, 2023. DOI: 10.22794/keer.2023.22.1.004.
- [2] S. K. Lee, Y. H. Jung, J. Y. Yoo, S. H. Wi and M. S. Lim, "Efficiency Comparison of Ultra High Speed Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor According to the Number of Poles," Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp. 34-35, 2019.
- [3] S. Y. Yoo, S. S. Mo, S. G. Choi, J. P. Lee, Y. H. Han and M. G. Noh, "Design of Magnetic Levitating Flywheel Energy Storage System," Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring and Autumn Conference, pp. 2143-2147, 2007.
- [4] X. Sun, L. Chen and Z. Yang, "Overview of Bearingless Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 12, pp. 5528-5538, Dec. 2013. DOI: 10.1109/TIE.2012.2232253
- [5] T. Pei, D. Li, J. Liu, J. Li and W. Kong, "Review of Bearingless Synchronous Motors: Principle and Topology," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 3, pp. 3489-3502, Sep. 2022. DOI: 10.1109/TTE.2022.3164420.
- [6] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto and D. G. Dorrell, Magnetic Bearings and Bearingless Drives, Newnes, pp. 1-350, 2005. DOI:10.1016/b978-0-7506-5727-3.x5000-7
- [7] S. M. Jang, D. J. Yoo, K. J. Ko and S. G. Choi, "Electromagnetic field analysis and performance characteristics of PMSM/G with Halbach magnetized array rotor," Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp. 86-88, 2008.
- [8] T. Zhang, et al., "Electromagnetic Performance Analysis on the Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor with Halbach Magnetized Rotor," IEEE Access, vol. 7, pp. 121265 - 121274, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937897.
- [9] T. Zhang, W. Ni, X. Wang, C. Zhang and H. Jia, "Optimal Design on Bearingless Permanent Magnet Synchronous

Motor to Decrease Losses and Torque Ripple,” *Sensors & Transducers*, vol. 182, no. 11, pp. 138–145, 2014.

저자소개



노민수(Min-Soo Noh)

He received the B.S. degree in electronic engineering from Cheongju University, Cheongju, South Korea, in 2022. He then received his M.S. degree in electrical control engineering from Cheongju University in 2024. His research interests include the design, analysis, testing, and control of motor/generator and applications of electric machinery.



김동현(Dong-Hyeon Kim)

He received the B.S. degree in electrical control engineering from Cheongju University, Cheongju, South Korea, in 2022. He then received his M.S. degree in electronic engineering from Cheongju University in 2024. He is currently pursuing his Ph.D. in electronic engineering at Cheongju University. His research interests include the design, analysis, testing, and control of motor/generator and applications of electric machinery.



Youguang Guo

He received his Bachelor's degree from Huazhong University of Science and Technology in 1985, his Master's degree from Zhejiang University in 1988, and his Ph.D. degree from the University of Technology Sydney (UTS) in 2004. He is currently a professor at the School of Electrical and Data Engineering at UTS. His research fields include the measurement and modelling of the properties of magnetic materials, the numerical analysis of electromagnetic fields, electrical machine design optimization, and power electronic drives and control.



이호준(Ho-Joon Lee)

He received his M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2011 and 2015, respectively. He was an assistant professor at Cheongju University (CJU) from 2020 to 2025. He is currently an associate professor of Electronics and Electrical Engineering at Dankook University (DKU) since 2025. His research interests include the design, analysis, testing, and control of motors/generators; power conversion systems; and applications of electric machinery.