

독립 3상 구조를 갖는 이중공극형 영구자석 동기전동기의 Y 및 Delta 결선에 따른 공극제어

허찬녕¹, 황선환[†]

Air-gap Control According to Y and Delta Connections of Double-sided Air-gap Permanent Magnet Synchronous Motor with Independent Three-phase Structure

Chan-Nyeong Heo¹ and Seon-Hwan Hwang[†]

Abstract

This paper presents air-gap control according to Y and Delta connections of a double-sided air-gap permanent magnet synchronous motor (DA-PMSM) with independent three-phase structure. In particular, the DA-PMSM used in this study can be applied to low-speed and high-torque applications, such as wind turbines, tidal power generations, and electric propulsion ships, because of its modular stators and a rotor with numerous permanent magnets. Unlike conventional three-phase machines, the DA-PMSM has a symmetrical configuration with double-sided air-gap. Therefore, Y/Delta winding connections and serial/parallel configurations between stator modules are possible. To identify the DA-PMSM operating characteristics, mathematical modeling is analyzed according to the Y/Delta connections. Moreover, air-gap control performances by applying the winding connection methods are verified through experimental results.

Key words: Double-sided air-gap, Independent three-phase structure, Vector control, Y and Delta connections, Air-gap control

1. 서 론

현재 전동기를 활용한 산업분야에서 영구자석 동기전동기는 동일체적 대비 높은 토크 및 출력특성으로 인해 지속적인 관심과 함께 수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 특히, 다상구조를 갖는 영구자석 동기전동기의 경우 엘리베이터, 풍력 발전, 조력 발전 및 전기추진선박과 같은 비교적 저속에서 높은 토크와 출력밀도가 요구되는 대형 회전기에서 그 응용이 점차적으로 확대되고 있다^[1-3].

본 연구에 사용된 독립 3상 구조를 갖는 이중공극형 영구자석 동기전동기(DA-PMSM; Double-sided Air-gap Permanent Magnet Synchronous Motor)는 다수의 영구자석으로 구성된 회전자와 전기적으로 120° 위상차를 갖는 다수의 고정자 모듈들이 회전을 중심으로 전/후면 대칭으로 결합된 3상 고정자 모듈 구조를 기본 구조로 하고 있다. 그로 인해 Y 결선, Delta 결선 및 고정자 모듈간의 직·병렬결선과 같은 다양한 구성방법을 통한 운전이 가능하다^[4-6].

DA-PMSM은 일반적인 3상 교류 전동기와 마찬가지로 3상 벡터제어 개념을 적용하여 운전할 수 있다. 또한 이중공극형 구조로 인해 벡터제어 시 일반적인 교류 전동기와 달리 독립 3상 고정자 모듈과 회전자 사이의 공극을 필요로 한다. 그 결과 DA-PMSM의 독립 3상 고정자 모듈에 Y 결선을 적용한 것과 Delta 결선을 적용한 경우, 각 상의 전류 및 위상에 의한 전기적 특성이 달라진다. 따라서 각각의 결선 방법에 따라 시스템의 운전 시 속도 및 공극제어 특성의 차이를 가진다^[6-11].

Paper number: TKPE-2017-22-3-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: seonhwan@kyungnam.ac.kr
Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University
Tel: +82-55-249-2744 Fax: +82-505-999-2161

¹ Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University
Manuscript received Nov. 22, 2016; revised Dec. 12, 2016;
accepted Feb. 13, 2017

