

Study on the Design of Flux-Concentrated Motor Considering Cogging Torque and Axial Force Characteristics

Min-Jae Jeong

Korea Electronics Technology Institute, Bucheon 14502, Korea

Kwang-soo Kim*

Department of Electrical and Electronic Education, Andong University, Andong 36729, South Korea

(Received 13 January 2025, Received in final form 12 February 2025, Accepted 12 February 2025)

Cogging torque occurs due to variations in the reluctance between the permanent magnets on the rotor and the stator teeth and slots as the rotor rotates, and it is a major cause of motor vibration and noise. To address this issue, a skew structure is typically applied. However, the asymmetric structure of the skew generates axial force, which acts as a load on mechanical components such as bearings, leading to durability degradation and additional vibration and noise problems. Most studies, however, focus on reducing cogging torque, with little consideration given to axial force. Therefore, this study proposes a motor design method that simultaneously considers cogging torque and axial force to address these issues.

Keywords : Axial force, Cogging torque, Skew, Spoke-type motor

코깅토크와 축력 특성을 고려한 자속집중형 전동기 설계 연구

정민재

한국전자기술연구원, 부천시 송내대로 388, 14502

김광수*

국립안동대학교 전기전자교육과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2025년 1월 13일 받음, 2025년 2월 12일 최종수정본 받음, 2025년 2월 12일 게재확정)

코깅토크는 회전자가 회전할 때, 회전자에 위치한 영구 자석과 고정자 치와 슬롯의 릴럭턴스 변화에 의해 발생하며, 전동기의 진동과 소음의 주요 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 일반적으로 스큐 구조를 적용하지만, 스큐의 비대칭 구조로 인해 발생하는 축력은 베어링과 같은 기구 부품에 부하로 작용하여 내구성 저하 및 진동 소음 문제를 일으킨다. 그러나 대부분의 연구는 코깅 토크 저감에 초점을 맞추며, 축력에 대한 고려는 이루어지지 않는다. 따라서 본 연구는 코깅토크와 축력을 동시에 고려한 전동기 설계 방법을 제안하여 이 문제를 해결하였다.

주제어 : 축력, 코깅토크, 스큐, 자속집중형 전동기

I. 서 론

현재 전동기는 산업, 가전, 전기자동차(EV) 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 고효율 전동기에 대한 수요가 급증하고 있다. 고효율 전동기의 핵심 부품인 영

구자석은 전동기 성능을 결정짓는 중요한 요소로, 특히 희토류 자석의 뛰어난 자기적 특성 덕분에 고성능 전동기를 구현할 수 있다[1-5]. 그러나 현재 희토류 자석은 특정 국가에 의존하고 있어 공급망의 불안정성과 가격 변동성 문제를 야기하며, 자원의 한정성과 환경적 부담이 큰 문제로 대두되고 있다. 또한, 희토류 자석의 생산 과정에서 발생하는 환경 오염과 높은 에너지 소비가 지속 가능한 발전에 부정적인 영향을 미칠 수 있어, 이에 대한 해결책을 마련하기 위한 연구 개발

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-54-820-5652,

Fax: +82-54-820-6261, e-mail: kskim@anu.ac.kr

이 활발히 진행되고 있다[6-12]. 현재까지 대표적인 대안으로 떠오르고 있는 전동기는 비회로류 자석을 사용한 자속집중형 전동기(Flux Concentration Motor)이다. 자속집중형 전동기는 영구자석을 회전자에 방사방향으로 서로 마주보게 배치하여 자속을 집중시키고, 이를 통해 공극 자속 밀도를 높이는 방식으로 설계된다. 따라서 회로류 대비 성능이 낮은 페라이트 자석으로도 고효율과 높은 출력을 얻을 수 있다[13-16]. 이와 같은 전동기 설계는 회로류 자석에 대한 의존도를 줄이고, 전동기의 비용 효율성을 높이며, 환경적 지속 가능성에도 기여할 수 있는 중요한 기술로 주목받고 있다. 그러나 코깅토크(Cogging Torque)는 여전히 중요한 문제로 남아 있다. 코깅토크는 전동기에서 회전자가 회전할 때 회전자에 위치한 영구자석과 고정자 간의 상호작용으로 발생하는 회전 저항이다. 이는 전동기에서 유효한 일을 하지 않으며, 진동과 소음을 유발하는 불필요한 성분으로, 전동기 설계 시 이를 최소화해야 한다[17,18]. 최근에는 이를 해결하고자 스큐(Skew)를 적용하는 방식이 주로 사용된다[19,20]. 이 방법은 코깅토크를 줄이는 데 효과적이지만, 스큐 구조로 인해 축 방향 비대칭이 발생하여 축력(Axial force)이 생기는 문제가 있다[21]. 축력은 베어링 등 기계 부품에 하중을 가해 진동과 소음을 유발하며, 내구도를 저하시킬 수 있다. 따라서 전동기 설계 시 코깅토크와 축력을 동시에 고려한 설계 기술이 필요하다. 따라서 본 연구는 코깅토크와 축력을 동시에 고려한 새로운 전동기 설계 방법론을 제시하고자 한다. 기존 연구들은 코깅토크나 축력 중 하나에만 집중하여 전동기를 설계하였지만, 실제 설계에서는 이 두 요소를 동시에 고려하는 접근이 필요하다. 본 논문에서는 새로운 형태의 스큐 설계 기술을 통해 코깅토크를 효과적으로 저감하고, 축력 증가를 최소화하며, 전동기의 안정성과 성능을 동시에 향상하는 방법을 제안하였다.

II. 코깅토크 및 축력 이론

1. 코깅토크 이론 및 지배방정식

전류를 인가하지 않은 상태에서 영구자석 모터의 축을 손으로 회전시키면 맥동이 발생하며, 이때 발생하는 맥동 토크를 코깅토크라고 한다. 코깅토크는 고정자 치와 슬롯 사이의 자기저항 차이로 인해 발생하며, 자기저항이 최소인 경로로 정렬하려는 힘에서 비롯된다. 일반적인 구동 토크와 달리, 전동기가 회전하면서 양의 토크와 음의 토크가 번갈아 생성되기 때문에, 전동기의 평균 코깅토크는 0이 된다. 즉, 유효한 일을 수행하는 토크가 아니며, 오히려 진동과 소음의 원인이 되고 제어 성능을 저하시키는 부정적인 요소로 작용한다. 따라서 코깅토크를 최소화하기 위한 설계가 필요하다.

코깅 토크는 일반 토크와 마찬가지로 회전자의 회전량에 따

른 에너지 변화이므로, 따라서 식(1)로 표현할 수 있다[22-25]. 여기서, 공급되는 에너지는 영구자석에 의한 자계 에너지이다.

$$T_{cog} = - \frac{\Delta W(\alpha)}{\Delta \alpha} \quad (1)$$

여기서, T_{cog} 는 코깅토크, $\Delta W(\alpha)$ 는 에너지의 변화량, $\Delta(\alpha)$ 는 회전자의 회전량이다. 에너지 변화는 공극 부분에서만 발생하므로, 공극 부분의 에너지만을 고려하여 코깅토크를 구할 수 있다. 코깅토크는 입력 전류와 관계없기 때문에, 영구자석에 의한 공극 에너지만 고려하면 되며, 공극 에너지는 식(2)와 같이 공극 기저력 함수와 공극 퍼미언스 함수로부터 계산할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} W(\alpha) &= \frac{1}{2\mu_0} \int_V \{F(\theta, \alpha) \cdot P(\theta)\}^2 dV \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \int_V \{B(\theta, \alpha) \cdot G(\theta)\}^2 dV \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{L_s} \int_{S_{o1}}^{R_m} \int_0^{2\pi} \{B(\theta, \alpha) \cdot G(\theta)\}^2 d\theta dr dz \\ &= \frac{1}{2\mu_0} (R_m^2 - S_{o1}^2) \int_0^{2\pi} B(\theta, \alpha)^2 \cdot G(\theta)^2 d\theta \end{aligned} \quad (2)$$

$$F(\theta) = \frac{g}{\mu_0} B(\theta) \quad (3)$$

$$P(\theta) = \frac{\mu_0}{g} G(\theta) \quad (4)$$

여기서, μ_0 는 공극 투자율, F 는 공극 기저력 함수, P 는 공극 퍼미언스, B 는 자속밀도, G 는 상대공극 퍼미언스, θ 는 회전자가 움직이지 않을 때 기계각, L_s 는 고정자의 적층 길이, S_{o1} 는 고정자 외경, R_m 은 영구자석의 내경이다. 식(2)에서 우함수로 이루어진 $B(\theta, \alpha)^2$ 와 $G(\theta)^2$ 을 푸리에 급수를 전개하면 식(5)와 식(6)을 구할 수 있다.

