

Analysis of Shaft Voltage in Dual Stator SPMSM Using Parasitic Capacitance Equivalent Circuit

Jin-Ho Choi, Cheon-Ho Song, Young-Jae Kang, Jae-Hyeon Kim, and Myung-Seop Lim*

Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence), Hanyang University, Seoul 04763, South Korea

(Received 6 April 2026, Received in final form 26 May 2026, Accepted 26 May 2026)

Drive motors for electric propulsion require high performance and high reliability. The dual stator surface permanent magnet synchronous motor provides high performance including high power density. However, analyzing shaft voltage of these motors is required to reduce the cause of bearing fault and to secure reliability. This paper proposes a mathematical modeling approach to analyze the shaft voltage characteristics of the dual stator surface permanent magnet synchronous motor. The shaft voltage is determined by the electrical circuit comprising the neutral point voltage and parasitic capacitances. The neutral point voltage is derived using the common-mode voltage and zero-sequence voltage from the dual inverter system. Parasitic capacitances are analytically formulated based on the motor geometry including winding to stator and stator to rotor capacitances. The proposed equivalent circuit model calculates the shaft voltage peak in a short time. This analytical method provides a theoretical basis for evaluating the shaft voltage and securing the reliability of dual stator motors.

Keywords : common-mode voltage, dual stator surface permanent magnet synchronous motor, neutral point voltage, parasitic capacitance, zero-sequence voltage

기생 정전용량 등가회로를 통한 이중 고정자 SPMSM 축전압 분석

최진호 · 송천호 · 강영재 · 김재현 · 임명섭*

한양대학교 미래자동차공학과(미래자동차-SW융합전공), 서울시 왕십리로, 222, 04763

(2026년 4월 6일 받음, 2026년 5월 26일 최종수정본 받음, 2026년 5월 26일 게재확정)

전기 추진용 구동 모터는 높은 성능과 신뢰성을 필요로 한다. 이중 고정자 표면 부착형 영구자석 동기 전동기는 높은 출력 밀도를 포함하여 우수한 성능을 제공한다. 그러나 베어링 고장의 원인을 저감하고 신뢰성을 확보하기 위해서는 해당 모터의 축전압에 대한 분석이 요구된다. 본 연구에서는 수식적 모델링 접근을 통해 이중 고정자 표면 부착형 영구자석 동기 모터의 축전압 특성을 분석하였다. 축전압은 중성점 전압과 기생 정전용량으로 구성된 전기적 회로에 의해 결정된다. 중성점 전압은 이중 인버터 시스템에서 발생하는 공통 모드 전압과 영상분 전압을 이용하여 도출된다. 기생 정전용량은 권선과 고정자 사이, 고정자와 회전자 사이의 정전용량을 포함하여 모터의 기하학적 형상을 바탕으로 수식적으로 정식화되었다. 제안된 등가회로 모델은 단시간 내에 축전압 피크 값을 계산한다. 이러한 해석적 방법은 이중 고정자 모터의 축전압을 평가하고 신뢰성을 확보하기 위한 이론적 기반을 제공한다.

주제어 : 공통 모드 전압, 이중 고정자 표면 부착형 영구자석 동기모터, 중성점 전압, 기생 정전용량, 영상분 전압

I. 서 론

최근 UAM 및 eVTOL과 같은 어플리케이션에서는 제한된 공간 내에서 전동기의 높은 전력 밀도 저소음 저진동 및 고효율 특성을 동시에 요구한다[1]. 해당 어플리케이션에 적합한 모터로 기존 단일 고정자 표면부착형 영구자석 동기모터(Surface-

mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 대비 뛰어난 성능을 보이는 이중 고정자 SPMSM의 필요성이 대두되고 있다. 이중 고정자 SPMSM은 별도의 회전자 요크 없이 두 개의 공극을 가지므로 높은 출력 밀도와 경량화에 유리하다. 또한 고장 상황 발생 시 나머지 건전한 권선계를 통한 독립 구동이 가능하여 시스템 신뢰성이 우수하다[2].

그러나 모터의 기계적 신뢰성을 확보하기 위해서는 베어링 고장 요소를 반드시 고려해야 한다. 전체 모터 고장의 40~70%가 베어링에서 발생하며 인버터 구동 환경에서의 베어링 전기 손상 문제는 수명을 좌우하는 핵심 요인이다[3,4].

PWM(Pulse-Width-Modulation) 인버터는 스위칭에 따라 고주파 공통 모드 전압을 발생시키며 이는 권선과 고정자 사이 기생 정전용량을 통해 회전자 축에 전달되어 축전압을 형성한다. 축전압이 윤활막의 절연 한계인 $10\sim15\text{ V}/\mu\text{m}$ 를 초과하면 방전 전류가 발생하여 베어링 수명 단축 및 시스템 신뢰성 저하를 초래한다. 따라서 본 연구에서는 이중 고정자 SPMSM의 구조적 특성을 반영한 기생 정전용량 및 중성점 전압을 수식적으로 모델링하고 이를 바탕으로 축전압 발생 특성을 정량적으로 분석하는 해석 기법을 제안한다.

기존의 축전압 관련 선행 연구는 주로 단일 공극 구조를 가지는 단일 고정자 3상 모터나 dual 3상 시스템을 대상으로 수행되었다. 이러한 전동기 시스템은 공통적으로 단일 공극 내에 형성되는 기생 정전용량 경로를 통해 축전압이 발생하는 기전을 가진다. 반면 본 연구에서 다루는 이중 고정자 모터는 내측 및 외측 고정자 사이에 회전자가 위치하는 이중 공극 구조를 가지며 전기적으로 독립된 두 세트의 고정자 권

선이 개별 인버터로 구동된다. 이에 따라 각각의 고정자에서 독립적으로 발생하는 공통 모드 전압 성분이 이중 공극의 기생 정전용량을 매개로 회전자에 복합적으로 유기되는 전압 분배 특성을 나타낸다. 따라서 기존의 일반적인 시스템과 차별화되는 구조적 특수성과 전기적 결합을 모두 반영한 정밀한 모델링이 필수적이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 본 논문에서 다룬 14극 12슬롯의 이중 고정자 SPMSM의 구조와 수학적 모델링을 다룬다. 제3장에서는 이중 고정자 SPMSM 인버터-모터 시뮬레이션을 구축한다. 그리고 공통 모드 전압, 영상분 전압, 그리고 중성점 전압에 대해 다루고, 인버터-모터 시뮬레이션 내에서 해당 성분들을 구하는 방식을 다룬다. 제4장에서는 모터 내의 기생 정전용량 회로의 종류에 대해 소개하고, 이전 장에서 다룬 공통 모드 전압과 기생 정전용량 회로로 이루어진 등가회로 구축을 통해 축전압 예측 모델을 설계 및 분석하며 제5장에서 결론을 제시한다.