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

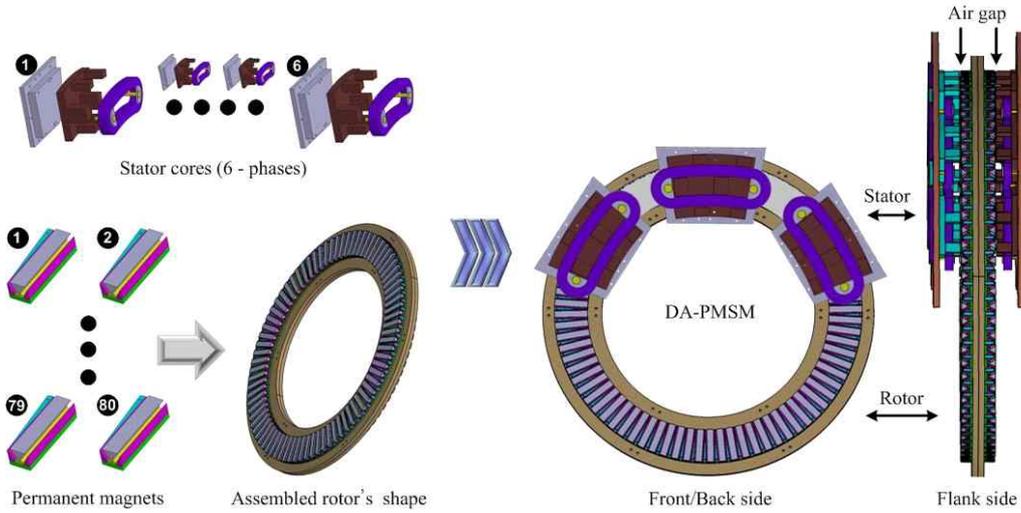


Fig. 1. Structures of double-sided air-gap permanent magnet synchronous motor(DA-PMSM).

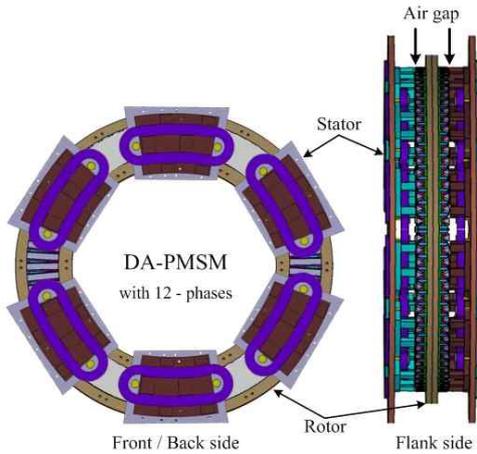


Fig. 2. DA-PMSM with 12-phases.

본 논문에서는 독립 3상 구조를 갖는 이중공극형 영구자석 동기전동기의 Y 및 Delta 결선을 토대로 수학적 모델링을 수립하였고, 각각의 결선방법에 따른 공극제어 운전특성을 동일한 실험조건을 적용하여 실험함으로써 비교 및 분석하였다.

2. 독립 3상 구조를 갖는 DA-PMSM의 구조

본 연구에 사용된 DA-PMSM의 구조는 그림 1과 같이 설계 및 제작되었다. 그림 1에서 알 수 있듯이 DA-PMSM은 다수의 영구자석으로 결합된 회전자와 좌우대칭의 독립 3상 고정자 모듈들로 구성된다. 회전자는 저속에서 높은 출력특성을 얻기 위한 80극의 영구자석들이 좌우대칭으로 결합되어있고 고정자 모듈은 a, b, c 상이 각각 전기적으로 120°의 위상차를 갖는 독립 3상 고정자 모듈을 기본으로 하여 구성되어있다. 또한 각 상들은 서로 자기적 회로가 분리되었기에 각 상들 사이의 상호 인덕턴스 또한 '0'으로 고려되어진다.

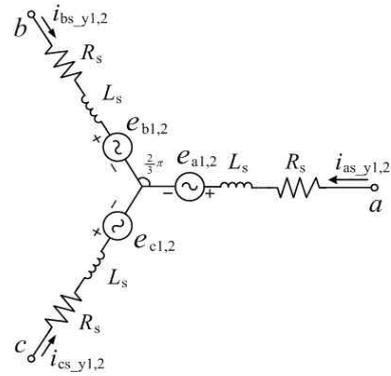


Fig. 3. Equivalent circuit of independent 3-phase stator modules with Y connection.

또한 일반적인 교류 전동기와 달리 DA-PMSM은 모듈형 구조로 인하여 전동기의 제작 및 운송의 편의성을 가지며 시스템의 유지 및 보수가 용이한 측면이 있다. 그림 2와 같이 독립 3상 고정자 모듈들을 추가함으로써 시스템의 대용량 운전을 가능하게 한다.

3. DA-PMSM의 수학적 모델링

3.1 Y 결선

앞서 언급했듯이 DA-PMSM의 독립 3상 고정자 모듈은 각 상이 전기적으로 동일한 위상차를 가지며 유기된 역기전력은 120° 위상차를 가지는 정현파로 회전속도에 비례하는 크기를 갖는다. 이와 같은 구조적 특징은 중성점 결선을 제외하고 기존의 3상 Y 결선 교류 전동기와 유사한 형태로, 3상 교류 전동기에 사용되는 벡터제어기법을 적용하여 해석할 수 있다.

그림 3은 Y 결선 시 독립 3상 고정자 모듈의 전기적 등가회로를 나타내고 있으며 $i_{as_y1,2}$, $i_{bs_y1,2}$, $i_{cs_y1,2}$ 는 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 각 상전류, R_s 는 고정

자 저항, L_s 는 고정자 인덕턴스이고 $e_{a1,2}$, $e_{b1,2}$, $e_{c1,2}$ 는 독립 3상 고정자 모듈의 역기전력을 나타낸다.