$$B(\theta, \alpha)^2 = \sum_{n=0}^{\infty} B_{nN_s} \cos\{nN_p(\theta + \alpha)\} \quad (5)$$

$$G(\theta)^2 = \sum_{n=0}^{\infty} G_{nN_s} \cos\{nN_s(\theta)\} \quad (6)$$

여기서 N_s 는 슬롯수, N_p 는 극수이며 삼각함수의 직교성으로 인해 공극 에너지에 영향을 끼치는 주파수 성분은 N_s 와 N_p 의 최소공배수인 N_L 이다. 이를 통해 공극 에너지 함수를 구하게 되면 식(7)과 같다.

$$W(\alpha) = \frac{L_s}{4\mu_0} (R_m^2 - S_{o1}^2) \left[\int_0^{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} B_{nN_L} G_{nN_s} \cos\{nN_L(\theta + \alpha)\} \cos(nN_L\theta) d\theta \right]$$

$$= \frac{L_s}{4\mu_0} (R_m^2 - S_{o1}^2) \sum_{n=0}^{\infty} B_{nN_L} G_{nN_s} \cos\{nN_L \theta\} \quad (7)$$

식(1)에 따라, 회전자의 회전각으로 식(7)에서 구한 공극 에너지치를 미분하면, 식(8)과 같이 최종적인 코깅토크 식을 구할 수 있다.

$$T(\alpha) = \frac{L_s \pi}{4\mu_0} (R_m^2 - S_{o1}^2) \sum_{n=0}^{\infty} B_{nN_L} G_{nN_s} nN_L \sin(nN_L \alpha) \quad (8)$$

코깅 토크를 계산하는 또 다른 방법으로는 유한 요소법(Finite Element Method) 중 하나인 맥스웰 응력 텐서법(Maxwell Stress Tensor Method)이 널리 사용된다[26]. 맥스웰 응력 텐서의 토크를 2차원 대칭 원통 좌표계에서 나타내면 식(9)와 같다.

$$T_{cog} = \frac{1}{N} \frac{1}{\mu_0} \sum_{r=r_0}^{r_s} \int_0^{2\pi} B_n B_l r^2 d\phi \quad (9)$$

여기서, N 은 r_s , r_r 사이의 텐서라인 개수이며, l 은 원통의 적층 길이, r_s 는 고정자 내경 반지름, r_r 은 회전자 외경 반지름, r 은 텐서라인 반지름, B_n 은 텐서라인에 있는 노드의 반경방향 자속 밀도, B_l 은 텐서라인에 있는 노드의 접선방향 자속밀도이다.

2. 코깅토크 저감을 위한 기존 연구

고정자 치와 회전자 영구자석의 상호 작용에 의해 발생하는 코깅토크는 모터의 제어 정밀도를 떨어뜨리고 진동 및 소음의 원인이 된다. 따라서 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 기존에 연구된 코깅토크 저감 방안으로는 공극 길이 증가, 분수 슬롯 사용, 고정자 노치(Notch), 고정자 또는 회전자 스큐(Skew) 등 다양한 방법이 있다. 그러나 앞서 설명한 방법 중 공극 길이 증가 혹은 노치 적용을 통한 코깅토크 저감 방안은 전동기의 성능을 크게 저하하는 문제가 있다. 또한, 분수 슬롯 사용 방식은 특정 극수와 슬롯 수를 사용해야 하므로 전동기 설계의 자유도가 떨어지는 단점

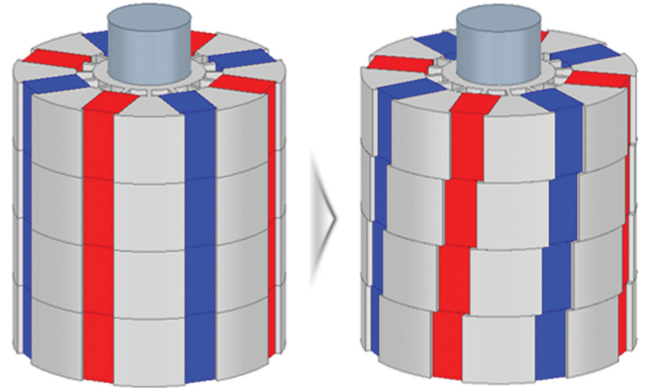


Fig. 1. (Color online) An example of applying rotor skew in a typical Spoke-type PMSM.

이 있다. 또 다른 방법으로는 회전자 또는 고정자의 각도를 비틀어 적층하는 방식인 스큐를 사용하는 것이다. 고정자 스큐의 경우, 적층 과정에서 강판을 회전시키며 적층해야 하기 때문에 자동 적층을 사용하는 양산 공정에는 적합하지 않으며, 코일을 감는 작업 또한 어렵다는 문제가 있다. 이러한 고정자 스큐 문제를 해결하기 위해 Fig. 1과 같이 회전자 측에 스큐를 적용하는 방법이 제안되었다. 회전자가 일정 각도만큼 틀어져 적층되면, 상부 회전자와 하부 회전자에서 발생하는 코깅토크가 서로 반대 방향으로 작용해 상쇄되며, 그 결과 코깅토크를 크게 줄일 수 있다. 그러나 회전자 스큐 방식은 영구자석을 삽입하고 조립한 뒤 착자 방식을 적용하기 어려워, 양산 효율이 크게 떨어지는 단점이 있다. 따라서 기존 연구와는 차별화된 방식으로 코깅토크를 저감하는 연구가 필요하다.

3. 코깅토크 저감을 위한 비대칭 리브 적용 전동기 설계

Fig. 2의 좌측 모델은 일반적인 자속 집중형 전동기 모델이며, 우측 모델은 출력향상 및 비대칭 리브 적용을 위한 개선된 형태의 전동기이다. 자속 집중형 전동기는 영구자석을 회전자 코어 기준으로 양쪽에 배치하고, 자화 방향을 자극의 중심인 회전자 코어를 향해 배향시킨 구조이다. 이는 표면부착

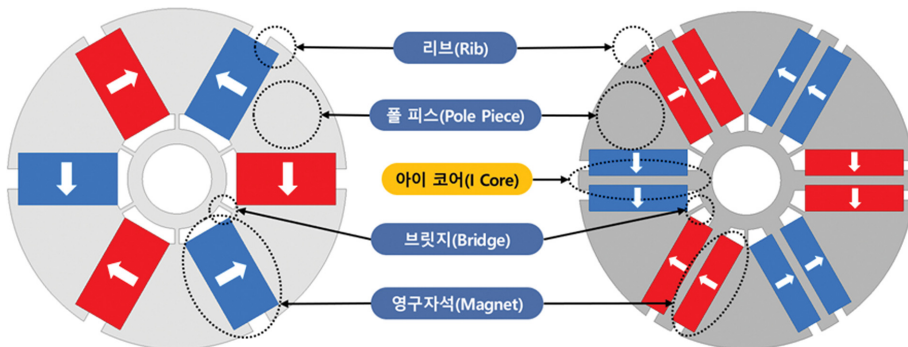


Fig. 2. (Color online) Motor structure with I-core insertion for applying asymmetric ribs.

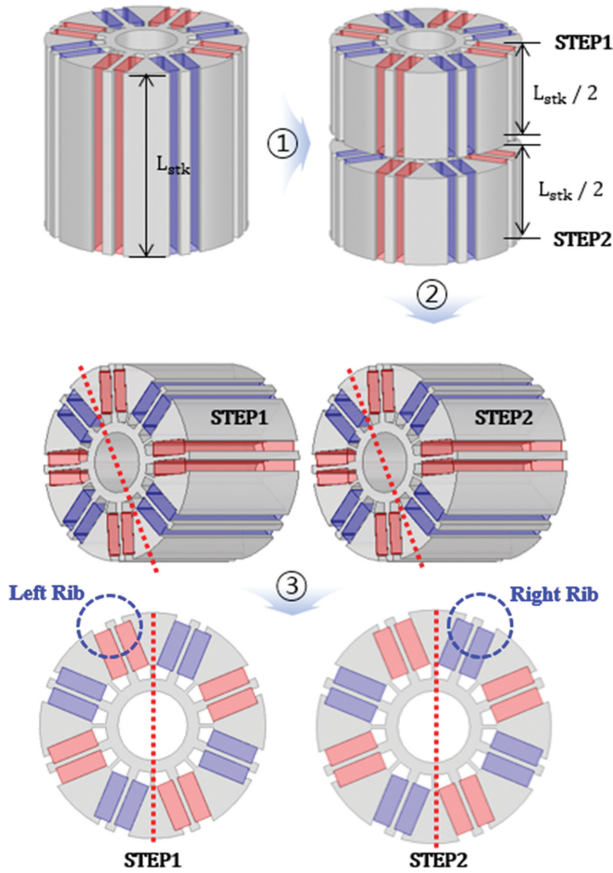


Fig. 3. (Color online) The method for applying asymmetric ribs in I-core motors.