II. 이중 고정자 SPMSM 수학적 모델링

이중 고정자 SPMSM은 기존 3상 모터 SPMSM과 형상적,

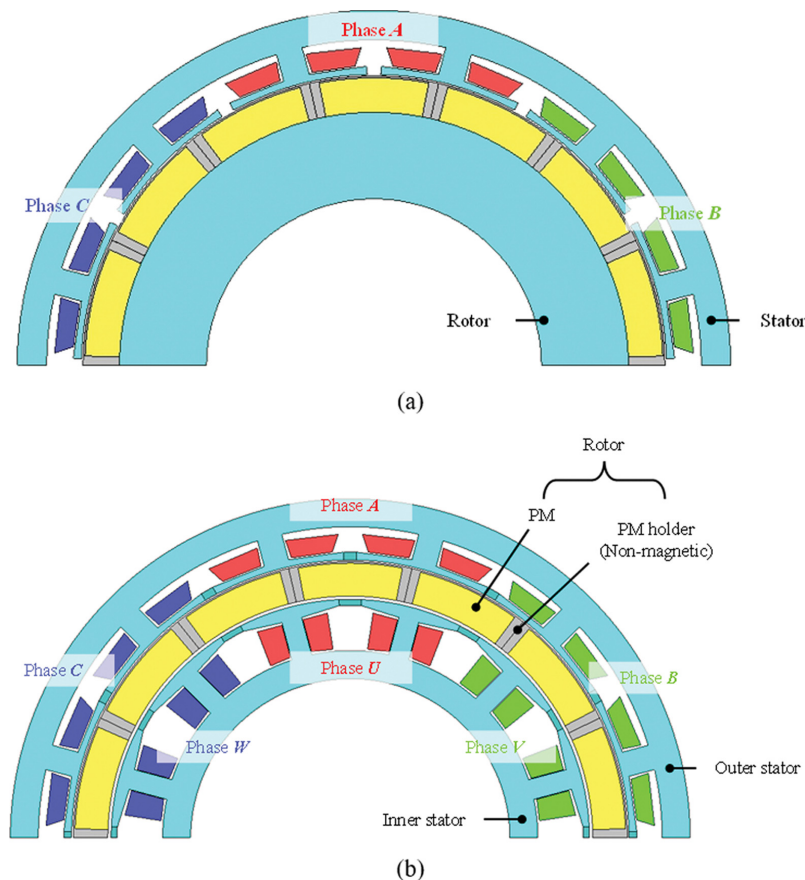


Fig. 1. (Color online) 14P12S SPMSM topology (a) Single stator SPMSM (b) Dual stator SPMSM.

Table I. Base model specification.

Classification	item	unit	Value
Power specifications	DC voltage	V_{DC}	500
	Rated phase current	A_{rms}	12
	Current density	A/mm^2	8.91
Motor performance	Max power	kW	15
	Rated speed	rpm	2600
	Pole / slot	-	14 / 12
Geometry	Outer stator outer radius	mm	204.4
	Inner stator outer radius	mm	143.8
	Rotor outer radius	mm	166.6
	Rotor inner radius	mm	145.8
	Stack length	mm	48.6
	Stator (Outer/Inner)		27PNX1350F
Material	PM	-	N42SH
	Bearing	-	6206ZZ
Winding	Number of parallel circuits	-	1
	Number of series turns per phase	-	160
	Fill factor (Outer/Inner)	%	37.0 / 38.5
	Phase resistance (Outer/Inner)	Ω	0.35 / 0.47

그리고 모터의 시스템적으로 다르다. 우선 형상적으로는 고정자, 회전자가 각각 한 개씩으로 구성되어 있는 기존 3상 SPMSM과 달리 두 개의 고정자와 한 개의 회전자로 이루어져 있다. Fig. 1(a) 같이 기존 3상 SPMSM은 고정자와 회전자가 각각 하나씩 존재한다. 이중 고정자 SPMSM의 경우는 Fig. 1(b)와 같이 고정자가 외측과 내측에 존재하고 그 사이에 회전자가 존재한다.

시스템적으로는 이중 고정자 SPMSM은 인버터 한 대 사용하는 기존 3상 모터 SPMSM과 달리 인버터 2대를 사용한다. 기존 3상 SPMSM 시스템의 경우, 인버터 한 대와 A, B, C 3상의 권선으로 구성된다. 이중 고정자 SPMSM의 경우, 권선 세트가 분리된 인버터 2대를 사용한다. 인버터 2대는 각각 회전자 외측 고정자에서는 A, B, C 3상을, 회전자 내측 고정자에서는 U, V, W 3상을 구동한다. 이는 시스템적으로는 dual 3상 모터 시스템과 같은 구조이나, 권선 세트가 공간적으로도 분리되어 있다는 점에서 dual 3상 모터 시스템과 차이를 보인다.

이중 고정자 SPMSM은 자석의 착자에 따라 N-N 타입과 N-S 타입으로 나눌 수 있다. 두 타입 모두 각 고정자에서 만들어내는 자속이 회전자를 방사 방향으로 통해서 흐르기 때문에, 별도의 자속 경로를 위한 요크 구조가 필요 없다. N-N 타입은 각 자석 층이 외측 고정자, 내측 고정자 각각과 상호작용하는 두개의 자석 층 구조로 이루어져 있다. 반면, N-S 타입은 상호작용을 위한 별도의 층 구조 없이 하나의 층으로 이루어

져 있어 출력 밀도 측면에서 N-N 타입보다 뛰어난 성능을 보인다. 본 논문에서는, N-S 타입의 14극 12슬롯 치집중권 이중 고정자 SPMSM의 경우를 검토하고자 한다. 검토할 모델의 형상은 Fig. 1(b)이고, 해당 모터의 사양은 Table I에 나타내었다.

이 단원에서는 이중 고정자 SPMSM의 쇠교자속, 전압 등을 수학적으로 모델링한다. 외측 고정자, 내측 고정자 각각의 self 인덕턴스 성분과 mutual 인덕턴스 성분, 고정자 권선 세트 사이에 발생하는 간섭 성분을 정의하고 이를 활용해 이중 고정자 SPMSM 모델링을 정립한다. 해당 모델링은 기본파를 기준으로 모델링하였다.

이중 고정자 SPMSM의 경우는 외측, 내측 고정자 총 6개의 상이 존재하므로 기존 3상과는 달리 6개의 인덕턴스 성분이 존재한다. 식(1)에 표현되어 있듯이, 외측, 내측 고정자 각 상들 사이에서 발생하는 self, mutual 인덕턴스, 또한 외측과 내측 전기자 사이에서 발생하는 간섭 성분이 존재한다. 수식들로 표현된 상 인덕턴스는 dqn 변환을 통해 회전자와 동기 속도로 회전하는 이중 고정자 SPMSM을 수학적으로 모델링하는 데 사용된다.

$$\begin{bmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \phi_U \\ \phi_V \\ \phi_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & M_{AU} & M_{AV} & M_{AW} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & M_{BU} & M_{BV} & M_{BW} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & M_{CU} & M_{CV} & M_{CW} \\ M_{UA} & M_{UB} & M_{UC} & L_{UU} & L_{UV} & L_{UW} \\ M_{VA} & M_{VB} & M_{VC} & L_{VU} & L_{VV} & L_{VW} \\ M_{WA} & M_{WB} & M_{WC} & L_{WU} & L_{WV} & L_{WW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{PM_A} \\ \phi_{PM_B} \\ \phi_{PM_C} \\ \phi_{PM_U} \\ \phi_{PM_V} \\ \phi_{PM_W} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 ϕ_n 은 n 상 쇄교자속, $\phi_{PM,n}$ 은 n 상 계자 쇄교자속, i_n 은 n 상 전류, L 은 같은 권선 세트간 자기 및 상호 인덕턴스, M 은 다른 권선 세트간 자기 및 상호 인덕턴스이다.

