

# 기생 커패시턴스 변화 기반의 축 전압 저감 방법

## Mitigation Method of Shaft Voltage Based on the Variation of Parasitic Capacitance

임 준 혁\* · 박 준 규\* · 이 승 태\* · 정 채 림\* · 허 진\*

(Jun-Hyuk Im · Jun-Kyu Park · Seung-Tae Lee · Chae-Lim Jeong · Jin Hur)

**Abstract** - This study proposes the mitigation method of shaft voltage by varying the parasitic capacitance. First, the shaft voltage explained. Second, the parasitic capacitances causing shaft voltage are analyzed respect to geometry of motor and windings. Then, the equivalent circuit is established to obtain the shaft voltage and output torque characteristic and develop appropriate motor structure. Finally, simulation and experiment are conducted to verify that modified motor suppress the shaft voltage. This novel model does not require additional hardware.

**Key Words** : Bearing protection, Equivalent circuit, Parasitic capacitance, Shaft voltage

### 1. 서 론

인간의 노동력을 대체하고 효율적인 에너지 사용을 위해, 산업 분야 뿐 만 아니라 가전기기 및 전기자동차 등 전동기에 크게 의존하는 자동화기기의 사용이 증가하고 있다[1],[2]. 이에 따라 전동기의 내구성 및 신뢰성을 확보하여 전동기의 고장으로부터 인적, 물적인 피해 방지에 대한 요구 역시 증가하고 있다[3],[4]. 특히 전동기의 고장 중 상당 비율이 베어링의 고장에서 발생하는데, 전동기에서 베어링 고장의 주요한 원인 중 하나는 축 전압(Shaft voltage)에 의한 베어링의 전식으로, 전식에 의한 고장은 장기간에 걸쳐 베어링의 특성을 악화시켜 소음과 진동을 증가시킨다. 따라서, 소음과 진동에 민감한 가전기기, 전기 자동차 의료 및 방위 산업 등 일부 분야에서는 축 전압에 의한 베어링의 전식을 억제할 필요가 있다.

축 전압은 발생원인 및 측정 방법에 따라 크게 두 종류로 나뉘는데[5], 축과 금속제 프레임사이에서 발생하는 Frame-to-shaft voltage, 그리고 모터 축의 양단 사이에서 발생하는 End-to-end shaft voltage가 있다. 이 중 Frame-to-shaft voltage는 PWM (Pulse Width Modulation)방식의 인버터에서 발생하는 CMV (Common-Mode Voltage)가 기생 커패시턴스 성분에 의해 축에 유도되어 발생한다[6]-[8]. 또한, Shaft end-to-end voltage는 불균일한 자속에 의해 축에 기전력(electro motive force)이 유도되어 발생한다[5],[9]. 본 연구에서는 기생 커패시턴스의 결합을 통해 축에 유도되는 Frame-to-shaft voltage의

해석 및 저감 방법에 대해 다룬다.

베어링은 그림 1과 같이 외륜, 내륜, 그리고 볼로 구성되는데 모터가 회전 중일 때는 내부 구성 요소들 사이에 있는 윤활유로 인해서 베어링의 외륜과 내륜은 개방 회로와 같이 동작한다. 이 때 그림 2와 같이 베어링의 윤활유가 버틸 수 있는 문턱전압 이상의 전압이 축에 유도되면 윤활유가 파괴되고 방전가공(electric discharge machining) 효과가 발생하여 베어링을 마모시킨다. 또한 방전가공효과에 의해서 윤활유의 파괴속도가 점진적으로 증가하고 윤활유가 파괴된 부분에서는 베어링의 외륜, 내륜 그리고 볼이 단락되는 부분이 생겨 베어링과 모터 프레임을 통해 순환전류가 흐르게 되고 결론적으로 베어링을 파손시킨다[5],[7],[9],[10]. 따라서 베어링 보호를 통해 전동기의 수명을 향상시키기 위해서 축 전압 억제방법에 대한 연구가 필요하다.

기존에 다양한 축 전압 저감 방법들이 제안되었다[11]-[13]. 세라믹 베어링을 이용하는 방법은 베어링의 외륜과 내륜을 효과적으로 절연시킨다는 장점이 있으나[11], 세라믹 베어링은 기존의 금속 베어링에 비해 단가가 상대적으로 높고 내구도가 낮다는 단점이 있다. 브러시를 이용하여 축을 접지 시켜 축 전압을 억제하는 방법 또한 제안 되었으나[12], 브러시는 사용 중 마모가 되기 때문에 수명이 한정적이라는 문제가 있다. CMV를 저감하기 위해 필터 및 회로를 설치하여 축 전압의 발생원을 억제할 수 있으나[13], 이 방법은 추가적인 하드웨어가 필요하기 때문에 비용 면에서 불리하다.

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 권선 형태의 변경을 통해 기생 커패시턴스 성분을 조정함으로써 기생 커패시턴스의 결합에 의해 발생하는 Frame-to-Shaft Voltage를 저감하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 일반 베어링을 그대로 사용하면서 설계 단계에서 추가적인 하드웨어나 복잡한 알고리즘 없이 축 전압을 저감할 수 있다. 이를 위해 각 기생 커패시턴스 성분

† Corresponding Author : Jin Hur, Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University, Korea.  
E-mail: jinhur@inu.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University, Korea.

Received : November 9, 2017; Accepted : March 26, 2018

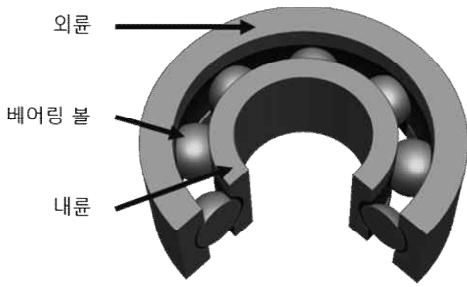


그림 1 베어링의 구성요소.  
Fig. 1 Components of bearing.