형 영구자석 전동기 대비 높은 자속밀도를 구현할 수 있어 저가의 페라이트 자석을 사용하더라도 높은 출력밀도를 낼 수 있다. Fig. 2의 우측 형상은 기존 자속 집중형 전동기의 응용 형태로, 기존 자속 집중형 전동기와 차이점은 영구자석이 분할되어 있고, 그 사이에 철심이 삽입된 형태이다. 이러한 구조는 d , q 축 인덕턴스 차이를 발생시켜 릴럭턴스 토크를 활용할 수 있는 장점이 있다. 또한 기존 자속 집중형 전동기는 얇은 브리지 하나로 폴피스와 영구자석을 지지해야 하여 강성이 취약하지만, 개선된 모델은 폴피스를 브리지로 잡아주고 영구자석은 철심으로 잡아주므로 기계적으로 강건한 특징을 갖는다. 본 논문에서는 개선된 자속 집중형 전동기에 새로운 설계 변수를 도입하여 성능을 개선하고자 합니다.

Fig. 3은 코깅토크 저감을 위한 비대칭 리브 구조 적용 자속 집중 전동기의 설계 프로세스를 보여준다. 먼저 기초 설계를 통해 도출된 모델을 적층 길이에 맞춰 절반씩 이등분한다. 그다음으로, 분할된 회전자에 비대칭 리브를 적용한다. 이때, 분할된 회전자에 위치한 각 리브는 회전자 중심축을 기준으로 서로 반대 방향으로 설계되어야 한다. 이는 코깅토크의 피크 지점을 변화시켜 합성 코깅토크의 크기를 감소시키

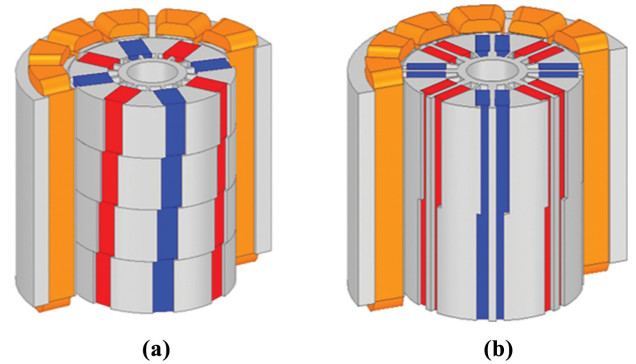


Fig. 4. (Color online) (a) Motor structure with typical skew application, (b) Motor structure with asymmetric ribs applied.

기 위함이다. 특징적으로, 일반적인 회전자 스큐와 같이 회전자의 단을 나누어 스큐를 주는 것이 아니라 리브를 비대칭으로 하여 스큐 효과를 주는 것이다. 따라서 스큐 단별로 영구자석을 분할 후 삽입할 필요가 없으며, 폴 피스가 중앙으로 정렬되어 있어 별도의 스큐 착자 방식이 필요하지 않다. 두 가지 모델의 차이를 비교하기 위해, 회전자 스큐와 비대칭 리브가 적용된 전동기 형상을 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4의 좌측은 일반적인 형태의 스큐가 적용된 전동기 형상이며 우측은 비대칭 리브가 적용된 전동기의 회전자 형상이다. Fig. 4의 일반적인 형태의 스큐를 보면, 축방향으로 회전자가 4등분으로 분할되어 있으며, 분할된 회전자가 일정한 각도만큼 틀어져 있다. 이러한 구조는 스큐 효과로 인해 코깅 토크를 저감할 수 있으나, 분할된 회전자에 영구자석을 나누어 삽입해야 하므로 양산에 불리하다. 또한, 영구자석을 회전자에 조립한 후 착자하는 방법을 적용할 경우, 영구자석의 스큐 각도를 고려하여 착자 자계를 인가해야 하므로 조립 후 착자가 어려운 단점이 있다. 반면, 비대칭 리브가 적용된 전동기의 경우 회전자를 분할한 후 회전자를 비틀지 않고, 회전자의 큰 뼈대인 폴피스는 일정한 방향으로 정렬된 상태에서, 회전자의 리브만 비대칭으로 적용된 형태이다. 따라서 기존 스큐 방식과 달리 영구자석을 분할할 필요가 없으며, 기존 스큐 방식이 가지는 제작성의 불리함과 착자의 어려움과 같은 문제를 해결할 수 있다.

4. 비대칭 리브 적용 전동기 코깅토크 저감 원리

Fig. 5는 비대칭 리브에 의한 자속 중심축의 변화를 보여준다. Fig. 5의 1번과 같이 리브가 대칭인 형태에서는 자속 중심축이 폴 피스의 중심에 위치한다. 본 논문에서는 Fig. 5의 1번을 기준 자속 축으로 명명한다. 대칭형 리브가 아닌, 반시계방향 또는 시계방향으로 한쪽 방향에 비대칭 리브를 적용할 경우 자속 중심축이 기준 자속 축과 달라지게 된다. 이러한 결과는 Fig. 5의 2번과 3번에 나타나 있다. Fig. 5의 2번

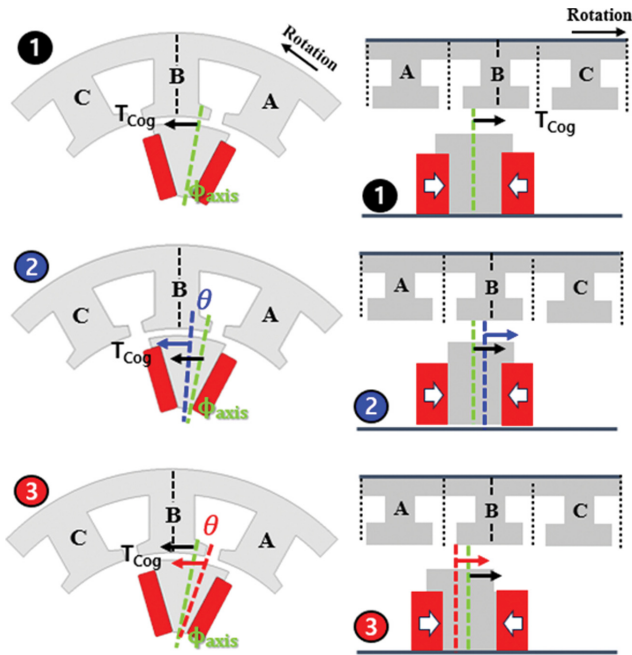


Fig. 5. (Color online) Change in magnetic flux center axis due to asymmetric ribs.

과 같이 회전 방향으로 리브가 위치하면 자속 중심축이 기준 자속 축보다 앞당겨진다. 반대로, Fig. 5의 3번과 같이 전동기 회전 반대 방향에 리브가 위치하면 자속 중심축은 기준 자속 축보다 뒤로 밀리게 된다. 코깅토크는 자속에 의해 영향을 받으므로, 자속 중심축의 변화는 코깅토크의 크기와 특성에도 영향을 미친다. 이러한 내용을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 2번에서 비대칭 리브가 회전 방향 측에 위치함에

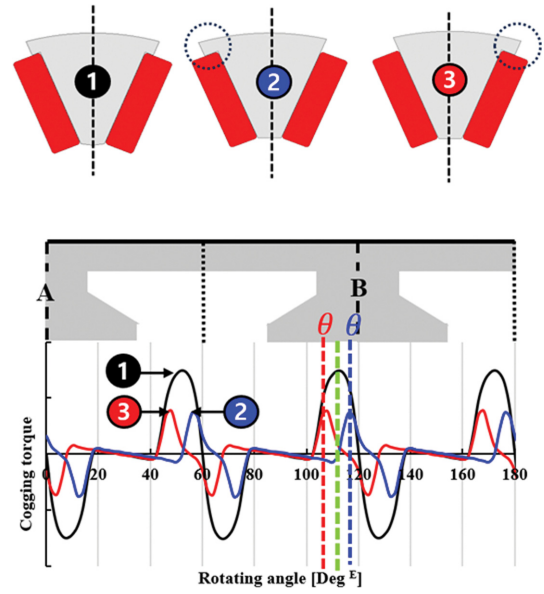


Fig. 6. (Color online) Cogging torque waveform depending on rib position.