이중 고정자 SPMSM의 수학적 모델링은 A, B, C, U, V, W 총 6개의 상전압 방정식에서 dqn 변환을 통해 유도된다. 이중 고정자 SPMSM의 A, B, C, U, V, W 상전압 방정식은 (2)와 같이 표현되며 식을 풀어서 작성하면, 식(3)과 같이 6개의 상으로 표현된다.

$$[v_{ABC-UVW}] = R_a [i_{ABC-UVW}] + \frac{d}{dt} [\phi_{ABC-UVW}] \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ v_U \\ v_V \\ v_W \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \phi_U \\ \phi_V \\ \phi_W \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $v_{ABC-UVW}$, $i_{ABC-UVW}$, $\phi_{ABC-UVW}$ 는 각각 A, B, C, U, V, W 상 전압, 전류 쇄교자속 벡터이고, v_n 은 n 상 전압, R_a 는 상 DC저항, i_n 은 n 상 전류, 그리고 ϕ_n 은 n 상 쇄교자속이다.

$ABC-UVW$ 상으로 표현된 전압 방정식을 식(4)의 dqn 변환 행렬식을 활용하여 dqn 성분으로 변환할 수 있다. 이중 고정자 SPMSM의 경우 ABC 상과 UVW 상에 각각 동일한 dqn 변환 행렬식을 적용하며, 전체 변환 행렬 식은 식(5)와 같다. 변환 행렬을 사용하여 dqn 변환을 하게 되면, 내측 고정자 dqn 성분과 외측 고정자 dqn 성분, 총 6개의 성분으로 변환된다.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{dqn}(\theta) = \begin{bmatrix} T(\theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

변환 행렬 (5)를 사용하여 dqn 전압 방정식을 풀면 식(6)과 같이 정리된다.

$$[T_{dqn}][v_{ABC-UVW}] = [T_{dqn}]\left(R_a [i_{ABC-UVW}] + \frac{d}{dt} [\phi_{ABC-UVW}]\right) \quad (6)$$

$$[L_{dqn}] = [T_{dqn}][L_{ABC-UVW}][T_{dqn}]^{-1} \quad (7)$$

$$[i_{dqn}] = [T_{dqn}][i_{ABC-UVW}] \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} [T_{dqn}][\phi_{ABC-UVW}] = \omega \begin{bmatrix} \phi_{q_out} \\ -\phi_{d_out} \\ 0 \\ \phi_{q_in} \\ -\phi_{d_in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 식(7), (8), (9)를 이용하고, steady-state일 때, dqn 항의 시간에 대한 변화가 없다는 점을 이용하면 dq 축 전압 방정식은 식(10)과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} v_{d_out} &= R_a i_{d_out} - \omega \phi_{q_out} \\ v_{q_out} &= R_a i_{q_out} + \omega \phi_{d_out} \\ v_{d_in} &= R_a i_{d_in} - \omega \phi_{q_in} \\ v_{q_in} &= R_a i_{q_in} + \omega \phi_{d_in} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 i_{dqn} , L_{dqn} 은 각각 외측 고정자, 내측 고정자 dqn 축 전류 및 인덕턴스 행렬이고, v_{d,q_out} , i_{d,q_out} , ϕ_{d,q_out} 은 각각 외측 고정자 dq 축 전압과 전류 및 쇄교자속, v_{d,q_in} , i_{d,q_in} , ϕ_{d,q_in} 은 각각 내측 고정자 dq 축 전압과 전류 및 쇄교자속이다.

III. 이중 고정자 SPMSM 중성점 전압

모터에서 축전압을 일으키는 요소로는 모터 중성점의 전압과 기생 정전용량(Parasitic capacitance)이 있다. 그 중, 모터 중성점 전압을 구하기 위해선 공통 모드 전압(Common-mode voltage, CMV)과 영상분 전압(Zero-sequence voltage, ZSV)를 구해야 한다. 본 논문에서 제시된 전압 파형 결과는 공통적으로 6주기 구간의 시간 대역을 도식화하였다.

1. 공통 모드 전압(Common-mode voltage, CMV)

이중 고정자 SPMSM의 경우, 같은 전압원을 사용해 두 개의 개별 3상 전압원 인버터를 통해 구동된다. Fig. 2는 이중 고정자 SPMSM의 전압방정식을 기반으로 구축된 이중 고정자 SPMSM의 전체 모터-인버터 시스템이다. 전류 지령 기반으로 그에 필요한 전압을 각 세트의 인버터에서 외측, 내측 고정자에 각각 인가하고, 그에 따라 모터에 인가되고 있는 전류를 피드백 받는 구조로 구성된다. 각 인버터는 각각의 권선 세트별로 3상 권선을 가지고 있으며, 한 권선 세트는 A, B, C 상, 다른 한 권선 세트는 U, V, W 상에 관여한다. 이 두 권선 세트간의 위상각은 별도의 내측 고정자 위상 이동이 없을 경우 동일하며, 각 권선 세트는 전기적으로 분리되어 있다.

공통 모드 전압이란, 일반적인 3상 모터의 인버터에서 3개의 상이 있을 때, 이 상들의 전압이 서로 균형을 맞추지 못한 경우 발생하는 전압 성분이다. 이상적인 상황일 때, 해당

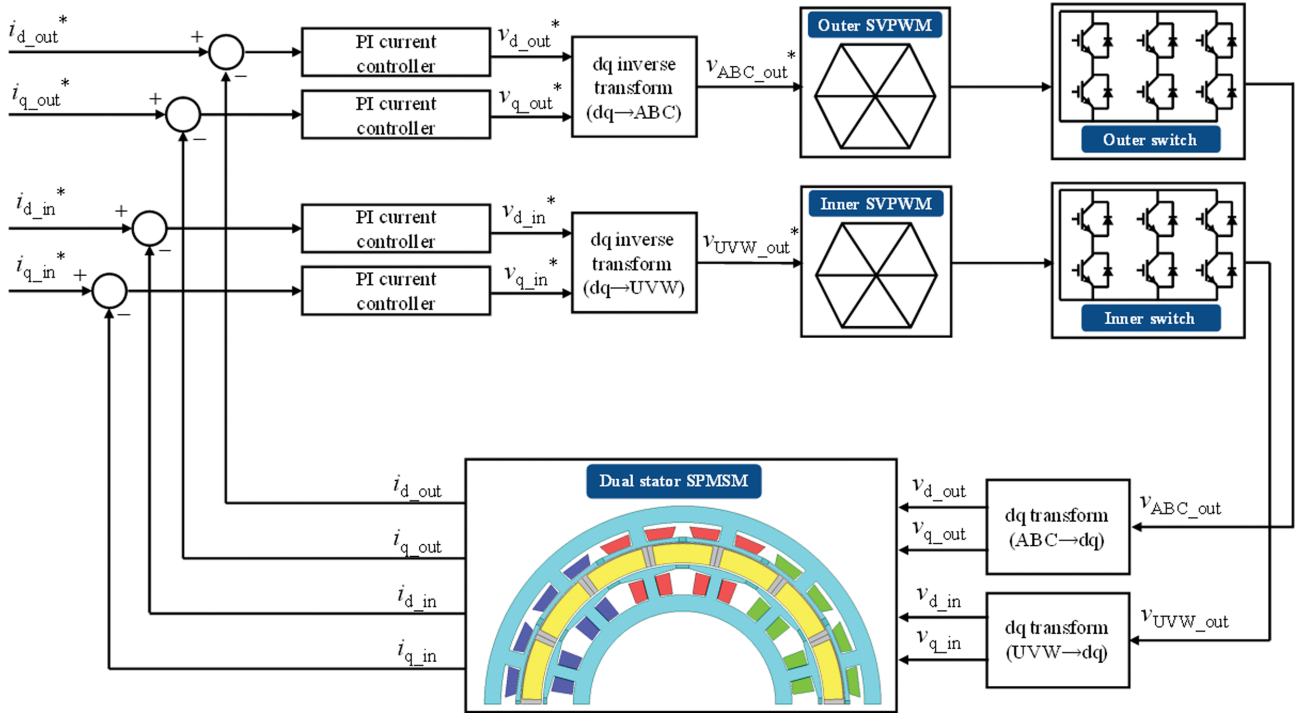


Fig. 2. (Color online) Dual stator SPMSM inverter-motor simulation.