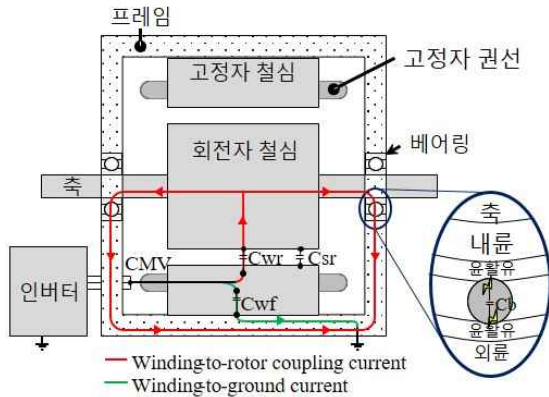


그림 2 축 전압으로 인한 베어링의 파괴.  
Fig. 2 bearing fault by shaft voltages.

들의 변화를 권선의 배치에 따라 어떻게 변화하는지 등가회로를 이용하여 분석하였고 기생 커패시턴스 성분을 조정하여 축 전압을 저감시킬 수 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 기생 커패시턴스 분석 및 등가회로모델

최근의 많은 영구자석 동기 전동기는 PWM방식의 인버터를 이용해 구동된다. 그러나 PWM기반 제어의 특성상, 이상적인 다상 교류 전원에선 발생하지 않는 CMV가 발생한다[7]. CMV는 커패시턴스에 축 전압으로 유도된다. 따라서, 축 전압을 분석하고 저감시키기 위해 다음과 같은 커패시턴스 기본 수식인 식 (1)을 이용하여 모터 내부의 기생 커패시턴스를 각각에 대해 도출하였다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 커패시턴스를 나타내며  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전율,  $\epsilon_r$ 은 상대 유전율,  $A$ 는 도체 평판의 면적, 그리고  $d$ 는 도체 평판 사이의 거리다.

모터를 구성하는 도체는 축, 회전자, 고정자, 베어링, 프레임, 그리고 권선이 있으며 이 요소들은 모두 서로 기생 커패시턴스를

유발하지만, 설계 단계에서 기하학적인 형상을 고려하여 상호간의 커패시턴스 수치를 조절하기 용이한 고정자, 회전자, 그리고 권선 사이의 커패시턴스만을 모델링하여 변수로 이용했다.

### 2.1 권선-고정자 커패시턴스( $C_{ws}$ )

권선과 고정자 철심 사이의 커패시턴스를  $C_{ws}$ 로 정의하였다. 권선의 표면은 절연 처리가 되어 고정자 철심과 전기적으로 절연되어 있다. 즉, 그림 3과 같이 권선이 고정자 철심에 접촉되는 면적을 커패시턴스가 작용하는 면적으로 생각할 수 있는데 이 면적은 권선이 고정자 철심을 둘러싸는 면적을 통해 쉽게 구할 수 있다. 권선과 고정자 철심 사이에 절연지나 기타 절연체를 씌워 권선을 감을 수 있으며 이 때 고정자 철심과 권선사이의 거리는 이 절연체의 두께로 치환될 수 있다. 따라서, 고정자 철심과 권선의 형태 및 배치와 절연체를 고려한 커패시턴스  $C_{ws}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{ws} = \frac{S}{3} \epsilon_0 \epsilon_{in} \left( \frac{2(W_h \times L_{stk})}{W_{in}} + \frac{2(W_h \times W_t)}{W_{in}} \right) \quad (2)$$

여기서  $S$ 는 슬롯의 수,  $W_h$ 는 고정자 철심과 접하는 코일의 높이,  $W_t$ 는 고정자 철심과 접하는 코일의 길이,  $W_l$ 는 치의 너비,  $W_{in}$ 은 절연체의 너비를 포함하는 권선과 전기자 철심 사이의 거리,  $\epsilon_{in}$ 은 절연체의 유전율이며,  $L_{stk}$ 는 코일과 접하는 적층 길이이다.

### 2.2 고정자-회전자 커패시턴스( $C_{sr}$ )

고정자와 회전자 사이에 존재하는 기생 커패시턴스를  $C_{sr}$ 로 정의하였다.  $C_{sr}$ 을 간단하게 계산하기위해 슬롯 오프닝과 전동기의 형상에 의한 돌극성을 무시하였다. 따라서 고정자와 회전자는 그림 4와 같은 원통형 구조를 가지게 되고  $C_{sr}$ 은 원통형 구조의 커패시턴스를 계산하는 수식을 이용하여 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 회전자와 고정자 철심이 서로 마주보는 면이 평판에 해당하며 모터의 공극은 평판 사이의 거리에 해당한다.

$$C_{sr} = \frac{2\pi \epsilon_0 L_{stk}}{\ln \frac{R_s}{R_r}} \quad (3)$$

여기서  $R_s$ 는 고정자의 내경,  $R_r$ 은 회전자의 외경이다.

### 2.3 권선-회전자 커패시턴스( $C_{wr}$ )

$C_{wr}$ 은 권선과 회전자 사이의 기생 커패시턴스다. 권선은 고정자 내부에 있는 권선과 엔드 권선(End Winding)을 나눠서 고려하도록 한다. 따라서, 그림 5(a)와 같이 고정자 내부의 권선과 회전자 사이의 커패시턴스를  $C_{swr}$ , 엔드 권선과 회전자 사이의 커패시턴스를  $C_{ewr}$ 로 정의하였다.

$C_{swr}$ 은 그림 5(b)와 같이 슬롯 오프닝을 통해 권선과 회전자 사이에서 발생하는 커패시턴스다. 권선과 회전자의 마주보는 두 면이 평판 커패시터의 두 평판이라고 볼 수 있으며 평판사이의 거리는 슬롯 오프닝을 통한 거리다. 이러한 변수들을 고려하여 고정자내 권선과 회전자 철심 사이의 커패시턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{swr} = \frac{\frac{S}{3} \epsilon_0 W_d L_{stk}}{R_w - R_r} \quad (4)$$

여기서  $W_d$ 는 슬롯 오프닝의 너비를 나타내며  $R_r$ 는 중심으로부터 권선까지의 반지름을 나타낸다.