따라 자속 중심축이 기준 자속 축보다 앞당겨진다. 이로 인해 코깅토크의 피크 발생 지점이 기준 코깅토크 발생 지점보다 앞서게 된다. 동일한 원리에 따라, Fig. 6의 3번에서 비대칭 리브는 회전 반대 방향에 위치한다. 이로 인해 자속 중심축이 기준 자속 축보다 뒤로 이동하게 되며, 결과적으로 코깅토크의 피크 발생 지점이 지연된다.

Fig. 7은 대칭 리브와 비대칭 리브에 의한 코깅토크 결과를 보여준다. 또한, 각 비대칭 리브의 코깅토크 파형을 합성한 결과 파형도 함께 제시하였다. 비대칭 리브의 코깅토크 합성

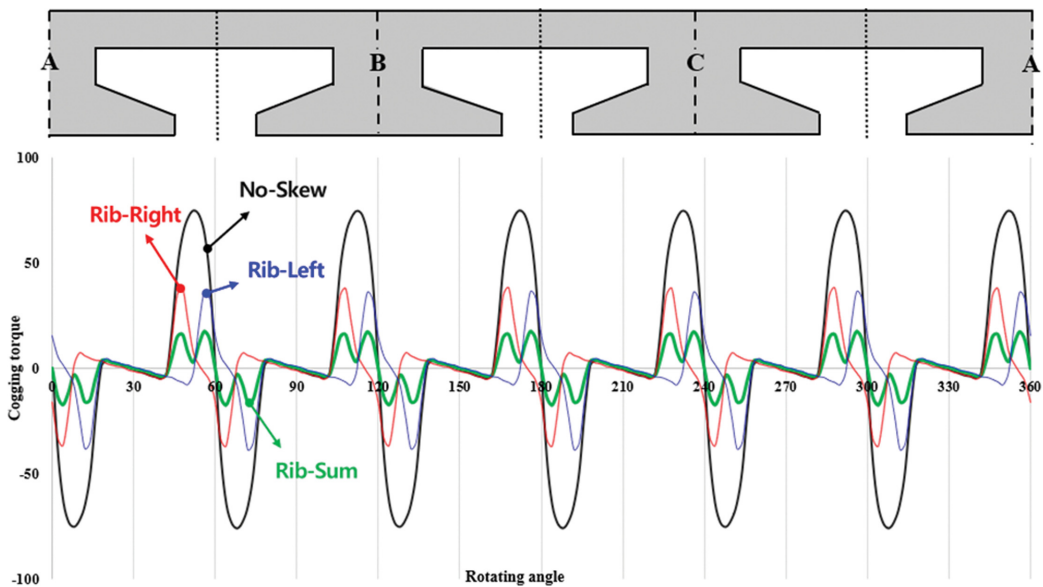


Fig. 7. (Color online) Change in cogging torque due to the application of asymmetric rib structure.

결과, 최종적으로 발생하는 최대 코깅토크가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 최대 피크의 위상이 변화하고 양의 코깅토크와 음의 코깅토크가 중첩되면서 상쇄 효과가 발생하기 때문이다. 이러한 결과는 비대칭 리브 구조가 코깅토크 저감에 효과적임을 보여준다.

5. 축력 이론 및 지배방정식

방사형 자속 전동기(Radial flux motor)에서 발생하는 힘은 크게 방사 방향으로 작용하는 힘, 축 방향으로 작용하는 힘, 접선방향으로 작용하는 힘이 존재한다. 여기서 실제 유효한 일을 하는 힘은 접선방향 성분이며, 방사 방향과 축 방향 힘은 진동 및 소음의 원인이 되는 불필요한 성분이다. 일반적으로 축 방향으로 대칭적인 구조를 갖는 전동기는 축 방향에서 생성된 힘이 서로 상쇄되므로 축력을 고려할 필요가 없다. 그러나 스큐를 적용하면 전동기의 축 방향 대칭성이 깨지며, 그 결과 축력이 발생하게 된다. 앞서 설명한 전동기에서 발생하는 힘의 식들을 아래에 나타냈다.

$$F_r = \frac{1}{\mu_0} \int_S B_r B_z ds \quad (10)$$

$$F_\theta = \frac{1}{\mu_0} \int_S B_\theta B_z ds \quad (11)$$

$$F_z = \frac{1}{\mu_0} \int_S \frac{B_z^2 - B_r^2 - B_\theta^2}{2} ds \quad (12)$$

식(10), (11), (12)에서 μ_0 는 진공의 투자율, F_r 은 반경 방향의 힘, F_θ 은 접선 방향의 힘, F_z 는 축 방향의 힘이다. 방사형 자속 전동기에서 토크는 접선방향 성분의 힘 F_θ 로 계산되며 축력은 F_z 로 계산된다.

비대칭 구조에서의 축력을 명확히 분석하기 위해 이를 Fig.

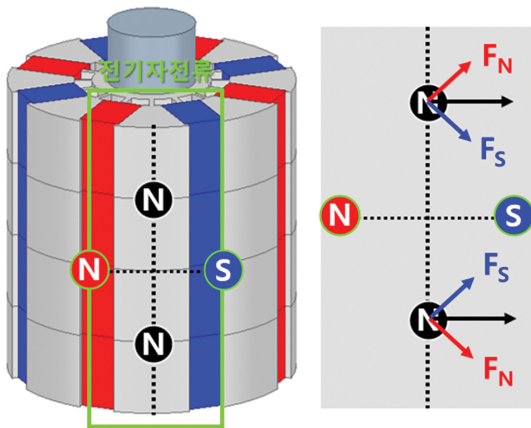


Fig. 8. (Color online) Axial force of a Spoke-type PMSM without skew.

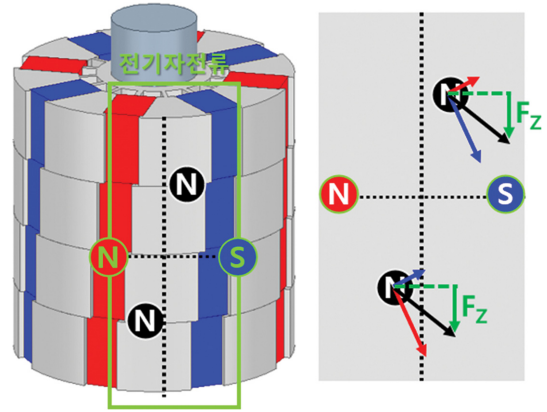


Fig. 9. (Color online) Axial force of a Spoke-type PMSM with skew.

8과 9에 나타내었다. 자속 집중 전동기의 공극 단면적은 영구자석 자속에 의해 N극 또는 S극을 형성한다. Fig. 8은 N극 공극 단면적을 기준으로 축력 발생 메커니즘을 설명한 것이다. 고정자 권선 측에 전류가 인가되면, 전류에 의해 N극과 S극의 전자석이 형성된다. 이로 인해 영구자석에 의한 자극과 전자석에 의한 자극 간의 상호작용으로 축력이 발생하게 된다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이, 전자석 N극이 영구자석에 미치는 힘과 전자석 S극이 영구자석에 미치는 힘은 크기가 동일하며 방향이 반대이다. 따라서 축 방향으로 발생하는 합성 힘은 0이 된다. 결과적으로 접선 방향의 힘만 남게 되며, 대칭 구조의 전동기에서는 축력을 별도로 고려하지 않아도 된다.

그러나 Fig. 9와 같이 스큐가 적용된 비대칭 회전자 구조는 대칭형 전동기와는 다른 특징을 나타낸다. 이는 축 방향의 비대칭 회전자의 자극 분포가 비대칭적으로 존재하기 때문이다. Fig. 9에서 회전자 상부는 검은색 점선의 중심축을 기준으로 우측에 N극의 분포가 더 크며, 회전자 하단은 좌측에 N극의 분포가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전기자 전류에 의한 극성과 힘의 벡터를 고려할 때, 회전자 상부의 N극은 전기자 전류의 N극에 비해 S극의 영향을 더 많이 받고, 회전자 하단의 N극은 전기자 전류의 S극에 비해 N극의 영향을 더 크게 받는다. 이를 바탕으로 힘의 벡터 합을 나타내면, 초록색 화살표 F_z 와 같이 축력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 비대칭 회전자 구조는 축 방향으로 힘이 작용한다는 것을 알 수 있다.