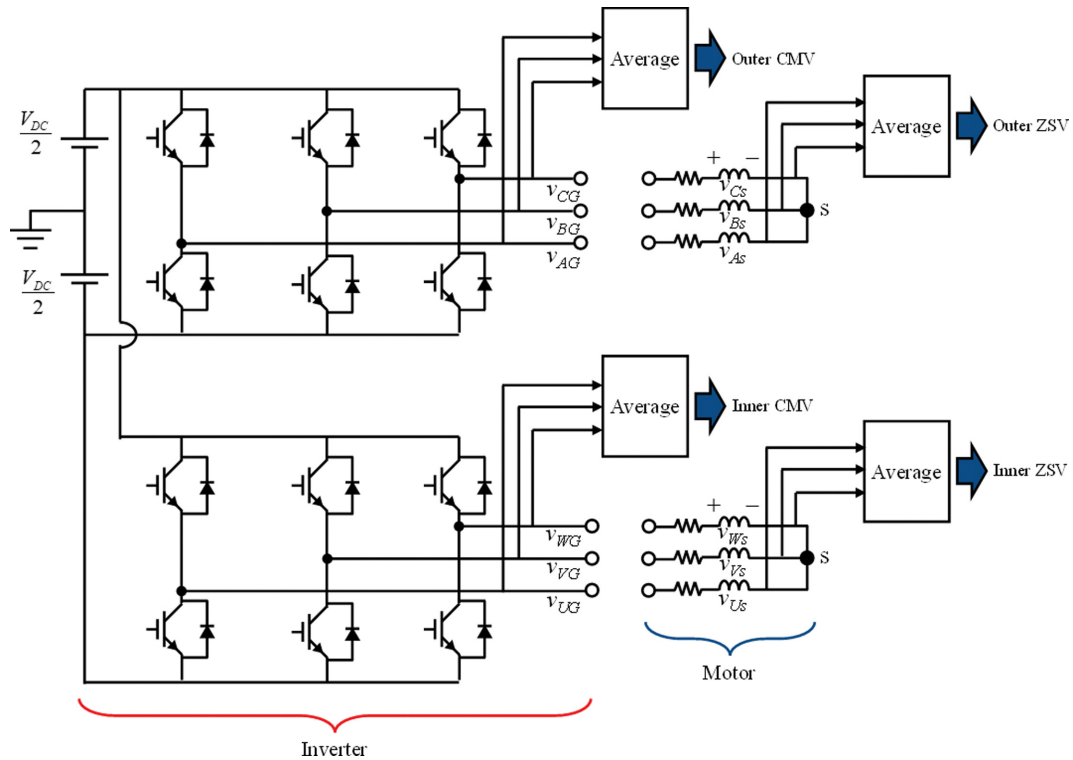


Fig. 3. (Color online) Common-mode voltage (CMV) and zero-sequence voltage (ZSV) in Dual stator SPMSM inverter-motor simulation.

시스템에서 스위칭 상태에 따라 상전압은 3상 균형을 이루는 반면, 극전압은 3상 균형을 이루지 못해 공통 모드 전압 성분으로 나타나게 되는 것이다. 일반 3상 모터와는 달리, 이중

고정자의 경우 각 권선 세트는 각각의 공통 모드 전압 성분을 가진다. Fig. 3은 내측, 외측 고정자 각 권선 세트를 구성하는 인버터 시스템과 모터 시스템을 표현한다. 각 권선 세

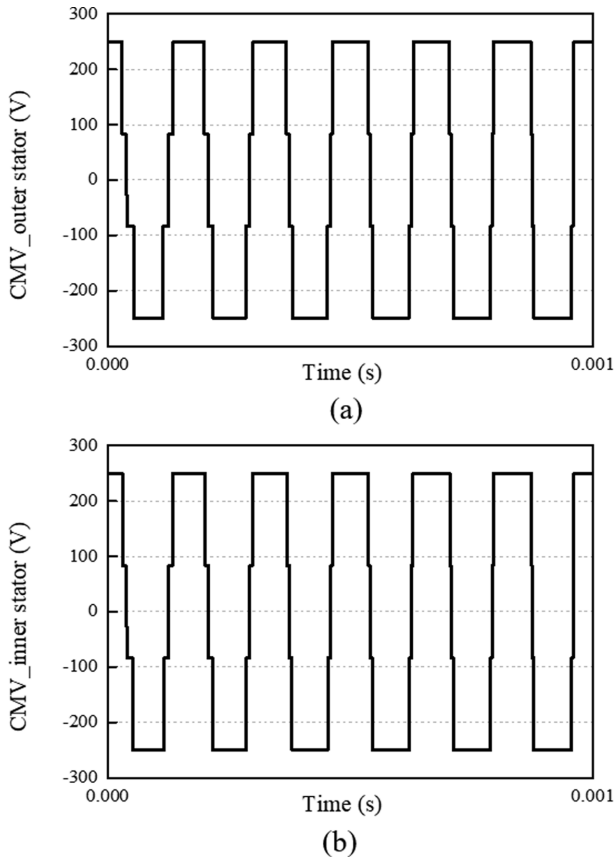


Fig. 4. Dual stator SPMSM common-mode voltage (a) Outer stator (b) Inner stator.

트는 전기적으로 분리되어 있어, 하우징과 샤프트 등의 전압에 영향을 미치는 각 권선 세트의 공통 모드 전압은 Fig. 3과 같이 고정자 권선 세트별 극전압의 평균으로 각각 계산된다. Fig. 4는 각각 외측 고정자, 내측 고정자의 공통 모드 전압을 나타낸 그래프이다.

2. 영상분 전압(Zero-sequence voltage, ZSV)

영상분 전압(zero-sequence voltage, ZSV)은 Fig. 2에서 표시한 것과 같이 모터 측에서 세 상 단자와 모터 중성점 사이의 전압인 상전압의 평균으로 나타난다. 이중 고정자 SPMSM의 경우 권선 세트가 2개 존재하므로 내측과 외측 영상분 전압 성분 각각 존재한다. 이상적인 상황에서는 3상의 상전압의 합은 평형을 이루어 0이 된다. 그러나, 해당 성분은 모터의 전자기적 성능에 무관한 누설에 의해 발생한다. Fig. 5는 각각 외측 고정자, 내측 고정자의 영상분 전압을 나타낸 그래프이다.