엔드 권선과 회전자 사이의 커패시턴스  $C_{ewr}$ 은 그림 5(c)와 같다. 엔드 권선의 경우 형태를 특정하기가 어렵기 때문에 동심원 형태의 원통형 커패시터로 가정하고 모델링하였고, 평판 사이의 거리는 커패시턴스가 최대가 되도록 중심으로부터 엔드 권선까지의 거리가 최소가 되는 길이를 기준으로 하였다. 이 때  $C_{ewr}$ 은

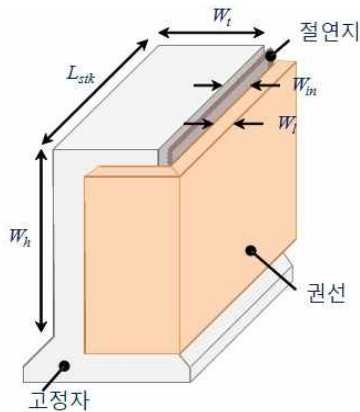


그림 3 고정자와 권선의 구조.  
Fig. 3 Configuration of stator and windings.

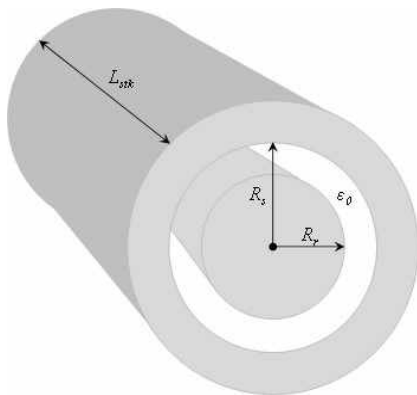
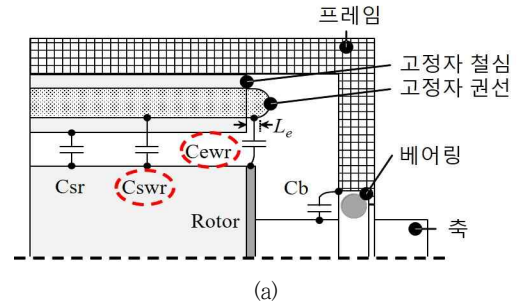


그림 4 회전자와 고정자의 구조  
Fig. 4 Configuration of rotor and stator

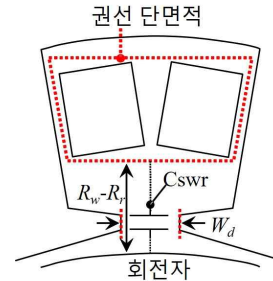
다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{ewr} = \frac{4\pi\epsilon_0 L_e}{3 \ln \frac{R_s + R_w}{2R_r}} \quad (5)$$

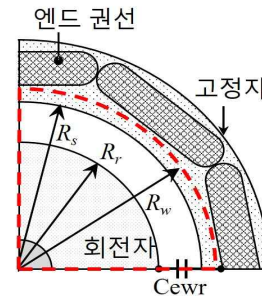
여기서  $L_e$ 는 고정자로부터 노출된 권선의 두께를 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

그림 5 회전자와 권선의 구조, (a)  $C_{wr}$ 의 발생 원리, (b)  $C_{swr}$ , (c)  $C_{ewr}$ .

Fig. 5 Structures of rotor and winding. (a) Mechanism of occurrence of  $C_{wr}$ , (b)  $C_{swr}$ , (c)  $C_{ewr}$ .

## 2.4 등가회로 모델

[6]에서 Frame-to-shaft voltage와 End-to-end shaft voltage 분석을 위한 등가회로모델을 제안하였다. 본 연구에서는 Frame-to-shaft-voltage만 고려하였기 때문에 기생 커패시턴스의 결합에 의한 축 전압 분석 등가회로모델을 그림 6에 나타내었

다. 이 등가회로 모델을 바탕으로  $V_{sh}$ 는 (6)과 같이  $C_{sr}$ ,  $C_b$ , 그리고  $C_{wr}$ 에 대한 수식으로 나타낼 수 있고, 식 (6)을 통해  $V_{sh}$ 는  $C_{wr}$ 에 비례하고  $C_{sr}$ 과  $C_b$ 에는 반비례하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 CMV는 (7)과 같이 각 상전압의 평균값으로 구할 수 있다.

$$V_{sh} = \frac{CMV}{\frac{C_{sr} + C_b}{3C_{wr}} + 1} \quad (6)$$

$$CMV = \frac{V_{a,gnd} + V_{b,gnd} + V_{c,gnd}}{3} \quad (7)$$

### 3. 축 전압 저감을 위한 분석적 접근방법

축 전압은 기생 커패시턴스 성분들의 결합을 통해 축에 전달되는 전압이다. 따라서 기생 커패시턴스의 영향을 축소하여 축에 전달되는 전압을 저감하기 위해 기생 커패시턴스 변화에 따른 축 전압 및 토크특성을 분석하였다. 커패시턴스 조정에 따른 축 전압의 변화는 SIMULINK프로그램을 이용하여 등가회로를 구성하여 분석하였고 토크특성은 유한요소해석 기반의 ANSYS MAXWELL프로그램을 이용하여 분석하였다.

### 3.1 기생 커패시턴스 변화에 따른 모터 형상 결정

세 종류의 기생 커패시턴스가 실제로 축 전압에 미치는 영향을 알아보기 위해 세 종류의 커패시턴스를 변화 시켜 보면서 축 전압과 모터 출력 변화를 확인하였다. 변수는 위에서 구한 세 가지 커패시턴스( $C_{sr}$ ,  $C_{wr}$ ,  $C_{ws}$ )며, 식 (6)에서 볼 수 있듯이, 베어링 내부 커패시턴스인  $C_b$ 또한 축 전압에 영향을 미치지만[6], 베어링은 규격화된 제품이므로 변수에서 제외했다. 각 모델들은 축 전압의 특성을 분석하기 위해 권선의 형태를 변경하여 커패시턴스를 조정하였고 모든 모델의 점적률은 동일하게 유지하였다.