III. 축력과 코깅토크를 고려한 스큐 비율 적용 전동기 설계

1. 스큐 비율 적용 전동기 구조 및 이론

회전자 비대칭 리브 구조는 코깅토크를 저감할 수 있으나,

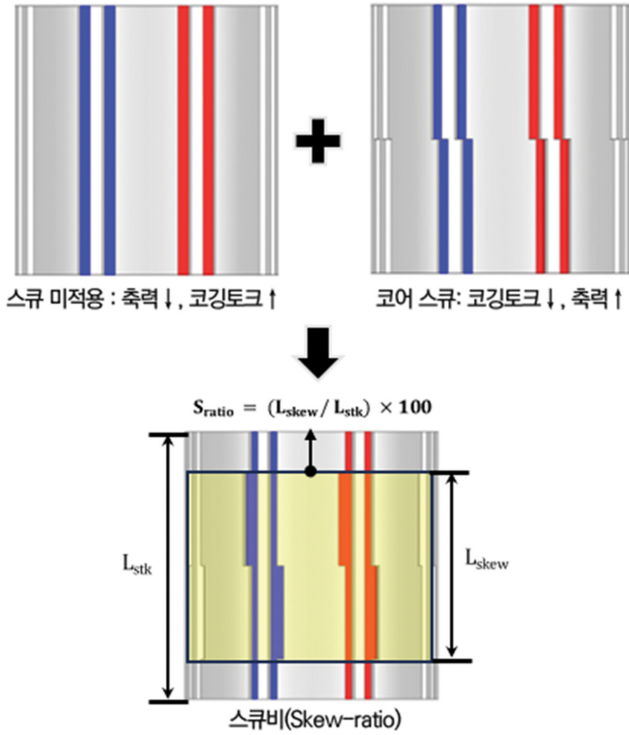


Fig. 10. (Color online) Design method of Spoke-type PMSM considering the skew ratio.

비대칭 구조로 인한 축력이 발생하게 된다. 그러나 축력은 베어링에 부하로 작용할 뿐만 아니라 진동 및 소음의 원인이 될 수 있으므로, 축력 역시 중요한 설계 요소로 고려되어야 한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 비대칭 리브의 비율을 조절하는 스큐 비율 적용 방안을 제안하였으며, 이를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 비대칭 리브 구조는 코깅

토크를 저감할 수 있으나 축력이 크게 발생하는 문제를 가지고 있다. 반면, 대칭 구조는 축력이 발생하지 않지만 코깅토크가 크게 나타나는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 설계 목적에 맞게 비대칭 리브와 대칭 리브의 비율을 조절하는 설계 방법론을 제안하였다. 코깅토크를 줄이기 위해서는 비대칭 리브 구조가 필요하지만, 이는 동시에 축력을 발생시키는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 스큐 비율이라는 설계 변수를 추가하여 코깅토크와 축력의 가중치를 두고 목표로 하는 전동기 설계를 진행하였다. 예를 들어, 축력보다 코깅토크 감소율을 증가시키고 싶으면 스큐 비율을 늘리면 되며, 반대로 축력을 감소시키기 위해서는 스큐 비율을 감소시키면 된다. 즉, 본 논문에서는 코깅 토크와 축력을 동시에 고려할 수 있는 설계 기법을 제안하였습니다. 여기서 스큐 비율이란 전동기의 총 적층 길이에 대한 비대칭 리브가 적용된 비율을 나타내며, 이는 식(13)과 같다.

$$S_{ratio} = \frac{L_{skew}}{L_{stk}} \times 100 \quad (13)$$

여기서 S_{ratio} 는 스큐 비율이며, L_{skew} 는 비대칭 리브가 적용된 길이, L_{stk} 는 전동기 전체 적층 길이이다.

2. 스큐 비율 적용 전동기 설계 변수

Fig. 11은 코깅토크 및 축력 저감 전동기 설계를 위한 설계 변수이다. 일반적인 자속집중형 전동기와 마찬가지로 영구자석의 형상, 리브(Rib), 브릿지(Bridge), 영구자석 매입 깊이, 회전자 백요크, 샤프트 경이 설계 변수로 나타나 있다. 그러나 비대칭 리브를 적용하기 위해 리브 설계 변수를 L_{L-rib} , L_{R-rib} 로 각각 다르게 나타내었으며 스큐 비율 S_{ratio} 을 설계 변

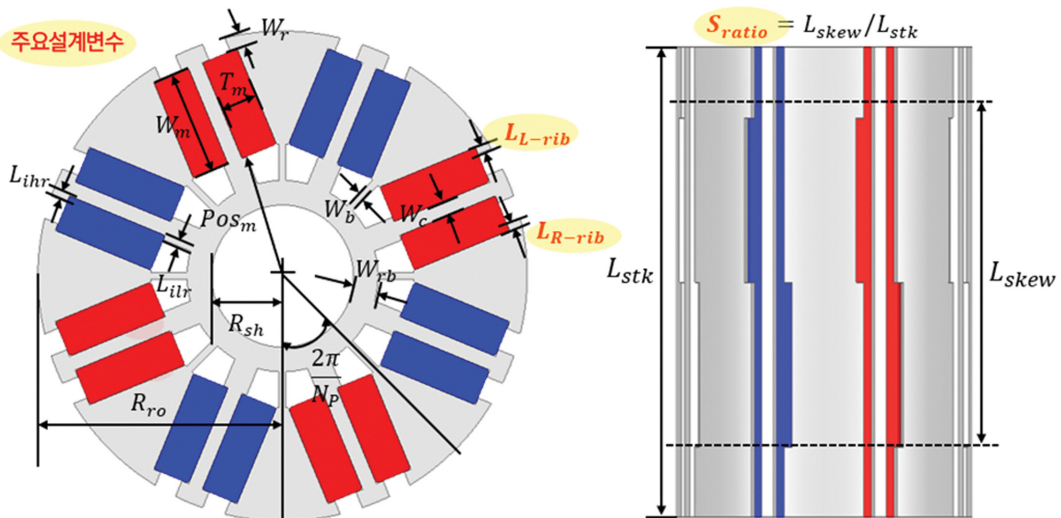


Fig. 11. (Color online) Design variables for applying asymmetric ribs and skew ratio.

수로 추가하였다. 비대칭 리브는 코깅토크 저감을 위한 설계 변수이며 스큐 비율 S_{ratio} 는 축력과 코깅토크를 동시에 고려하기 위한 설계 변수이다. 여기서, L_{skew} 는 L_{L-rib} 와 L_{R-rib} 가 비대칭으로 적용된 적층 길이를 의미한다. 그리고 S_{ratio} 는 회전자 코어의 적층 길이 L_{stk} 대비 스큐 길이 L_{skew} 이다. 만약 축력 대비 코깅토크를 감소시키는 것이 목적일 경우 스큐 비율을 증가시키는 것이 유리하며 축력을 감소시키는 것이 목적이라면 스큐 비율을 감소시키는 방향으로 전동기 설계를 진행해야 한다.

3. 스큐 비율 적용 전동기 설계 프로세스

Fig. 12는 스큐 비율 적용 전동기 설계를 위한 프로세스를 나타냈다. 본 논문은 기초 설계된 모델의 스큐 비율이라는 설계 기법을 적용하여 코깅토크 및 축력을 저감한 전동기 설계가 주목적이다. 따라서 초기에는 사이징 설계 기법을 통해 기초 모델을 도출한다. Fig. 12의 1~8번은 사이징 설계 프로우차트이다. 전압 제한, 최대 전류, 극수, 슬롯수, 최대 외경을 초기 값으로 산정하고 자석 두께, 공극, 극호율을 결정하여

초기 값의 공극자속 밀도를 계산한다. 이후에 상당 직렬 턴수 산정을 위해 초기에 상당 직렬턴수를 1로 선정한 후 반복법(Iteration method)을 통해 가장 높은 출력밀도의 상당 직렬 턴수를 산정할 수 있다. 다음으로 자기포화를 고려하여 고정자의 요크와 치폭을 결정하면 된다. 그리고 이를 통해 점적률과 전류밀도를 활용하여 슬롯 면적을 결정한다. 사이징 설계의 3번에서는 1번과 2번의 값을 통해 고정자 반경과 내경, 치수 및 치 중앙까지의 반지름을 선정한다. 고정자 슬롯 디자인 이후 적층 길이를 산정하면 되는데 이는 마그네틱 토크식을 활용하면 된다. 또한 5번까지의 과정을 반복적으로 수행하면 출력밀도가 최대화되는 적층 길이와 회전자 크기가 정해진다. 이후 6번 과정을 통해 영구자석의 사이즈가 결정되며 7번을 통해 공극자속밀도를 구한다. 마지막으로 6~8번의 과정을 수행하면 사이징 설계를 고려한 기초 설계 모델이 도출된다.