독립 3상 고정자 모듈에 Y 결선을 적용할 경우 독립 3상 고정자 모듈 각 상의 전압 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} v_{as_y1,2} &= R_s i_{as_y1,2} + L_s \frac{di_{as_y1,2}}{dt} + e_{a1,2} \\ v_{bs_y1,2} &= R_s i_{bs_y1,2} + L_s \frac{di_{bs_y1,2}}{dt} + e_{b1,2} \\ v_{cs_y1,2} &= R_s i_{cs_y1,2} + L_s \frac{di_{cs_y1,2}}{dt} + e_{c1,2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $v_{as_y1,2}$, $v_{bs_y1,2}$ 와 $v_{cs_y1,2}$ 는 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 각 상전압이다.

앞서 언급했듯이 독립 3상 고정자 모듈의 각 상은 서로 자기적으로 분리되어 있으므로 상 권선들 사이의 상호 인덕턴스는 '0'으로 고려된다. 따라서 각 상의 동기 좌표계 dq 축 전압 방정식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} v_{ds_y1,2}^e &= R_s i_{ds_y1,2}^e + L_s \frac{di_{ds_y1,2}^e}{dt} - \omega_r L_s i_{qs_y1,2}^e \\ v_{qs_y1,2}^e &= R_s i_{qs_y1,2}^e + L_s \frac{di_{qs_y1,2}^e}{dt} + \omega_r L_s i_{ds_y1,2}^e + \omega_r \lambda_f \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $v_{ds_y1,2}^e$ 와 $v_{qs_y1,2}^e$ 는 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 동기 좌표계 dq 축 전압, $i_{ds_y1,2}^e$ 와 $i_{qs_y1,2}^e$ 는 동기 좌표계 dq 축 전류, λ_f 는 영구자석의 쇄교자속, ω_r 은 전기 각속도이다.

DA-PMSM은 일반적인 3상 교류 전동기와 같이 벡터 제어를 기반으로 고정자 3상 전류정보를 동기 좌표계 dq 축 전류로 좌표 변환하여 동기 좌표계 PI전류제어를 통해 속도제어를 수행한다.

동기 좌표계 q 축 전류제어를 통해 DA-PMSM의 속도 제어를 하며 속도제어 시 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 토크 방정식은 식 (3), (4)와 같으며 합산 토크 방정식은 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$T_{y1} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs_y1}^e \quad (3)$$

$$T_{y2} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs_y2}^e \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{y_total} &= T_{y1} + T_{y2} \\ &= \frac{3}{4} P \lambda_f (i_{qs_y1}^e + i_{qs_y2}^e) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $T_{y1,2}$ 와 T_{y_total} 은 독립 3상 고정자 모듈의 전/후면 회전 및 합산 토크, P 는 극수이다.

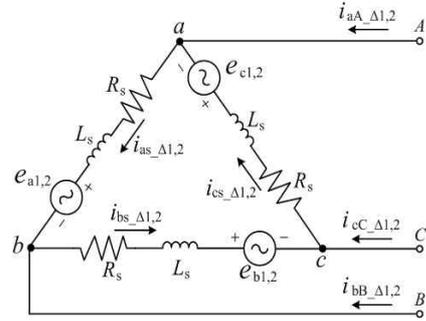


Fig. 4. Equivalent circuit of independent 3-phase stator module with delta connection.

DA-PMSM은 이중공극 구조로 인해 전동기의 회전 시 공극제어를 통해 회전자와 고정자 사이의 간격을 일정하게 유지한다. 그러므로 DA-PMSM는 동기 좌표계 d 축 전류제어를 통해 고정자와 회전자 사이의 공극제어한다. 전/후면 독립 3상 고정자 모듈들을 모두 고려한 합산 흡인력 F_{total} 의 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} F_{total} &= F_1 + F_2 \\ &= -\frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 - x)} i_{ds_y1}^e - \frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 - x)} i_{qs_y1}^e \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 + x)} i_{ds_y2}^e + \frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 + x)} i_{qs_y2}^e \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 Delta 결선

그림 4에서 알 수 있듯이 DA-PMSM의 제어를 위한 각 상전류의 정보를 얻기 위하여 본 시스템에서는 선전류의 정보를 기반으로 하고 있으며, Delta 결선 시 상전류와 선전류의 관계를 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} i_{aA_Δ1,2} &= \sqrt{3} i_{as_Δ1,2} \angle -30^\circ \\ i_{bB_Δ1,2} &= \sqrt{3} i_{bs_Δ1,2} \angle -30^\circ \\ i_{cC_Δ1,2} &= \sqrt{3} i_{cs_Δ1,2} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $i_{aA_Δ1,2}$, $i_{bB_Δ1,2}$ 와 $i_{cC_Δ1,2}$ 는 Delta 결선 시 선전류이며, $i_{as_Δ1,2}$, $i_{bs_Δ1,2}$ 와 $i_{cs_Δ1,2}$ 는 Delta 결선 시 상전류이다.