$C_{ws}$ ,  $C_{sr}$ , 그리고  $C_{wr}$ 은 모터의 형상치수에 따라서 크기가 결정된다. 각 기생 커패시턴스 성분의 변화에 따른 권선 및 회전자 형태를 그림 7에 나타내었다. 먼저, 그림 7(a)에  $C_{ws}$ 를 변화시키기 위한 모델을 나타내었다. 권선과 고정자 사이의 거리를 변수로 지정하고 변수에 따른  $C_{ws}$  및  $V_{sh}$ 의 특성비교를 위해 4가지 모델을 분석하였다. 4가지 모델( $C_{ws-1}$ ,  $C_{ws-2}$ ,  $C_{ws-3}$ ,  $C_{ws-4}$ )에 대한 형상치수의 변화는 표 1에 나타내었다. 그리고 그림 7(b)에  $C_{sr}$ 을 변화시키기 위한 모델을 나타내었다.  $C_{sr}$ 의 변화에 따른 특성 분석을 위해서는 고정자와 회전자 사이의 거리가 달라져야 하는데 본 연구에서는 고정자 부분은 그대로 유지하고 회전자의 직경을 변수로 지정하였다. 회전자 직경 변화에 따른 4가지 모델( $C_{sr-1}$ ,  $C_{sr-2}$ ,  $C_{sr-3}$ ,  $C_{sr-4}$ )을 분석하였고 이에 따른 형상치수의 변화는 표 2에 나타내었다. 마지막으로 그림 7(c)에  $C_{wr}$ 을 변화시

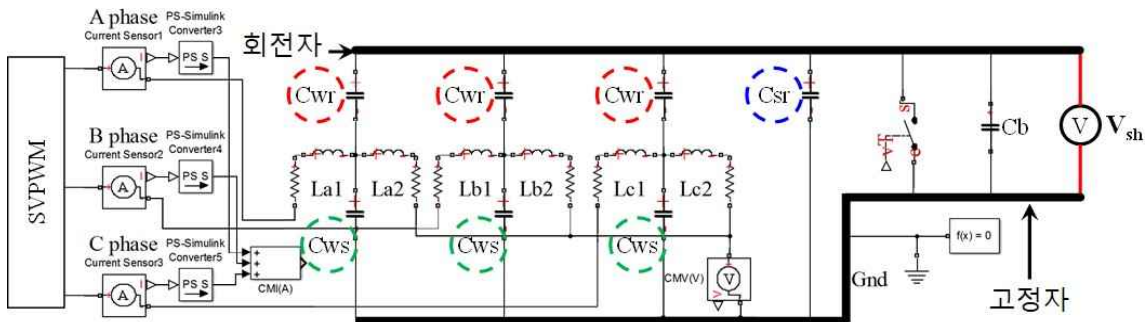


그림 6 기생 커패시턴스를 포함한 등가회로 모델.

Fig. 6 Equivalent circuit model contains parasitic capacitance.

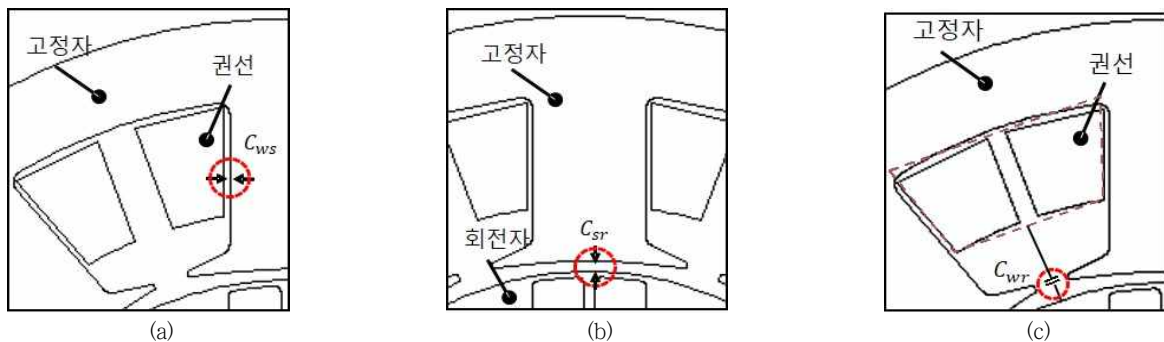


그림 7 기생 커패시턴스 변경에 따른 권선 형태.(a)  $C_{ws}$  변화 모델, (b)  $C_{sr}$  변화 모델, (c)  $C_{wr}$  변화 모델.

Fig. 7 Different type of models according to change in, (a)  $C_{ws}$ , (b)  $C_{sr}$ , (c)  $C_{wr}$ .

표 1  $C_{ws}$  변화에 따른 모터의 형상치수

Table 1 Motor geometry parameters according to variation of  $C_{ws}$

항목	$R_s$ (mm)	$R_r$ (mm)	$R_w$ (mm)	$W_d$ (mm)	$W_h$ (mm)	$W_l$ (mm)	$W_{in}$ (mm)	$H$ (mm)	$L_{stk}$ (mm)	$L_e$ (mm)	$S$
$C_{ws\_1}$	28	27	32.7	3	12	6.5	0.5	8.28	52.6	6	9
$C_{ws\_2}$	28	27	32.7	3	12	6.5	1.0	9.77	52.6	6	9
$C_{ws\_3}$	28	27	32.7	3	12	6.5	1.5	10.87	52.6	6	9
$C_{ws\_4}$	28	27	32.7	3	12	6.5	2.0	13.16	52.6	6	9

표 2  $C_{sr}$  변화에 따른 모터의 형상치수

Table 2 Motor geometry parameters according to variation of  $C_{sr}$

항목	$R_s$ (mm)	$R_r$ (mm)	$R_w$ (mm)	$W_d$ (mm)	$W_h$ (mm)	$W_l$ (mm)	$W_{in}$ (mm)	$H$ (mm)	$L_{stk}$ (mm)	$L_e$ (mm)	$S$
$C_{sr\_1}$	28	27	32.7	3	12	6.5	0.5	8.28	52.6	6	9
$C_{sr\_2}$	28	27.1	32.7	3	12	6.5	0.5	9.77	52.6	6	9
$C_{sr\_3}$	28	27.2	32.7	3	12	6.5	0.5	10.87	52.6	6	9
$C_{sr\_4}$	28	27.3	32.7	3	12	6.5	0.5	13.16	52.6	6	9

표 3  $C_{wr}$  변화에 따른 모터의 형상치수.