앞서 도출된 전동기 기초 모델은 코깅토크와 축력이 고려되지 않은 단순 사이징 설계 모델이다. 이를 고려하기 위해서는 9~14번의 설계 프로세스를 진행하면 된다. 프로세스의

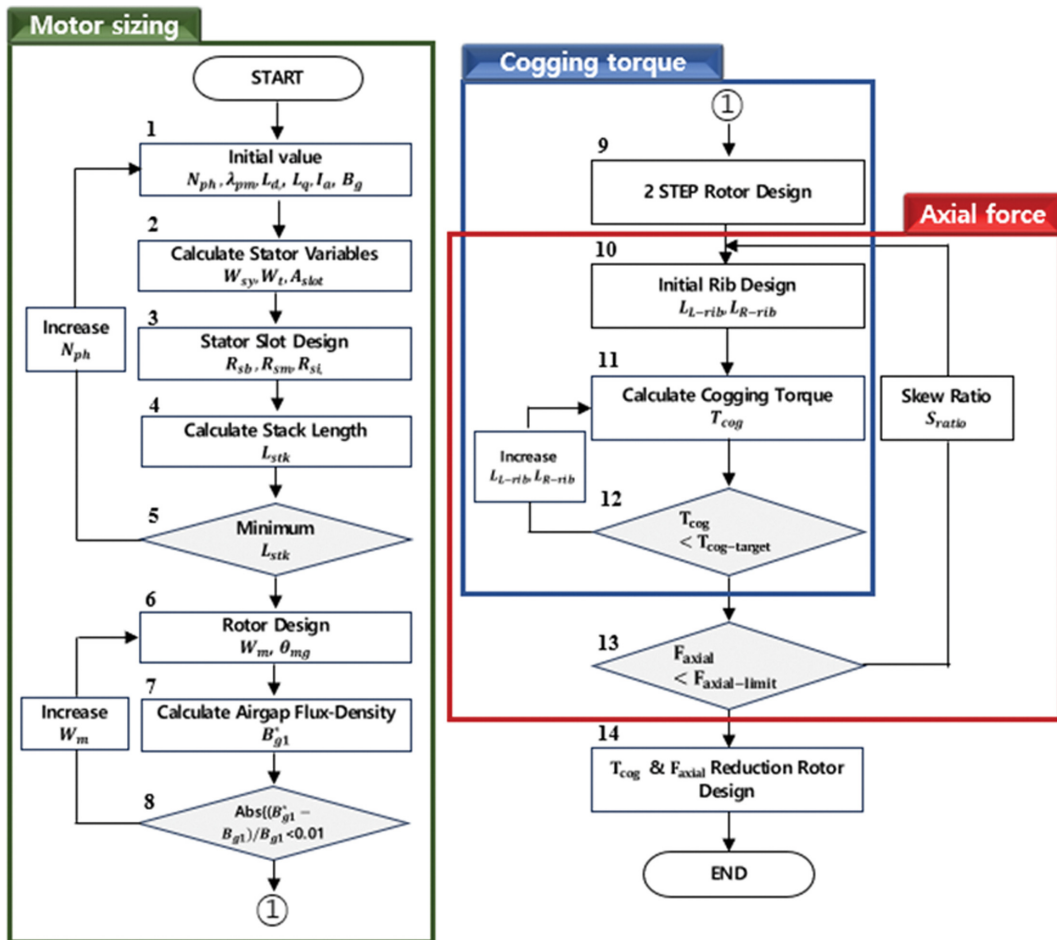


Fig. 12. (Color online) Design process of Spoke-type PMSM considering the skew ratio.

9~10번은 코깅토크 저감을 위한 비대칭 리브 구조를 적용하는 과정이며 11~12번은 계산된 코깅토크 값을 비교하여 최종 리브 구조를 산출하는 과정이다. 초기 임의의 리브 두께를 선정하고 산출된 코깅토크 값과 목표토크를 비교하여 최종 비대칭 리브를 선정하면 된다. 프로세스의 13번은 축력을 검토하는 과정이며 스큐 비율 변화를 통해 목표토크를 도출하면 된다. 13번에서 축력 감소를 위해 스큐 비율을 감소시켰다면 코깅토크는 증가하게 된다. 따라서 11~13번의 과정을 다시 진행하여 리브 두께를 재선정한 후 다시 스큐 비율을 선정해야 한다. 즉 11~13번의 프로세스 반복과정을 수행하면 우리가 목표로 하는 코깅토크와 축력이 동시에 고려된 전동기 모델이 도출되게 된다.

IV. 유한요소해석을 통한 스큐 비율 적용 전동기 검증

1. 리브 변화에 따른 코깅토크 특성

Fig. 13은 2.4절에서 리브 변화에 따른 코깅토크 특성 변화를 실제로 확인하기 위해 제시된 것이다. 본 논문의 주된 목표는 리브와 스큐 비율에 따른 전동기 특성 변화를 분석하는 것이므로, 사이징 설계 과정(프로세스 1~8번)을 완료한 이후의 모델을 중심으로 서술하였다. Fig. 13에서 알 수 있듯이, 리브 길이의 변화에 따라 최대 코깅토크의 피크 위치가 달라진다. 왼쪽 리브(Left Rib) 길이가 증가할수록 최대 코깅토크의 크기는 감소하며, 피크 발생 지점은 앞당겨진다. 반대로, 오른쪽 리브(Right Rib) 길이를 증가시키면 최대 코깅토크의

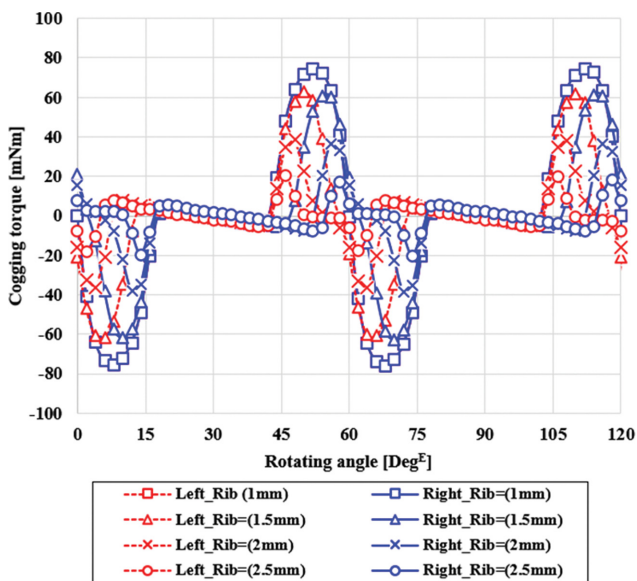


Fig. 13. (Color online) Change in cogging torque due to variations in rib structure.

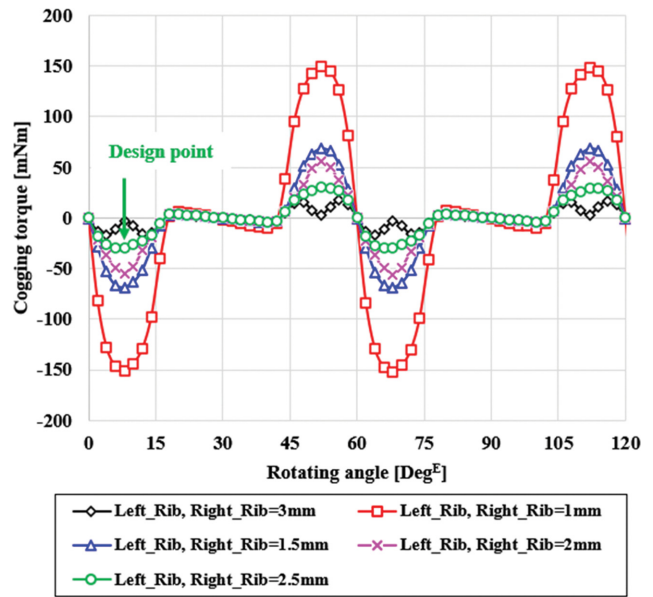


Fig. 14. (Color online) Determination of design variables considering the synthesized cogging torque waveform of a motor with asymmetric ribs.

크기가 줄어드는 동시에 피크 발생 지점은 뒤로 이동한다. 따라서 리브를 좌우 비대칭으로 적용할 경우, 코깅토크의 피크가 서로 중첩되지 않아 최대 코깅토크가 감소하는 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 14는 비대칭 리브의 코깅토크 저감 효과를 확인하기 위해 합성 코깅토크 파형을 나타낸 결과이다. Fig. 14에서 두 비대칭 리브가 생성한 코깅토크의 합성 파형을 검토한 결과, 최대 코깅토크가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 코깅토크 저감 효과가 큰 왼쪽 리브와 오른쪽 리브를 각각 2.5 mm로 적용하여 기본 모델을 선정하였다. 리브 길이가 3 mm일 경우 코깅토크 저감 효과가 더 클 수 있으나, 리브로 인해 누설되는 자속량이 증가할 가능성이 있어 초기 리브 길이를 2.5 mm로 설정하였다.