Delta 결선 시 동기 좌표계 dq 축 전압 방정식은 식 (7)의 전류정보를 식 (1)에 대입하여 좌표 변환함으로써 구할 수 있다. 따라서 동기 좌표계 dq 축 전압 방정식은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} v_{ds_Δ1,2}^e &= R_s i_{ds_Δ1,2}^e + L_s \frac{di_{ds_Δ1,2}^e}{dt} - \omega_r L_s i_{qs_Δ1,2}^e \\ v_{qs_Δ1,2}^e &= R_s i_{qs_Δ1,2}^e + L_s \frac{di_{qs_Δ1,2}^e}{dt} + \omega_r L_s i_{ds_Δ1,2}^e + \omega_r \lambda_f \end{aligned} \quad (8)$$

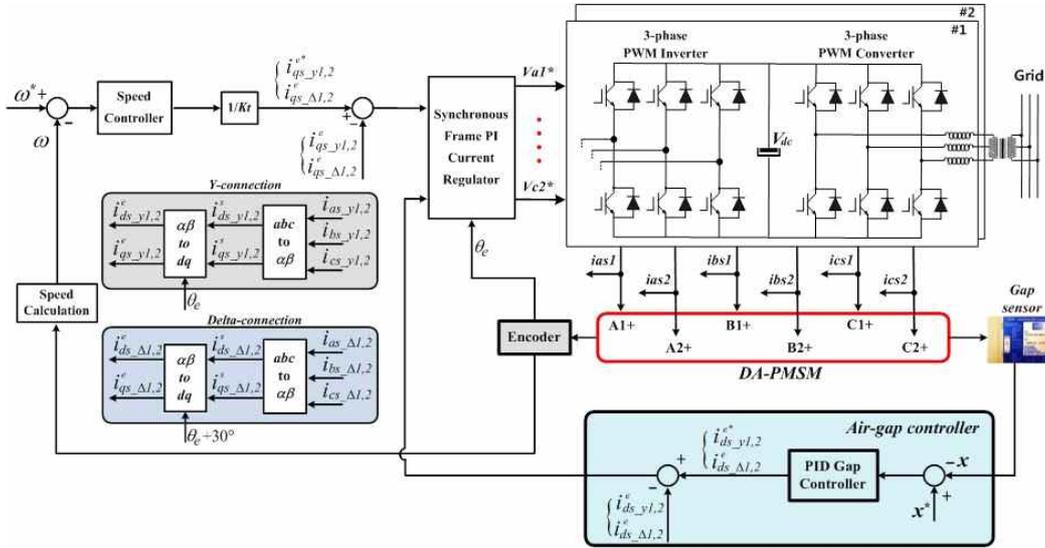


Fig. 5. Control block diagram of DA-PMSM.

여기서, $v_{ds_Δ1,2}^e$ 와 $v_{qs_Δ1,2}^e$ 는 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 동기 좌표계 dq 축 전압, $i_{ds_Δ1,2}^e$ 와 $i_{qs_Δ1,2}^e$ 는 동기 좌표계 dq 축 전류이다.

토크의 경우 Y 결선과 동일하게 동기 좌표계 q 축 전류제어를 통해 속도제어를 하며 속도제어 시 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 토크 방정식은 식 (9), (10)과 같으며 합산 토크 방정식은 식 (11)과 같다.

$$T_{\Delta 1} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs_Δ1}^e \quad (9)$$

$$T_{\Delta 2} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs_Δ2}^e \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_{\Delta_total} &= T_{\Delta 1} + T_{\Delta 2} \\ &= \frac{3}{4} P \lambda_f (i_{qs_Δ1}^e + i_{qs_Δ2}^e) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $T_{\Delta 1,2}$ 와 T_{Δ_total} 은 Delta 결선 시 독립 3상 고정자 모듈의 전/후면 회전 및 합산 토크이다.