Table 3 Motor geometry parameters according to variation of  $C_{wr}$

항목	$R_s$ (mm)	$R_r$ (mm)	$R_w$ (mm)	$W_d$ (mm)	$W_h$ (mm)	$W_l$ (mm)	$W_{in}$ (mm)	$H$ (mm)	$L_{stk}$ (mm)	$L_e$ (mm)	$S$
$C_{wr\_1}$	28	27	34.2	3	7.79	8.93	0.5	8.28	52.6	6	9
$C_{wr\_2}$	28	27	32.7	3	9.3	7.19	1.0	9.77	52.6	6	9
$C_{wr\_3}$	28	27	31.6	3	10.39	7.19	1.5	10.87	52.6	6	9
$C_{wr\_4}$	28	27	29.3	3	11.91	4.65	2.0	13.16	52.6	6	9

키기 위한 모델을 나타내었다.  $C_{wr}$ 의 변화에 따른 특성 분석을 위해서 권선과 회전자 사이의 거리를 변수로 지정하였고 변수에 따른 특성 분석을 위해 4가지 모델 ( $C_{wr\_1}$ ,  $C_{wr\_2}$ ,  $C_{wr\_3}$ ,  $C_{wr\_4}$ )을 분석하였다. 여기서  $C_{wr}$ 변경에 따른  $C_{sr}$ 의 변화를 막기 위해서 회전자의 직경은 유지하고 권선의 위치만 변경하였다. 4가지 모델에 대한 모터의 형상치수 변화는 표 3에 나타내었다.

### 3.2 기생 커패시턴스 성분 변화에 따른 축 전압과 출력 토크의 특성 변화

그림 8과 9는 각각  $C_{ws}$ ,  $C_{sr}$ ,  $C_{wr}$ 의 변화에 따른 축 전압 특성 변화 및 토크 특성변화의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 축 전압 저감을 위한 가장 적절한 방법을 도출하기 위해서 각각의 기생 커패시턴스 성분이 축 전압 및 토크특성에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 8(a)는  $C_{ws}$ 의 변화에 따른  $V_{sh}$ 는 변화를 나타낸 것이다.  $C_{ws}$ 는  $V_{sh}$ 에 큰 영향을 주지 않으며, 이는 식 (6)에서  $V_{sh}$ 이  $C_{ws}$ 를 변수로 갖지 않는다는 사실과도 일치한다. 또한  $C_{ws}$ 는 토크 특성에도 큰 영향을 미치지 않는 것을 그림 9 (a)을 통해 확인할 수 있다.

그림 8의 (b)와 (c)는 각각  $C_{sr}$ 과  $C_{wr}$ 의 변화에 따른 축 전압

의 변화를 보여준다.  $C_{sr}$ 이 증가하면  $V_{sh}$ 는 감소하는 결과를 볼 수 있으며 반대로  $C_{wr}$ 이 증가하면  $V_{sh}$ 가 같이 증가하는 결과를 볼 수 있다. 특히  $C_{sr}$ 은  $C_{wr}$ 로부터 독립적이지 않아  $C_{sr}$ 이 증가하면  $C_{wr}$ 역시 증가하지만, 그럼에도 불구하고  $C_{sr}$ 의 증가에  $V_{sh}$ 가 감소한다. 이는  $C_{sr}$ 의 증가가  $V_{sh}$ 의 저감에 가장 큰 효과를 볼 수 있다는 사실을 의미한다. 그러나 그림 9(b)에서와 같이, 공극 길이 감소를 통한  $C_{sr}$ 의 증가가 평균 출력 토크를 감소시키기 때문에  $V_{sh}$  저감을 위한 변수로 부적합하다고 판단하였다.

따라서 토크특성에 영향을 미치지 않고  $V_{sh}$ 를 저감할 수 있는  $C_{wr}$ 을 가장 적절한 변수로 결정을 하였고  $C_{wr}$ 의 영향을 축소하기 위해 그림 7(c)에서와 같이, 권선을 고정자 바깥 부분으로 치우쳐 감는 방법을 제안한다.

## 4. 결과 및 논의

먼저, 식 (2)-(5)의 검증은 위해 표 4에서 기생 커패시턴스 성분 분들의 계산 값과 측정값을 비교하였고 계산 값과 측정값의 적은 오차(약 5% 이내)를 통해 기생 커패시턴스 수식 (2)-(5)의 정확도를 검증하였다. 3장에서 도출한 제안방법인 권선과 회전자 사이의 거리를 변경해  $C_{wr}$ 를 조정하여 본 장에서는  $V_{sh}$ 가 저감되는

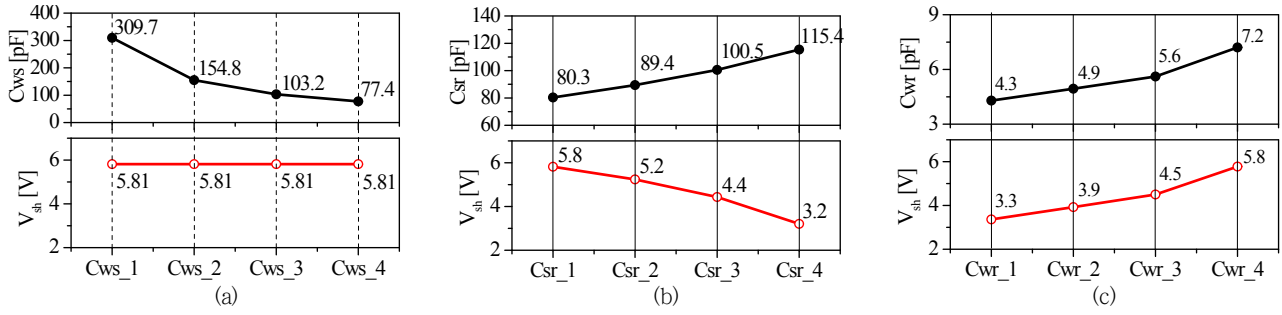


그림 8 각 기생 커패시턴스에 의한  $V_{sh}$ 의 변화. (a)  $C_{ws}$ 에 따른 변화. (b)  $C_{sr}$ 에 따른 변화. (c)  $C_{wr}$ 에 따른 변화.