2. 비대칭 리브 구조에 의한 자속 분포

Fig. 15, 16, 17은 대칭 리브와 비대칭 리브 구조에 의한 자속 분포도이다. 동일한 기준에서 비교를 위해 회전자의 리브 구조를 제외한 나머지 변수들은 동일한 조건으로 해석을 진행하였다. 먼저, Fig. 15는 폴피스 중심축(붉은색 점선)을 기준으로 좌우가 대칭인 리브 구조이다. 자속 분포를 보면, 대칭 구조이므로 폴피스 중심을 기준으로 좌우의 자속 분포가 동일하다. 그러나 Fig. 16, 17과 같이 리브가 비대칭 구조로 되어 있는 경우, Fig. 15에서의 자속 분포와는 다른 특성을 보인다. 먼저, Fig. 16을 보면 폴피스의 중심축을 기준으로 시계방향에만 리브가 배치되어 있다. 리브는 투자율이

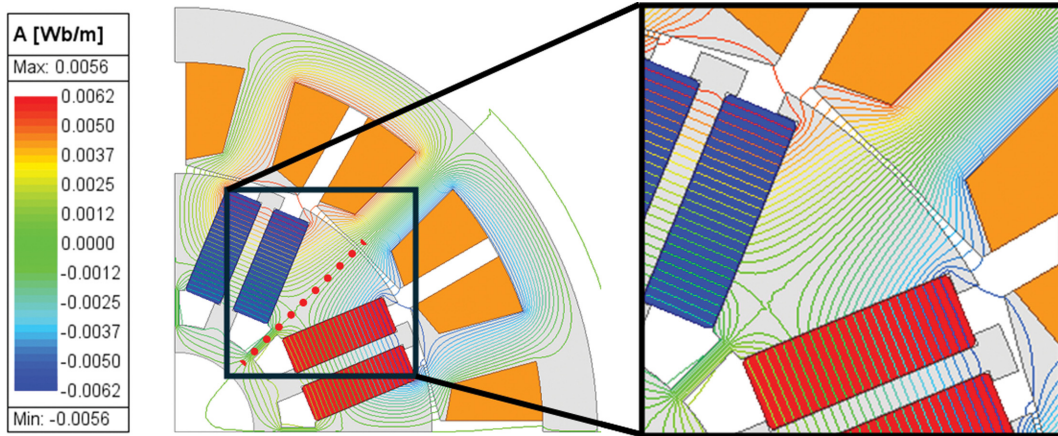


Fig. 15. (Color online) Magnetic flux distribution in a symmetric rib structure.

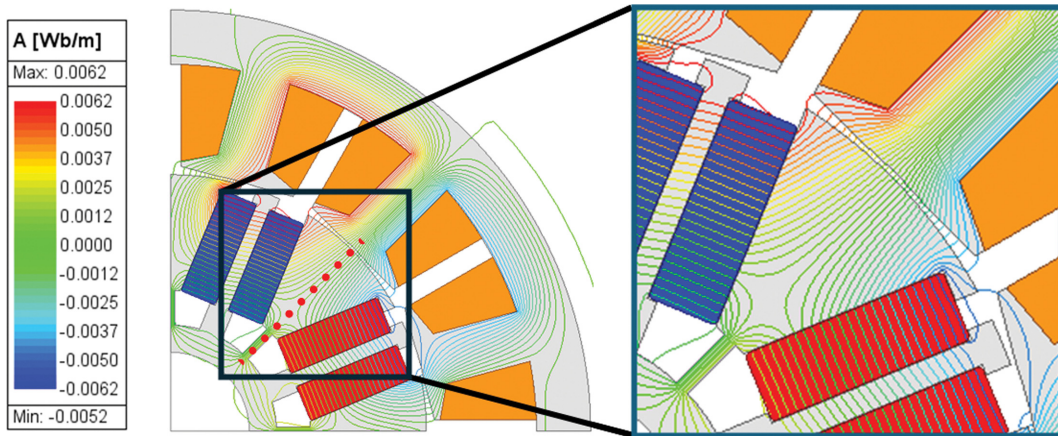


Fig. 16. (Color online) Magnetic flux distribution according to the clockwise position of the asymmetric ribs.

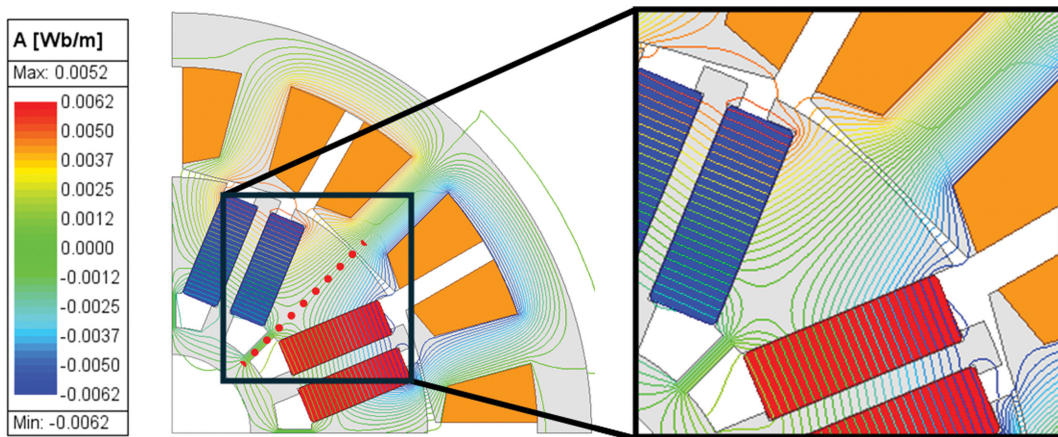


Fig. 17. (Color online) Magnetic flux distribution according to the counterclockwise position of the asymmetric ribs.

높기 때문에 리브가 위치한 시계방향으로 자속이 향하고, 리브가 없는 반시계방향에서는 자속이 감소하게 된다. 동일한 원리를 적용하면, Fig. 17에서는 반시계방향으로 자속이 향하고 시계방향의 자속은 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 즉,

비대칭 리브 구조에서는 대칭 구조와 달리 자속이 한쪽 방향으로 집중되게 된다. 따라서 이러한 비대칭 구조가 만들어내는 자속 분포를 활용하면, 회전자 전체에 스큐를 주지 않고도 스큐 효과를 얻을 수 있게 된다.

3. 스큐 비율에 따른 축력 및 코깅토크 분석

Fig. 18은 스큐 비율이 코깅토크에 미치는 영향을 분석하기 위해, 앞서 4.1절에서 도출된 리브 2.5 mm 기본 모델에 스큐 비율을 적용한 결과이다. 스큐 비율(S-ratio) 100%는 전동기의 전체 적층 길이 중 비대칭 리브가 적용된 영역, 즉 스큐가 차지하는 비율이 100%임을 의미하며, 스큐 비율(S-ratio) 0%는 스큐가 적용되지 않은 대칭 형태를 의미한다. 다시 말해, 스큐 비율(S-ratio)은 전체 적층 길이에서 스큐 영역이 차지하는 비율을 나타낸 값이다. Fig. 18에서 스큐 비율에 따른 코깅토크 결과를 확인하면, 스큐 비율이 감소함에 따라 코깅토크가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 코깅토크 저감 효과를 가지는 비대칭 리브가 적용된 스큐 영역이 줄어들기 때문이다. 따라서 코깅토크 저감 효과를 극대화하기 위해서는 스큐 비율을 최대한으로 설정하는 것이 바람직하다.

Fig. 19는 스큐 비율에 따른 축력을 비교한 결과를 나타낸

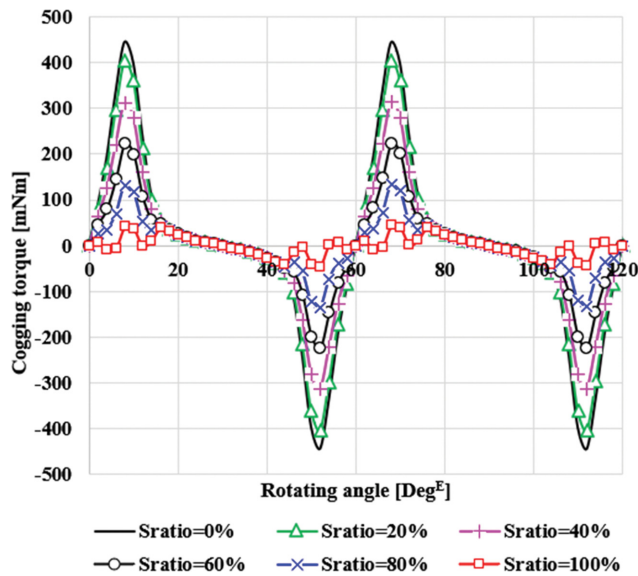


Fig. 18. (Color online) Analysis of cogging torque variation with changes in skew ratio.