또한 Delta 결선 시 전/후면 독립 3상 고정자 모듈의 합산 흡인력은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} F_{\Delta_total} &= F_{\Delta 1} + F_{\Delta 2} \\ &= -\frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 - x)} i_{ds_Δ1}^e - \frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 - x)} i_{qs_Δ1}^e \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 + x)} i_{ds_Δ2}^e + \frac{1}{2} \frac{L_s}{(g_0 + x)} i_{qs_Δ2}^e \end{aligned} \quad (12)$$

DA-PMSM의 Delta 결선 시 독립 3상 고정자 모듈에 입력되는 전류는 $\sqrt{3}$ 배 큰 전류 인가를 통하여 Y 결선 시와 동일한 회전 토크 및 흡인력을 출력할 수 있음을 알 수 있다.

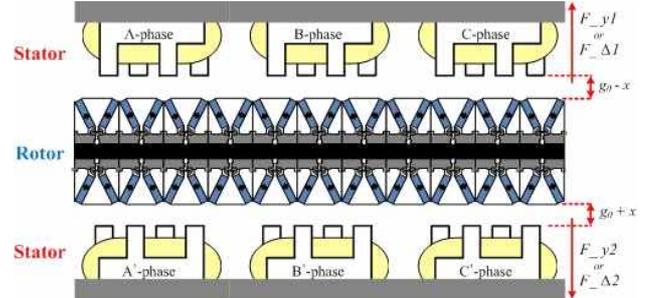


Fig. 6. Sectional view of DA-PMSM for air-gap control.

4. 독립 3상 이중공극형 영구자석 동기전동기의 공극제어

본 논문에 사용된 DA-PMSM은 모듈형 구조로 인해 Y 결선, Delta 결선 및 직·병렬결선과 같은 다양한 결선 방법을 통한 운전이 가능하며, 3상 교류전동기에서 사용되는 벡터제어를 통해 속도 및 공극제어를 수행할 수 있다. 그림 5는 독립 3상 DA-PMSM의 전체적인 제어 알고리즘 블록도를 보여주고 있다. 제어 블록도는 크게 속도제어기와 동기 좌표계 PI 전류제어기 및 공극제어기로 구성된다. 특히, 회전자와 고정자의 공극길이를 측정하기 위한 갭 센서의 위치 정보(x)를 바탕으로 공극을 제어할 수 있다.

DA-PMSM의 속도제어는 엔코더로부터 측정된 운전 속도(ω_r)를 토대로 동기 좌표계 q 축 전류지령(i_{qs}^e)을 출력한 후 동기 좌표계 PI전류제어기를 통해 3상 벡터제어를 수행하여 전동기의 속도제어하며 회전자와 고정자의 공극제어는 그림 6과 같이 갭 센서로부터 측정된 독립 3상 고정자 모듈과 회전자 사이의 공극(x)을 공극지령(x^*)과 실제 공극(x)을 비교하여 동기 좌표계 PI 전

류제어기를 통해 동기 좌표계 d 축 전류를 제어함으로써 DA-PMSM의 공극을 제어할 수 있다.

독립 3상 고정자 모듈에 Y 결선과 Delta 결선을 적용할 시 3상 좌표변환 과정에서 사용되는 전기각(θ_e)의 차이를 제외하고 동일한 제어 알고리즘의 구성을 가진다. Delta 결선의 경우 좌표변환 시 Y 결선과 비교하여 30°의 위상차를 고려해주어야 하며 이는 DA-PMSM의 속도 및 공극제어 시 3상 AC/DC/AC 컨버터를 통해 출력되는 전류의 크기 및 위상의 차이를 발생시킨다. Delta 결선 시 선전류와 상전류의 차이는 Y 결선 시와 비교하면 동일한 토크 및 흡인력을 출력하기 위한 출력전류가 $\sqrt{3}$ 배의 더 큰 전류를 출력하게 된다.

5. 실험

본 논문에서 실험에 사용된 독립 3상 DA-PMSM 실험장치는 그림 7과 같다.

실험장치는 독립 3상 DA-PMSM, 3상 AC/DC/AC 컨버터, 제어보드 등으로 구성되어 있으며 실험에 사용된 독립 3상 DA-PMSM의 제원은 표 1에 나타내었다. 독립 3상 구조를 갖는 이중공극형 영구자석 동기전동기의 Y 및 Delta 결선에 따른 운전특성을 해석하기 위해서 그림 5의 제어 알고리즘을 시스템에 적용하여 실험을 진행하였다. 실험은 Y 결선 및 Delta 결선 모두 동일한 조건에서 수행하였다.