Fig. 8 Variation of  $V_{sh}$  according to (a) variation of  $C_{ws}$ , (b) variation of  $C_{sr}$ , (c) variation of  $C_{wr}$ .

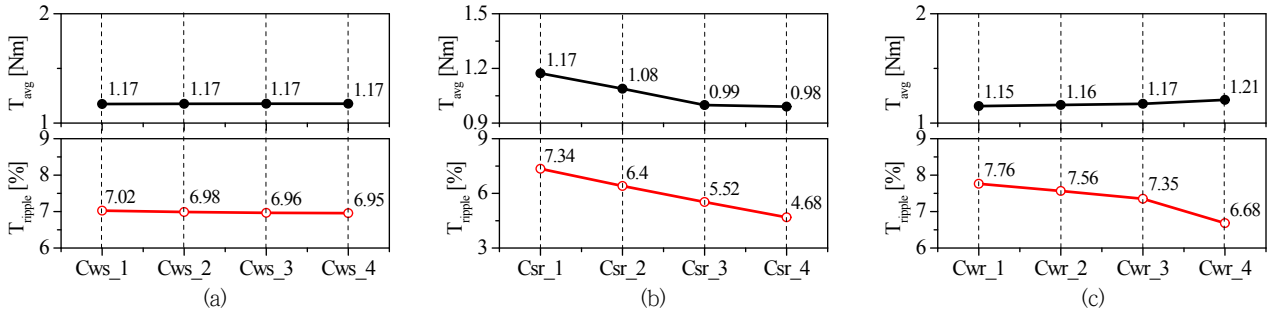


그림 9 각 기생 커패시턴스에 의한  $T_{avg}$ 와  $T_{ripple}$ 의 변화. (a)  $C_{ws}$ 에 따른 변화. (b)  $C_{sr}$ 에 따른 변화. (c)  $C_{wr}$ 에 따른 변화.

Fig. 9 Variation of  $T_{avg}$  and  $T_{ripple}$  according to (a) variation of  $C_{ws}$ , (b) variation of  $C_{sr}$ , (c) variation of  $C_{wr}$ .

표 4 기생 커패시턴스.

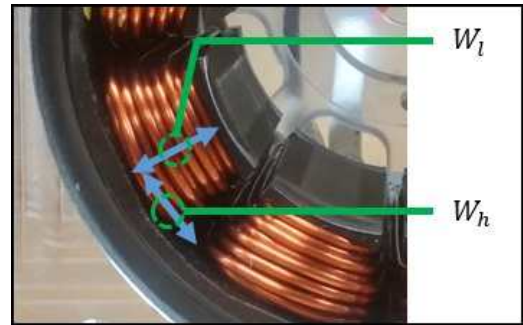
Table 4 Parasitic capacitance

항목	계산값(pF)	측정값(pF)	오차(%)
$C_{ws}$	156.449	149.8	3.27
$C_{wr}$	7.506	7.1	5.41
$C_{sr}$	87.850	90.5	2.92
$C_b$	-	65.7	-

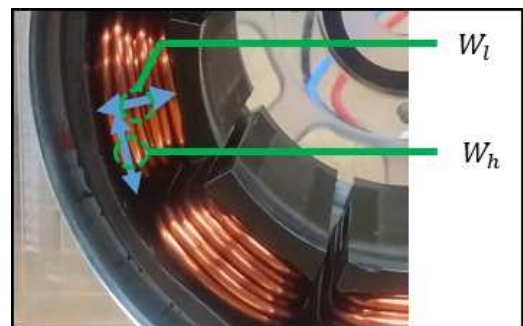
것을 등가회로 모델 및 FEM 시뮬레이션을 통해서 확인하였고 실험을 통해 이를 검증하였다. 6극 9슬롯 모터가 시뮬레이션 및 실험에 사용되었고 세부적인 모터의 형상치수 및 특성은 표 5에 나타내었다.

그림 10은 기준모델 및 제안모델을 나타낸다. 먼저 그림 10(a)는 본 연구의 기준모델인 권선의 형태를 변경하지 않은 기본모델이고 이때의  $C_{wr}$ 을  $C_{wr,n}$ 으로 정의하였다. 그리고 그림 10(b)는 본 논문에서 제안하는 방법을 적용한 모델로, 고정자의 외곽 쪽으로 권선을 최대한 치우쳐져 감은 형태이다. 이렇게 권선의 배치변경을 적용한 모델의  $C_{wr}$ 은  $C_{wr,m}$ 으로 정의하였다.

기준모델과 제안모델에 대한  $C_{wr,n}$ 과  $C_{wr,m}$ 값을 구하기 위해 시뮬레이션과 실험에서 사용된 모터의 형상치수를 표 6에 나타내었다. 기준모델의 형상치수를 기반으로 제안방법을 적용한 모델의 시뮬레이션을 수행하였고 그에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 11에 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 축 전압 등가회로모델을 이



(a)



(b)

그림 10 기본모델과 제안모델 구조. (a)  $C_{wr,n}$ 모델, (b)  $C_{wr,m}$ 모델.

Fig. 10 Structures of (a)  $C_{wr,n}$ , (b)  $C_{wr,m}$ .