3. 중성점 전압

중성점의 전압은 공통모드 전압과 영상분 전압으로 도출할

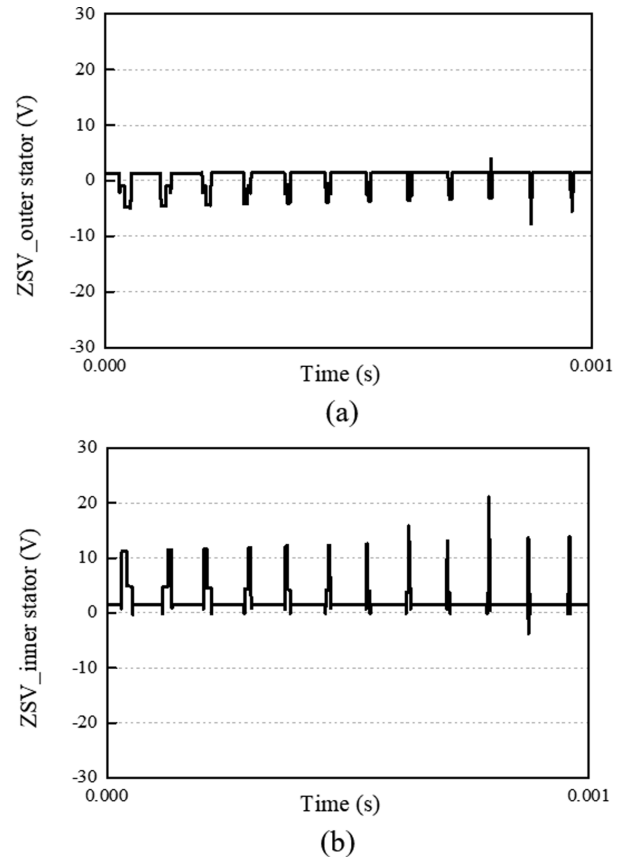


Fig. 5. Dual stator SPMSM zero-sequence voltage (a) Outer stator (b) Inner stator.

수 있다. 공통 모드 전압과 영상분 전압의 식을 활용하면 중성점 전압을 공통 모드 전압과 영상분 전압의 차로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{AG} &= v_{As} + v_{sG} \\ v_{BG} &= v_{Bs} + v_{sG} \\ v_{CG} &= v_{Cs} + v_{sG} \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에서 v_{AG} , v_{BG} , v_{CG} 는 각각 A, B, C상의 극전압, v_{As} , v_{Bs} , v_{Cs} 는 각각 A, B, C상의 상전압, 그리고 v_{sG} 는 중성점 전압이다. 식(11)의 식을 모두 더한 뒤, 양변을 상의 개수로 나누면,

$$\frac{v_{AG} + v_{BG} + v_{CG}}{3} = \frac{v_{As} + v_{Bs} + v_{Cs}}{3} + v_{sG} \quad (12)$$

식(12)와 같이 나오게 된다. 여기서 좌변은 극전압의 평균인 공통 모드 전압, 그리고 우변은 상전압의 평균인 영상분 전압과 중성점의 합으로 이루어진 것을 알 수 있다. 따라서, 중성점 전압은 공통 모드 전압에서 영상분 전압을 뺀 성분으로, Fig. 6과 같이 각각 외측 고정자, 내측 고정자에서 나타난다.

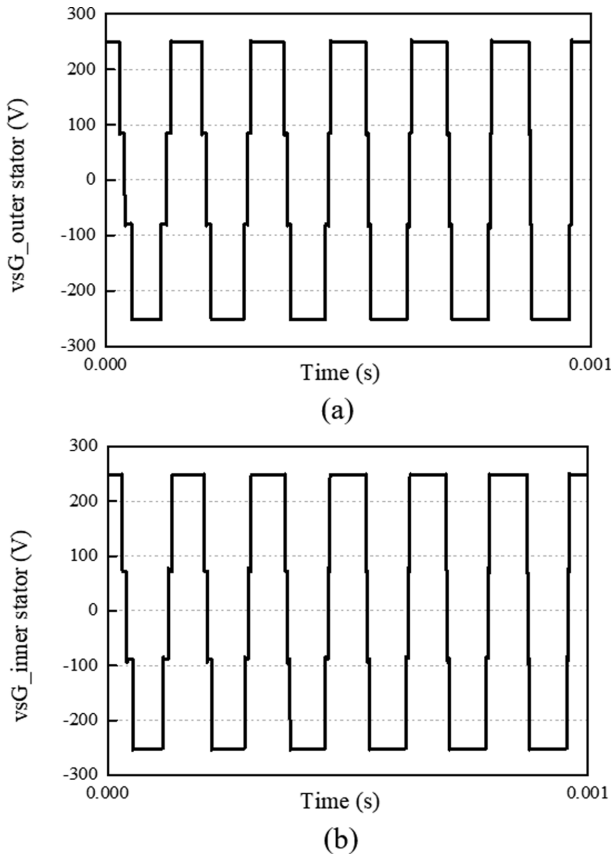


Fig. 6. Dual stator SPMSM neutral point voltage (a) Outer stator (b) Inner stator.

4. 이중 고정자 SPMSM 기생 정전용량

기생 정전용량이란 모터 구조 내에서 서로 다른 전위를 갖는 두 개의 도체가 서로 근접해 있으면 그 사이의 전기장이 전도체에 전하를 저장하게 되어, 부품 사이에 존재하는 정전용량이다. 기생 정전용량은 기본적으로 정전용량을 구하는 수식(13)에서 유도된다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (13)$$

여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, ϵ_r 는 매질의 비유전율, A 는 두 도체 사이의 거리, 그리고 d 는 도체의 면적이다. 전기장 내에서 권선, 고정자, 회전자 모두 도체판으로 간주될 수 있다. 따라서 모터에 존재하는 기생 정전용량은 식(13)을 활용해 모터의 기하학적 형상을 기반으로 계산할 수 있다. 본 장에서 전개되는 기하학적 근사화 기법들은 국부적인 프린징 효과를 배제하고 설계 초기 단계에서 모터의 주요 형상 파라미터가 축전압에 미치는 영향을 복잡한 수치해석 없이 신속하게 예측하기 위한 해석적 프레임워크로서 그 적용 범위를 가진다.

Fig. 7은 고정자 권선 사이의 기생 정전용량 C_{ww} 를 나타낸

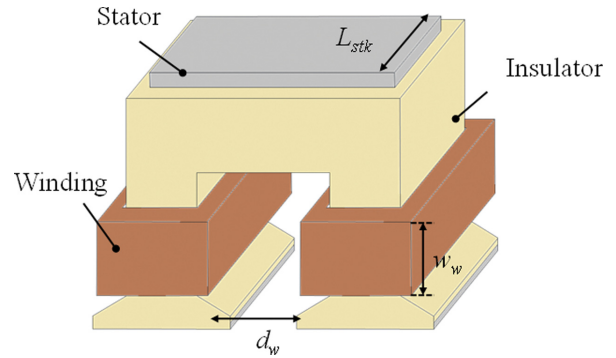


Fig. 7. (Color online) Configuration of winding-to-winding parasitic capacitance.

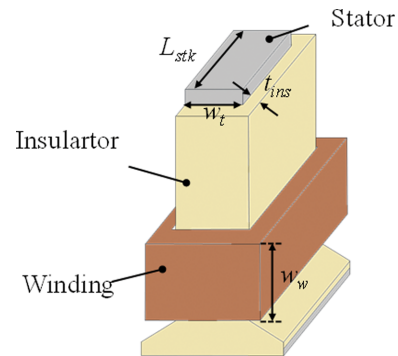


Fig. 8. (Color online) Configuration of winding-to-stator parasitic capacitance.