그림 8과 9는 Y 결선 및 Delta 결선시 저속영역에서 속도지령(ω_r^*)의 변화에 따른 실제 회전속도(ω_r)의 변화와 그에 따른 동기 좌표계 q 축 전류의 변화를 측정된 파형으로 Y 결선과 Delta 결선 모두 속도지령의 변화에 맞춰 실제 회전속도가 잘 추종함을 확인하였으며 5[rpm]의 회전속도를 기준으로 Y 및 Delta 결선 시 동기 좌표계 q 축 전류($i_{qs_y1,2}^e, i_{qs_Δ1,2}^e$)는 약 1.97[A]와 3.34[A]로 $\sqrt{3}$ 배의 크기를 가지는 것을 확인하였다.

그림 10와 11은 공극제어 전 독립 3상 고정자 모듈과 회전자 사이 공극변화의 범위를 확인하기 위한 파형으로 그림 9는 회전자가 전면부 독립 3상 고정자 모듈로 기울었을 경우 공극의 길이를 측정하였고 공극의 값은 평균적으로 약 1.03[mm]로 측정되었다. 또한 그림 10은 후면부 독립 3상 고정자 모듈 쪽으로 기울었을 경우이며 약 7.26[mm]로 측정되었다.

그림 12과 13은 공극제어 시 회전속도를 변화시켰을 때 동기 좌표계 dq 축 전류의 변화 및 공극제어특성의 변화를 확인한 실험파형으로 실제 회전속도의 변화에도 실제공극이 지령공극 4.2[mm]를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

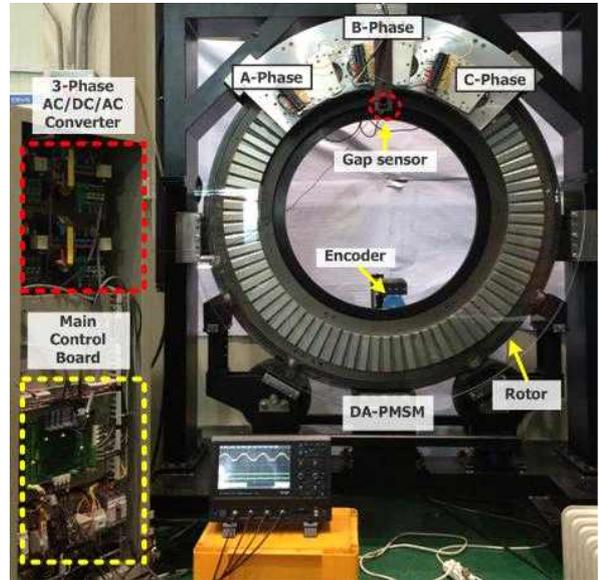


Fig. 7. Experimental setup of DA-PMSM with double-sided air-gap.

TABLE I
ELECTRICAL SPECIFICATION OF DA-PMSM

Parameters	Value
IGBT (PM100CSA060)	600[V]/100[A]
DC Link capacitor	4700[μF]/400[V]
Input reactor	5[mH]
Total Air-gap	6.23[mm]
Switching frequency	10[kHz]
Processor	TMS320VC33, FPGA
Total rated power	12[kW]
Stator resistance	4.152[Ω]
Stator inductance	291[mH]
Diameter	- Outer diameter : 1.3[m] - Inner diameter : 1[m]

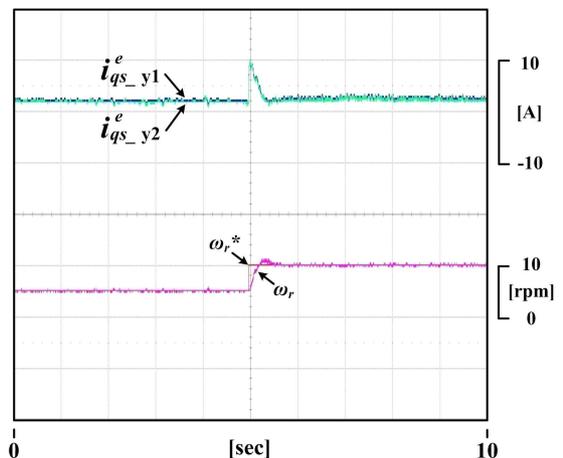


Fig. 8. Speed control under Y connection.