표 5 모터 형상치수 및 특성.

Table 5 Specifications and dimensions of the motor.

분류	항목	단위	값
입출력 특성	정격속도	rpm	3500
	정격토크	N·m	1.1
	정격전력	W	400
	입력전압	V <sub>dc</sub>	60
인버터	스위칭 주파수	kHz	20
베어링	윤활유의 유전율	-	2
	베어링의 볼 수	-	8/7
	베어링 공차	mm	0.010
	베어링 볼 직경	mm	2.975
구조 및 형상	적층길이	mm	52.6
	공극길이	mm	1
	회전자 외경	mm	54
	고정자 내경	mm	56
	고정자 외경	mm	100
	슬롯수	-	9
	극수	-	6
권선	점적률	%	32
	상당턴수	-	72

표 6 C<sub>wr,n</sub>과 C<sub>wr,m</sub> 대한 시뮬레이션 및 실험 모델의 형상치수.

Table 6 Motor geometry parameters according to variation of C<sub>wr,n</sub> and C<sub>wr,m</sub>.

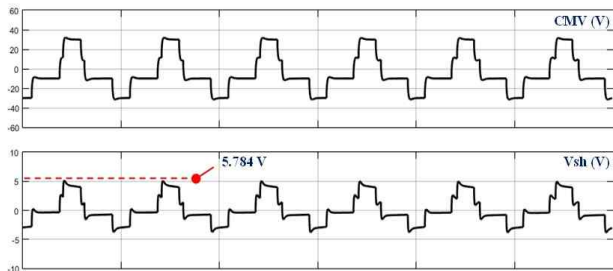
항목	시뮬레이션		실험	
	C <sub>wr,n</sub>	C <sub>wr,m</sub>	C <sub>wr,n</sub>	C <sub>wr,m</sub>
R <sub>s</sub> (mm)	28	28	28	28
R <sub>r</sub> (mm)	27	27	27	27
R <sub>w</sub> (mm)	29.3	34.2	30.1	34.5
W <sub>d</sub> (mm)	3	3	3	3
W <sub>b</sub> (mm)	11.91	7.79	12	7.9
W <sub>l</sub> (mm)	4.65	8.93	4.7	8.9
L <sub>stk</sub> (mm)	52.6	52.6	52.6	52.6
L <sub>e</sub> (mm)	6	6	6	6
S	9	9	9	9

용하여 도출하였고 기준모델과 제안모델에 대한 CMV와 V<sub>sh</sub>의 파형을 비교하였다. 그 결과, V<sub>sh</sub>의 최대치가 5.784V에서 3.257V로 약 40% 감소하는 것을 확인하였다.

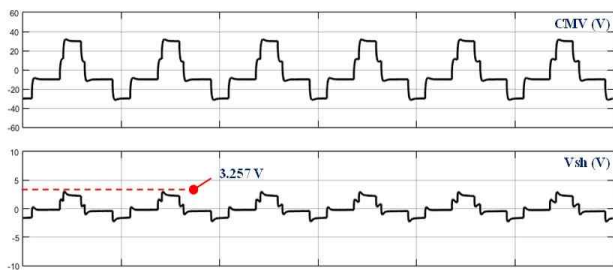
시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 시뮬레이션에서 사용된 모델의 형상치수와 조건을 실험모델에 동일하게 적용하였다. 그림 12는 기준모델과 제안모델에 대한 실험결과로, V<sub>sh</sub>가 5.816V에서 3.464V로 약 40% 정도로 저감됨을 실험적으로 검증하였다.

### 5. 결 론

본 논문에선 기생 커패시턴스를 조정하여 축 전압 저감 방법을 제안한다. 첫째로, 기생 커패시턴스 성분들은 모터의 형상을 고려하여 계산되었다. 둘째로, 등가 회로 모델 및 유한요소해석법을 이용하여 각 기생 커패시턴스 성분의 변화에 대한 축 전압과 출력 토크 특성을 분석하였다. 그 결과 C<sub>sr</sub>의 변화는 축 전압에 미치는 영향이 매우 적으며, C<sub>sr</sub>의 증가는 축 전압을 감소시키지만, 공극 길이를 증가시켜 출력 토크를 감소시키기 때문에 축 전압을 저감시키기 위한 변수로 부적합하다고 판단하였다. 따라서 출력 토크에 큰 영향을 미치지 않고 축 전압에만 영향을 미치는 C<sub>wr</sub>을 축 전압을 저감하기 위한 변수로 선정하였다. 분석된 기생 커패시턴스를 기반으로 추가적인 장치의 설치 없이 C<sub>wr</sub>을 감소시키기 위해 고정자 외곽 측에 권선을 집중적으로 배치하는 방법을 제안하였다. 그 결과, 본 연구에서 사용한 모델의 경우, 축 전압이 5.783V에서 3.257V로 저감되는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 제안한 방법은 점적률이 상대적으로 높은 모터일 수록 권선의 형태를 변경하기 어렵기 때문에 축 전압 감소 효과가 적다는 단점이 있지만, 축 전압 저감을 위해 제안방법은 모터의 설계 단계에서 고려될 수 있으며 추가적인 하드웨어나 복잡한 제어 알고리즘을 요구하지 않는다는 장점이 있다.