다. 이웃한 두 권선 사이는 서로 마주보는 도체판으로 작용할 수 있고 사이 공기 층의 길이에 따라 용량이 결정된다. 마주보는 권선이 서로 평행하지 않은 경우를 수식적으로 간단히 모델링하기 위해, 권선 사이의 길이를 마주보는 권선 면의 가장 긴 길이와 짧은 길이의 평균을 두 도체 판 사이의 길이로 간주하여 용량을 계산하였다. 해당 가정은 권선 형상의 곡률 반경이 슬롯 피치에 비해 충분히 클 때 유효하다. 따라서, C_{ww} 는 다음과 같은 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$C_{ww} = \epsilon_0 \epsilon_{air} \frac{w_w L_{stk} N_s}{d_w} \quad (14)$$

여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, ϵ_{air} 는 공기의 비유전율, d_w 는 두 권선 사이의 거리, w_w 는 권선의 폭, L_{stk} 는 적층 길이, 그리고 N_s 는 상당 턴 수이다.

Fig. 8은 고정자 권선과 고정자 사이의 기생 정전용량 C_{ws} 를 나타낸다. 고정자를 향하고 있는 권선의 단면과 권선을 향하고 있는 고정자의 단면은 서로 평행한 도전성 평판으로 작용할 수 있으며, 그 사이 절연지는 유전체 역할을 할 수 있다. 여기서 슬롯 내부의 기하학적 구조가 직육면체 형태에 가까우므로 평행판 커패시터 가정을 적용하였다. 따라서, C_{ws} 는

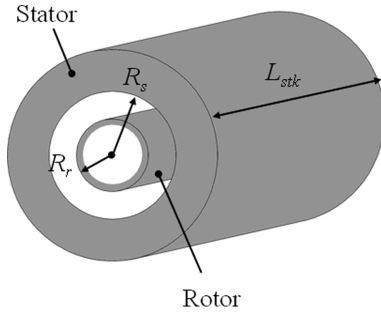


Fig. 9. Configuration of rotor-to-stator parasitic capacitance.

식(15)로 나타낼 수 있다.

$$C_{ws} = \epsilon_0 \epsilon_{ins} \left[\frac{2w_w L_{stk} + 2w_w w_t}{t_{ins}} \right] \frac{N_s}{3} \quad (15)$$

여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, ϵ_{ins} 는 절연물질의 비유전율, t_{ins} 는 절연물질의 두께, w_w 는 권선의 폭, L_{stk} 는 적층 길이, w_t 는 고정자의 두께, 그리고 N_s 는 상당 턴 수이다.

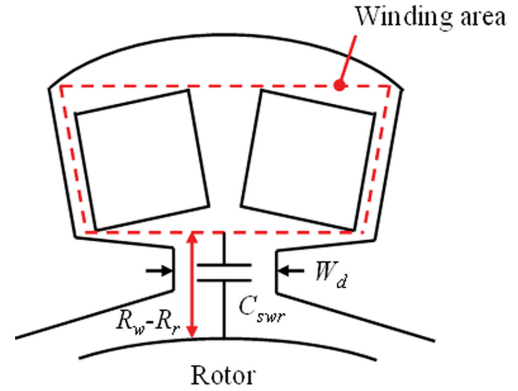
Fig. 9는 고정자와 회전자 사이의 기생 정전용량 C_{sr} 을 나타낸다. 수식적으로 간단히 모델링하기 위해 슬롯 오프닝 부분을 고려하지 않으면, 고정자와 회전자는 동심 원통형 용량으로 모델링할 수 있다. 슬롯 오프닝을 배제하고 동심 원통형 구조로 가정하는 것은 전체 공극 면적 대비 슬롯 오프닝 면적이 협소하여 프린징 효과가 제한적이라는 전제하에 성립한다. 고정자의 내부 단면과 회전자의 외부 단면은 도체 평판으로 작용할 수 있으며, 그 사이 용량 값은 공극 길이에 따라 달라진다. 따라서, C_{sr} 은 식(16)으로 나타낼 수 있다.

$$C_{sr} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2\pi L_{stk}}{\ln \frac{R_s}{R_r}} \quad (16)$$

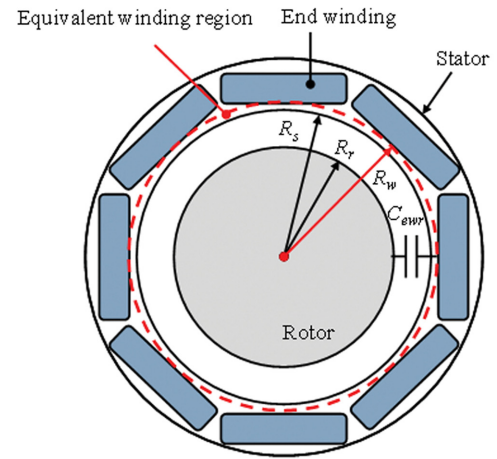
여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, R_r 은 회전자 외경, R_s 는 고정자 내경, 그리고 L_{stk} 는 적층 길이이다.

Fig. 10은 권선과 회전자 사이에 존재하는 기생 정전용량 C_{wr} 를 나타낸다. 해당 성분은 Fig. 10과 같이 C_{swr} 성분과 C_{ewr} , 각각 엔드 와인딩을 제외한 권선 부분과 회전자 사이, 엔드 와인딩과 회전자 사이에 발생하는 기생 정전용량 두가지 성분으로 나눌 수 있다.

C_{swr} 의 경우, 회전자를 향하고 있는 권선 바닥면과 회전자의 단면이 도체 평판으로 작용할 수 있고, 그 사이 간격이 도체 평판 사이의 거리로 볼 수 있다. 수식적으로 간단히 모델링하기 위해, 권선 바닥면의 단면을 Fig. 10(a)와 같이 슬롯 오프닝에서 가장 가까운 부분을 이은 면으로 간주하였다. 또한, 기생 정전용량을 형성하는 도체 평판의 유효 단면적은 슬롯 오프닝에 노출된 부분이므로, 슬롯 오프닝의 면적을 유



(a)



(b)

Fig. 10. (Color online) Configuration of winding-to-rotor parasitic capacitance (a) stator winding-to-rotor (b) end winding-to-rotor.

효 전극 단면적으로 간주하였다. 슬롯 오프닝 영역이 권선과 회전자 사이의 커패시터 면적을 생성하므로 해당 개방부 면적을 전기적 유효 단면적으로 가정하여 산정하였다. 따라서 C_{swr} 은 식(17)과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{swr} = \epsilon_0 \epsilon_{air} \frac{W_d L_{stk}}{R_w - R_r} \frac{N_s}{3} \quad (17)$$

여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, R_w 는 권선까지의 반경, R_r 은 회전자 외경, W_d 는 슬롯 오프닝 폭, 그리고 L_{stk} 는 적층 길이이다.

C_{ewr} 의 경우, 엔드 와인딩의 실제 형상을 그대로 수식적으로 모델링하기는 어렵기 때문에, Fig. 10(b)와 같이 엔드 와인딩과 회전자 사이의 기생 정전용량을 동심 원통형 용량으로 가정하여 모델링 하였다. 엔드 와인딩의 복잡한 3차원 형상을 수식적으로 완전히 반영하는 것은 한계가 있으므로 이를 동심 원통형 구조로 근사화하여 전반적인 정전용량 특성

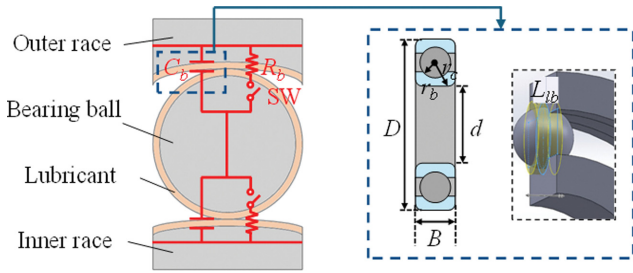


Fig. 11. (Color online) Configuration of bearing parasitic capacitance.