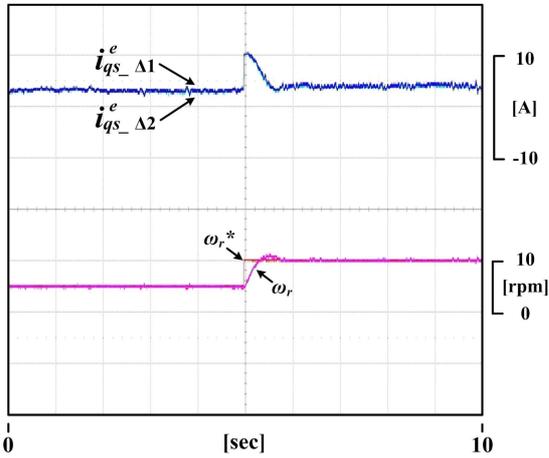


Fig. 9. Speed control under delta connection.

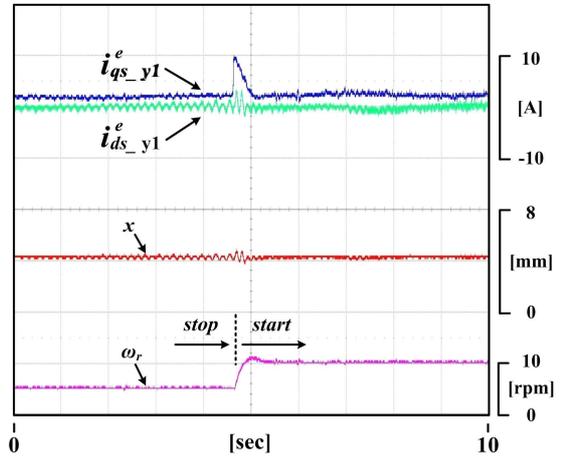


Fig. 12. Speed and air-gap control under Y connection.

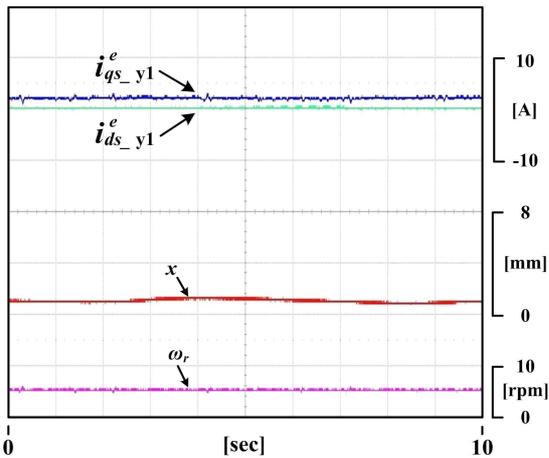


Fig. 10. Detected air-gap length on front side.

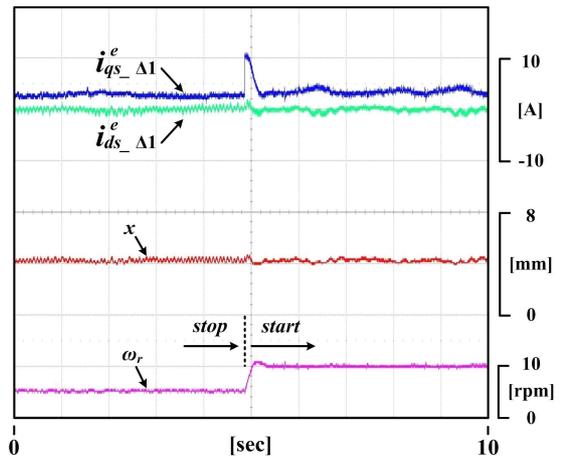


Fig. 13. Speed and air-gap control under delta connection.

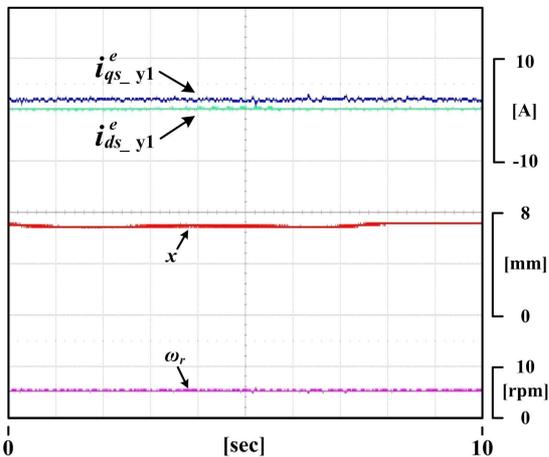


Fig. 11. Detected air-gap length on back side.