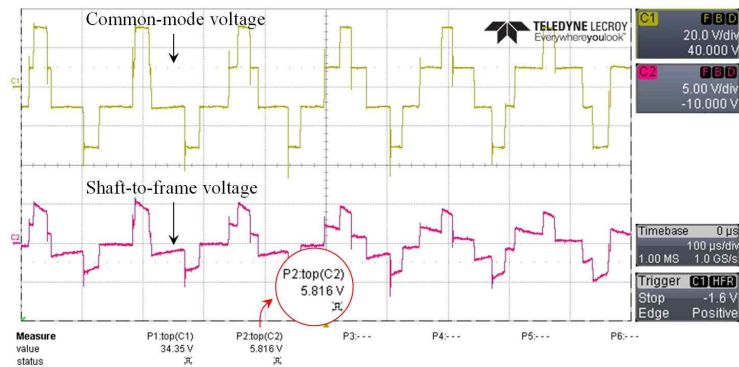
(a)



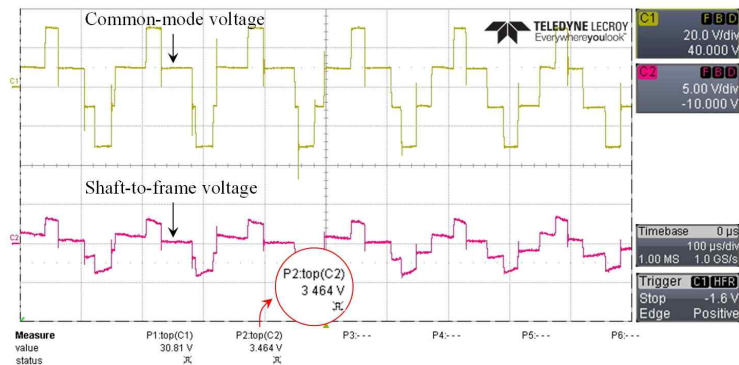
(b)

그림 11 등가회로 모델을 이용한 CMV와 V<sub>sh</sub>의 시뮬레이션 결과.(a) 기준모델(C<sub>wr,n</sub>모델), (b) 제안모델(C<sub>wr,m</sub>모델).

Fig. 11 Simulation results of CMV and V<sub>sh</sub> in (a) C<sub>wr,n</sub> model, (b) C<sub>wr,m</sub> model.



(a)



(b)

그림 12 실험을 통한 CMV와  $V_{sh}$  결과.(a)  $C_{ws_n}$  모델, (b)  $C_{ws_m}$  모델.

Fig. 12 Experimental results of CMV and  $V_{sh}$  in (a)  $C_{ws_n}$  model, (b)  $C_{ws_m}$  model.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 산업원천기술개발사업(No.10062426) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지효율향상사업(No. 20162010103940)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

### References

[1] M. Kimiabeigi, J. D. Widmer, R. Long, Y. Gao, J. Goss, R. Martin, T. Lisle, J. M. Soler Vizan, A. Michaelides, and B. Mecrow, "High-performance low-cost electric motor for electric vehicles using ferrite magnets," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, Jan. 2016.

[2] W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Bennett, and D. J. Atkinson, "Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA)," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 9, Sep. 2012.

[3] J. K. Park and J. Hur, "Detection of inter-turn and

dynamic eccentricity faults using stator current frequency pattern in IPM-type BLDC motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 3, Mar. 2016.

[4] J. K. Park, C. L. Jeong, S. T. Lee, and J. Hur, "Early detection technique for stator winding inter-turn fault in BLDC motor using input impedance," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, Jan./Feb. 2015.

[5] R. Singleton II, E. Strangas, and S. Aviyente, "The use of bearing currents and vibrations in lifetime estimation of bearings," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 13, no. 3, Jun. 2017

[6] V. Niskanen, A. Muetze, and J. Ahola, "Study on bearing impedance properties at several hundred kilohertz for different electric machine operating parameters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 5, Sep./Oct. 2014.

[7] J. K. Park, T. Wellawatta, S. Choi, and J. Hur "Mitigation method of the shaft voltage according to parasitic capacitance of the PMSM," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, Sep/Oct 2017.

[8] A. Muetze and A. Binder, "Calculation of circulating bearing currents in machines of inverter-based drive systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, Apr.



2007.

[9] U. T. Shami and H. Akagi, "Identification and discussion of the origin of a shaft end-to-end voltage in an inverter-driven motor," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1615-1625, JUN. 2010.

[10] J. K. Park, T. Wellawatta, Z. Ullah, and J. Hur, "New equivalent circuit of the IPM-type BLDC motor for calculation of shaft voltage by considering electric and magnetic fields," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, Sep./Oct. 2016.

[11] A. Muetze, and A. Binder "Don't lose your bearings," *IEEE Ind. Appl. Magazine*, vol. 12, no. 4, Jul/Aug. 2006.

[12] A. Muetze and H. W. Oh "Design aspects of Conductive Microfiber Rings for Shaft-Grounding Purposes," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 6, Apr. 2008.

[13] J. Adabi, A. A. Boora, F. Zare, A. Nami, A. Ghosh, and F. Blaabjerg, "Common-mode voltage reduction in a motor drive system with a power factor correction," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 3. Aug. 2011.

저 자 소 개



임 준 혁 (Jun-Hyuk Im)

2017년 공학 학사, 인천대학교 전기공학부.  
2017~현재, 인천대학교 대학원 전기공학부 석사과정.



박 준 규 (Jun-Kyu Park)

2011년, 공학학사, 울산대학교 전기공학부.  
2013년, 공학석사, 울산대학교 전기공학부.  
2017년, 공학박사, 울산대학교 전기공학부.  
2017~2018년, 인천대학교 전기공학부 강사 및 전자부품 연구원 Postdoctoral Research Associate.  
2018~현재, Univ. of Padova, Italy, Postdoctoral Research Associate.



이 승 태 (Seung-Tae Lee)

2012년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학 학사, 2013년~2015년, 울산대학교 대학원 전기공학부 졸업, 공학 석사. 2016~현재, 인천대 전기공학부 박사과정.



정 채 림 (Chae-Lim Jeong)

2012년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학 사, 2012년~2014, 울산대학교 대학원 전기공학부, 공학석사. 2016~현재, 인천대 전기공학부 박사과정.



허 진 (Jin Hur)

1995년, 공학석사, 한양대학교 전기공학부. 1999년, 공학박사, 한양대학교 전기공학부. 1999년~2000년, Texas A&M Univ. Post-doctoral Research Associate, 2000년~2001년, 한양대 연구교수. 2002년~2008년, 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장/책임연구원. 2008년~2015년, 울산대 전기공학부 부교수. 2015년~현재, 인천대학교 전기공학부 교수.