을 도출한다. 따라서, C_{ewr} 은 식(18)로 계산할 수 있으며, 권선과 회전자 사이에 존재하는 기생 정전용량 C_{wr} 은 C_{swr} 과 C_{ewr} 성분을 더하여 얻을 수 있다.

$$C_{ewr} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{4\pi L_e}{3 \ln \frac{R_s + R_w}{2R_r}} \quad (18)$$

여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, R_r 은 회전자 외경, R_s 는 고정자 내경, R_w 는 슬롯 오프닝 폭, R_w 는 권선까지의 반경, 그리고 L_e 는 측면에서의 엔드와인딩 길이이다.

C_b 는 베어링의 기생 정전용량을 의미한다. Fig. 11은 베어링 내륜과 외륜 사이의 전기적 회로이다. 모터가 회전하면 베어링은 두 가지 운전 상태로 작동할 수 있다. 첫 번째는 Fig. 11의 R_b 가 개방 상태인 전기적 개방 상태, 두 번째는 R_b 가 연결된 전기적 단락 상태이다. 전기적 개방 상태는 윤활유가 양호하고 절연이 잘 되어 있을 때 발생하며, 전기적 단락 상태는 윤활유 상태가 열화 되어 금속과 금속 사이 접촉이 발생할 때 나타난다. 본 논문에서 제안하는 등가회로 모델은 유막이 형성되어 베어링이 온전한 전기적 개방 상태를 유지하는 조건에서 축전압을 해석하는 데 적용되며 베어링 단락 상태나 윤활 상태의 동적 변화는 현재의 적용 범위에 포함되지 않는다. 베어링 기생 정전용량 C_b 는 식(19)와 같이 계산할 수 있다.

$$C_b = \epsilon_0 \epsilon_{lb} \frac{\pi L_{lb} N_b}{3 \ln \frac{r_c}{r_b}} \quad (19)$$

여기서 ϵ_0 는 진공에서의 유전율, ϵ_{lb} 는 윤활유의 유전율, r_b 는 베어링볼 반경, r_c 는 베어링볼 중심부터 내륜까지 거리, L_{lb} 는 Fig. 11과 같이 베어링볼과 베어링이 닿는 유효 길이, D 는 외륜 직경, d 는 내륜 직경, 그리고 N_b 는 베어링 볼의 수이다.

5. 이중 고정자 SPMSM 축전압

일반적으로 모터가 회전할 때는 베어링 윤활유가 존재하기 때문에 Fig. 11과 같이 베어링이 전기적 개방 상태로 작동하

게 된다. 해당 논문에서는 이와 같은 상황에서의 모터의 축전압에 대해 다룬다. Fig. 12(a)는 이중 고정자 SPMSM의 모터-인버터 시스템 구조에서의 기생 정전용량 회로를 Fig. 12(b)는 그에 대한 등가회로를 나타낸다. 모터-인버터 시스템 형상 구조에 따라 외측 고정자와 내측 고정자 각각의 중성점 전압과 기생 정전용량 회로가 구성되고, 회로의 경로가 모두 동일한 프레임 및 고정자나 회전자로 이어지는 구조이다. 본 연구에서 제안하는 축전압 등가회로는 모터 내부의 전자기적 결합을 순수 기생 정전용량 회로만으로 근사화한 전압 분배기 형태를 띤다. 내측 및 외측 고정자에서 유기되는 독립적인 중성점 전압을 두 개의 전압원으로 설정하고 회전자를 부동 노드로 취하여 폐회로를 구성하여 Fig. 12(b)와 같이 기생 정전용량 등가회로가 구성된다. 제안된 모델은 인버터 구동시 전동기가 일정한 회전 속도를 유지하여 베어링 내부에 안정적인 유체 윤활막이 형성되는 정상 상태 운전 조건에서 유효하다. 이러한 조건에서 베어링은 완전한 정전용량 성분으로 모델링될 수 있다.

해당 등가회로에서 키르히호프의 전류 법칙(Kirchhoff's current law)을 샤프트에 적용하면, 내측 및 외측 고정자로부터 각각 샤프트로 기생 정전용량을 타고 인가되는 전류와 샤프트에서 기생 정전용량을 타고 하우징 및 그라운드로 나가는 전류가 같다는 관계를 식(20)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{rg} = C_{wr_outer} + C_{wr_inner} + C_b \quad (20)$$

$$C_{wr_outer} \frac{d}{dt}(V_{shaft} - v_{sG_outer}) + C_{wr_inner} \frac{d}{dt}(V_{shaft} - v_{sG_inner}) + C_{rg} \frac{d}{dt}(V_{shaft} - 0) = 0$$

여기서 C_{rg} 는 외측 및 내측 고정자와 회전자 사이의 정전용량 그리고 베어링 정전용량을 병렬 등가화한 총합을 의미한다. 권선과 회전자 사이에 존재하는 기생 정전용량인 C_{wr} 과 중성점 전압 v_{sG} 는 각각 전기적으로 분리된 내측, 외측 고정자분을 표현하였다.

식(20)의 양변을 적분하고, 정상 상태에서 DC 오프셋 성분이 없으면 축전압은 식(21)과 같이 계산할 수 있게 된다.

$$V_{shaft} = \frac{C_{wr_outer} v_{sG_outer} + C_{wr_inner} v_{sG_inner}}{C_{wr_outer} + C_{wr_inner} + C_{rg}} \quad (21)$$

식(21)에 따르면 축전압은 회전자와 직접적인 전기적 결합을 형성하는 기생 정전용량 성분과 베어링 정전용량 성분, 그리고 내측 및 외측 고정자의 독립적인 중성점 전압에 지배적인 영향을 받는다. 고정자와 회전자 사이 정전용량 및 권선과 회전자 사이 정전용량이 주요 가중치로 작용하며 내측과 외측 고정자의 중성점 전압이 이들 가중치에 비례하여 복합적으로 중첩되는 물리적 현상을 보여준다. 해당 수식에 따라 회전자와 접지 사이의 정전용량인 C_{rg} 를 극대화하거나 권선과 회전