6. 결 론

본 연구에 사용된 독립 3상 이중공극형 영구자석 동기전동기(DA-PMSM; Double-sided Air-gap Permanent Magnet Synchronous Motor)는 다수의 영구자석으

로 된 회전자와 전기적으로 120° 위상차를 갖는 다수의 고정자 모듈들이 회전자를 중심으로 전/후면 대칭으로 결합된 3상 고정자 모듈 구조를 지니며 모듈형 구조로 인해 Y 결선, Delta 결선 및 직·병렬결선과 같은 다양한 결선방법을 통한 운전이 가능하다.

DA-PMSM은 3상 벡터제어를 통해 시스템을 운전할 수 있으며, 독립 3상 고정자 모듈에 Y 결선을 적용한 것과 Delta 결선을 적용한 경우 전류 및 위상의 차이로 인한 운전특성이 달라진다. 이를 기반으로 DA-PMSM의 속도제어 및 공극제어특성을 확인하였다.

Delta 결선의 경우 Y 결선과는 다르게 초기 회전자의 위치를 정렬 시 30°의 위상차를 고려해주어야 하며, 속도 및 공극제어 시 Delta 결선 선전류와 상전류의 $\sqrt{3}$ 배 크기차이로 인해 Y 결선과 동일한 토크를 출력하기 위해 $\sqrt{3}$ 배 더 큰 동기 좌표계 dq축 전류가 출력된다.

본 논문에서는 독립 3상 구조를 갖는 이중공극형 영구자석 동기전동기의 Y 및 Delta 결선에 따른 운전특성을 각각 수학적 모델링 하였으며 수학적 모델링을 기반으로 벡터 제어 기법을 적용하여 결선방식에 따른 운전특성을 실험을 통하여 비교 및 분석하였다.

본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NO.NRF-2013R1A1A1013670)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless dc motor for servo drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 5, pp. 986 - 996, Sep./Oct. 1991.
- [2] S. Morimoto, Y. Asano, and T. Kosaka, "Recent technical trends in PMSM," *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), 2014 International*, pp. 1997-2003, May 2014.
- [3] K. J. Jo. "Design and characteristic analysis of multi-phase motor," *Master's Thesis, Korea Maritime University*, Busan, Republic of Korea, 2007.
- [4] D. J. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, and J. A. Ferreira, "Ring-shaped transverse flux PM generator for large direct-drive wind turbine," *Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on*, pp. 61-66, Nov. 2009.
- [5] S. H. Hwang, D. J. Bang, J. M. Kim, and J. W. Park, "Vector control of multiple-module transverse flux PM generator for large-scale direct-drive wind turbines," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, pp. 2365-2372, Sep. 2011.
- [6] C. N. Heo, B. G. Jeong, S. H. Hwang, and D. J. Bang, "Double-sided air gap control of module-based permanent magnet synchronous machine for low-speed and high-torque application," *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015 9th International Conference on*, pp. 1603-1608, June 1-5, 2015.
- [7] C. N. Heo, S. H. Hwang, and D. J. Bang, "Current ripple reduction due to current measurement errors of independent three-phase permanent magnet synchronous machine with dual air-gap," *Future Energy Electronics Conference (IFEEC), 2015 IEEE 2nd International*, pp. 1-6, Nov. 2015.
- [8] C. N. Heo and S. H. Hwang, "Speed ripple reduction of independent three-phase permanent magnet synchronous motor considering unbalanced back-EMFs," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers.*, Vol. 30, No. 11, pp. 42-49, Nov. 2016.
- [9] S. H. Hwang, J. M. Kim, D. J. Bang, and J. W. Kim, "Control of independent multi-phase transverse flux linear synchronous motor based on magnetic levitation," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE*, pp. 2488-2491, Mar. 2014.
- [10] S. H. Hwang, D. J. Bang, and J. W. Kim, "Air gap control of multi-phase transverse flux permanent magnet linear synchronous motor by using independent vector control," *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), 2014 International*, pp. 2427-2432, May. 2014.
- [11] D. J. Bang and S. H. Hwang, "Wide air-gap control of multi-module permanent magnet linear synchronous motor without magnetic levitation windings," *Journal of Power Electronics.*, Vol. 16, No. 5, pp. 1773-1780, Sep. 2016.



허찬녕(許瓚寧)

1989년 12월 19일생. 2015년 경남대 전기공학과 졸업. 2017년 동 대학원 첨단공학과 졸업(석사). 2017년~현재 하이젠모터(주) 기술연구소 연구원.



황선환(黃善煥)

1978년 7월 15일생. 2004년 부산대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2011년~2012년 플로리다 주립대 CAPS 박사후연구원. 2012년~현재 경남대 전기공학과 조교수. 당 학회 편집위원/학술위원.