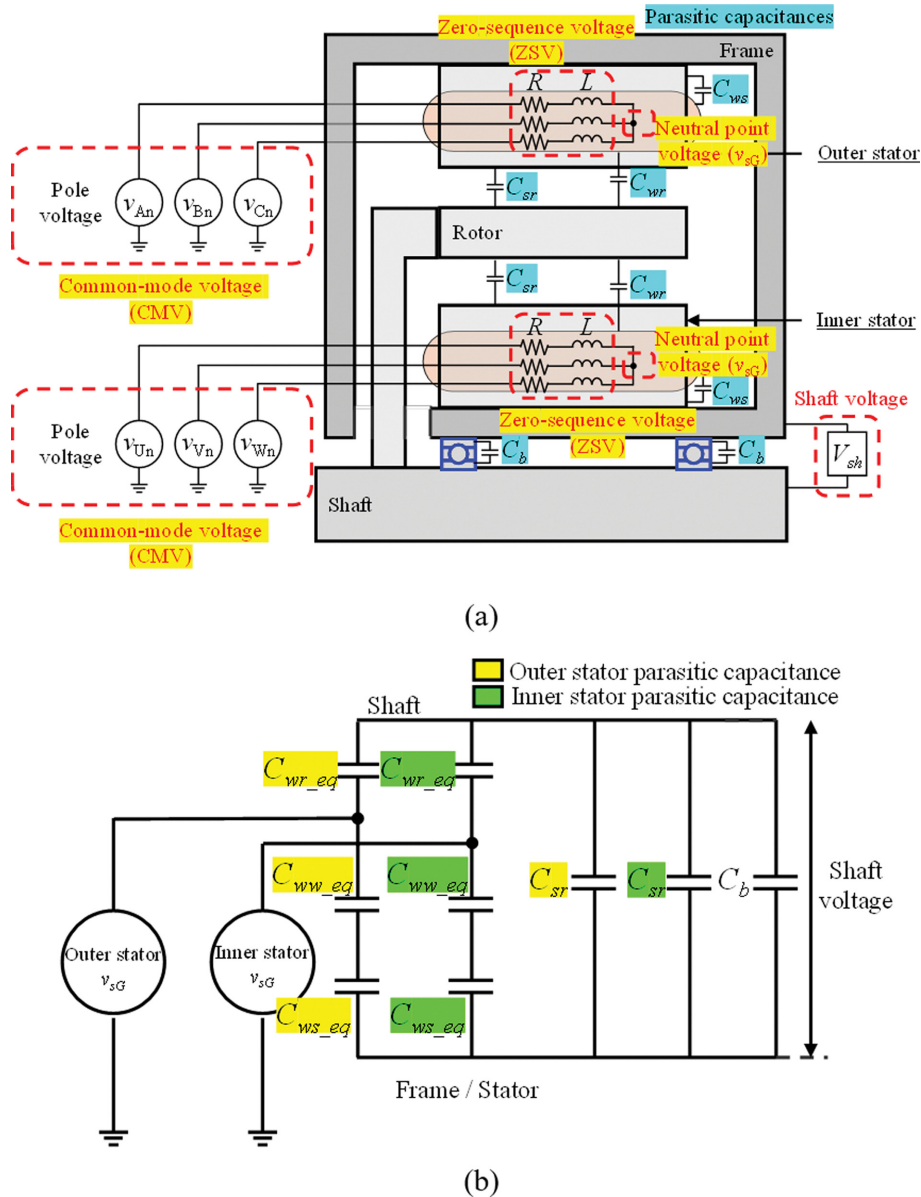


Fig. 12. (Color online) Dual stator SPMSM parasitic capacitances (a) physical configuration (b) equivalent circuit.

자 사이의 정전용량인 C_{wr_outer} 및 C_{wr_inner} 를 최소화하여 축전압 피크를 효과적으로 저감할 수 있다.

Fig. 13은 등가회로 시뮬레이션을 통해 나온 이중 고정자 SPMSM의 축전압 파형 그래프이다. Fig. 13의 가로축 시간 구간은 초기 과도 응답에 의한 전압 스파이크 현상을 배제하기 위해 다른 전압 파형의 측정 구간과 상이하게 설정되었다. 해석 결과 축전압의 최대 피크 전압은 14.05 V로 산출되었다. 도출된 14.05 V의 축전압은 베어링 윤활막의 일반적인 절연 파괴 임계치인 마이크로미터당 10에서 15 V 기준과 적용된 6206ZZ 베어링의 운전 중 유막 두께를 고려할 때 전기적 방전을 유발할 수 있는 유의미한 수치이다. 이러한 정량적 평가 결과는 전동기 설계 초기 단계에서 베어링의 전기적 신뢰

성 확보 및 고장 저감을 위해 본 연구에서 제안한 축전압 예측 프레임워크가 필수적임을 입증한다.

또한, 제안된 해석 프레임워크는 연산 효율성 측면에서 압도적인 장점을 제공한다. 단일 모터에 대해 정전장 FEA를 수행하여 파라미터를 추출하는 과정은 3D 모델링 및 연산에 상당한 시간이 소요된다. 반면 제안된 수식 기반 산출 모델은 즉각적으로 등가회로 파라미터를 도출하고 축전압을 예측할 수 있다. 다수의 설계 변수를 조정하며 방대한 설계 공간을 탐색해야 하는 모터 설계의 특성을 고려할 때 본 연구에서 제안된 수식 기반 해석 프레임워크는 계산 비용을 획기적으로 절감하고 초기 설계 단계에서 베어링 신뢰성을 확보할 수 있는 가장 실용적인 접근법이다.

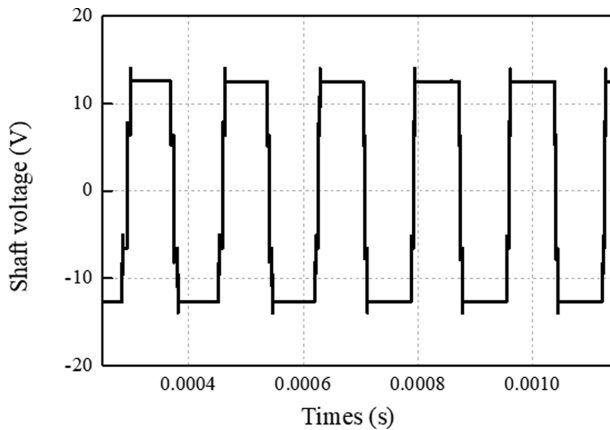


Fig. 13. Dual stator SPMSM shaft voltage.

VI. 결 론

본 논문에서는 전기적으로 분리된 두 세트의 고정자 권선을 갖는 이중 고정자 표면 부착형 영구자석 동기 모터의 축전압 예측을 위한 기생 정전용량 등가회로 모델링을 수행하였다. 제안된 해석적 접근법은 복잡한 FEA를 거치지 않고 모터의 기하학적 구조 파라미터와 물리적 특성만을 이용하여 내측 및 외측 공극에 분포하는 기생 정전용량을 수식적으로 도출하는 과정을 정립하였다.

특히 두 고정자 세트가 독립적으로 구동되는 환경에서 각

권선과 회전자 그리고 고정자 철심 간의 복잡한 정전용량 결합 상태를 집중 정수 회로망으로 구축하였다 이를 통해 공통 모드 전압에 기인하여 발생하는 축전압을 정량적으로 산출할 수 있는 이론적 프레임워크를 제시하였다 본 연구에서 도출된 등가회로 모델은 향후 이중 고정자 모터의 기계적 신뢰성을 확보하고 축전압 저감 설계를 수행하기 위한 초기 단계의 신속하고 유효한 해석 도구로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2026년 한화에너지로스페이스 E-drive HUB 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, and J. M. Miller, *Proc. IEEE* **95**, 719 (2007).
- [2] S.-W. Hwang, D.-K. Son, S.-H. Park, G.-H. Lee, Y.-D. Yoon, and M.-S. Lim, *IEEE Trans. Transp. Electrification* **8**, 4255 (2022).
- [3] F. Immovilli, C. Bianchini, M. Cocconcelli, A. Bellini, and R. Rubini, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **60**, 3408 (2013).
- [4] K. Kudelina, T. Vaimann, A. Rassolkin, A. Kallaste, B. Asad, and G. Demidova, *Proc. Int. Workshop Electr. Drives* **28**, 1 (2021).