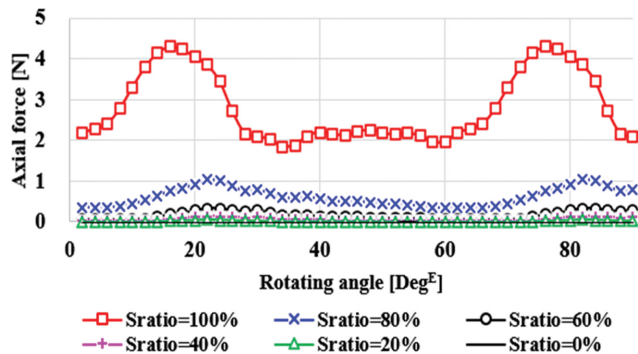


Fig. 19. (Color online) Analysis of axial force variation with changes in skew ratio.

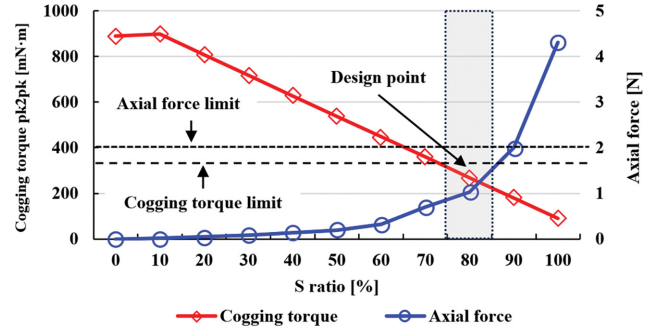


Fig. 20. (Color online) Example of the method for determining the skew ratio considering both axial force and cogging torque.

것이다. 앞선 코깅토크 결과와 달리, 축력은 스큐 비율이 증가할수록 커지는 경향을 보인다. 이는 스큐의 비대칭성이 축력을 발생시키는 원인으로 작용하기 때문에, 스큐 비율이 증가하면 축력이 증가하는 것이다. 따라서 스큐 비율의 변화는 코깅토크와 축력에 동시에 영향을 미치므로, 비대칭 리브가 적용된 전동기를 설계할 때는 축력과 코깅토크를 동시에 고려하여 적합한 스큐 비율을 적용해야 함을 알 수 있다. 이러한 상호 관계를 Fig. 20에 나타냈으며, Fig. 20은 스큐 비율에 따른 코깅토크와 축력을 동시에 비교한 결과를 보여준다.

Fig. 20에서 코깅토크의 제한 조건은 400[mN·m] 이하이며, 축력은 2[N] 이하를 만족해야 한다. 이를 바탕으로 스큐 비율에 따른 코깅토크와 축력을 분석한 결과, 스큐 비율을 80%로 적용해야 함을 알 수 있다.

4. 전동기 타입별 특성 비교

본 논문에서 제안하는 모델의 타당성 검증을 위해, 일반적인 대칭 구조의 전동기, 비대칭 리브가 적용된 전동기, 그리고 스큐 비율이 적용된 전동기 타입을 유한 요소 해석으로 진행하였다. 각 전동기 타입은 Fig. 21에 나타내었으며, (a)는 일반적인 대칭 구조의 자속 집중형 전동기, (b)는 비대칭 리브가 적용된 자속 집중형 전동기, (c)는 전동기 스큐 비율이 적용된 자속 집중형 전동기이다. 또한, Table I에는 각 전동기의 해석 결과를 나타내었다. Table I을 보면, 스큐가 적용되지 않은 (a)는 대칭 구조이므로 축력은 0 N으로 나타나지만, 비대칭 리브가 적용되지 않아 코깅토크가 888.5 mNm로 매우 높게 나타난다. 반면, 비대칭 리브가 적용된 (b)의 경우, 코깅토크는 89.8 mNm로 (a) 대비 크게 저감되지만, 축력은 4.3 N으로 크게 증가하는 문제가 있다. 마지막으로, 스큐 비율이 80%로 적용된 (c)의 경우, 코깅토크는 268.9 mNm, 축력은 1 N인 것을 볼 수 있다. 이는 (a) 모델 대비 코깅토크는 69.7% 저감된 값이며, (b) 모델 대비 축력은 76.7% 저감된 것이다. 즉, 적절한 스큐 비율을 적용하여 자속 집중형 전동기를 설계할 경우, 축력과 코깅토크를 동시에 고려한 설

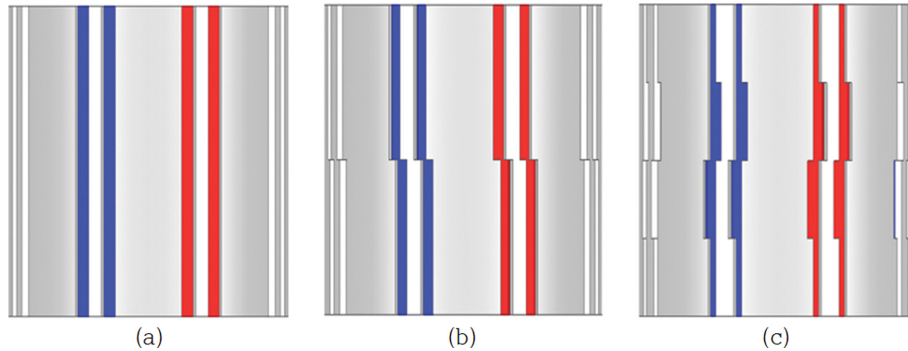


Fig. 21. (Color online) Analysis of characteristics according to motor shape, (a) Symmetric model, (b) Skewed model, (c) Skew ratio applied model.

Table I. Comparison data of cogging torque and axial force by motor type.

	(a) 기본 모델	(b) 비대칭 리브 모델	(c) 스쿼 비율 모델	단위
토크	8.79	9.04	8.99	Nm
코깅토크	888.5	89.8	268.9	m·Nm
축력	0	4.3	1	N
스쿼 비율	0	100	80	%

계가 가능함을 알 수 있다.

V. 맺음말

본 연구에서는 코깅토크와 축력을 동시에 저감할 수 있는 새로운 설계 기법을 제시하였다. 기존 전동기 설계에서 코깅토크 저감을 위한 스쿼 구조는 회전자의 비대칭성을 야기하며, 이로 인해 발생하는 불균형한 자기력은 진동 및 소음의 원인이 되는 축력을 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 목표로 하는 코깅토크와 축력에 따라 스쿼 비율을 조절하는 전동기 설계 기법을 도입하였다. 본 논문의 설계 방법론 검증에 위해 스쿼비를 적용한 전동기를 설계하였고, 기존 모델들과 유한요소 해석을 통해 비교 분석하였다. 그 결과, 제안된 전동기는 스쿼가 적용되지 않은 모델에 비해 코깅토크가 60% 이상 감소하고, 일반 스쿼가 적용된 모델에 비해 축력이 70% 이상 감소됨을 확인하였다. 이로써 본 연구는 축력에 의한 진동과 소음 문제를 해결하고, 코깅토크와 축력을 적정 범위 내에서 동시에 저감할 수 있는 효과적인 전동기 설계 방법을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 RS-2024-00431951). 그리고 본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지수요관리핵심기술개발

사업(중형급 정속 고효율 전동기 개발 및 실증, No. RS-2023-00232767) 재원으로 수행되었습니다.

References

- [1] S.-U. Chung, S.-H. Moon, D.-J. Kim, and J.-M. Kim, IEEE Trans. Ind. Electron. **63**, 302 (2016).
- [2] L. Fang, J.-w. Jung, J.-P. Hong, and J.-H. Lee, IEEE Trans. Magn. **44**, 4393 (2008).
- [3] H.-W. Lee, K.-D. Lee, W.-H. Kim, I.-S. Jang, M.-J. Kim, and J.-J. Lee, IEEE Trans. Magn. **47**, 3653 (2011).
- [4] C.-H. Song, I.-S. Song, H.-S. Shin, C.-H. Lee, and K.-C. Kim, IEEE Trans. Magn. **58**, 8700305 (2022).
- [5] X. Tao, M. Takemoto, R. Tsunata, and S. Ogasawara, IEEE Access. **11**, 2848 (2023).
- [6] H. Tahanian, M. Aliahmadi, and J. Faiz, IEEE Trans. Magn. **56**, 900120 (2020).
- [7] D.-H. Lee, T. H. Pham, and J.-W. Ahn, IEEE Trans. Ind. Electron. **60**, 3637 (2013).
- [8] P. Upadhyay and K. Ragavan, IEEE Trans. Ind. Appl. **60**, 3912 (2024).
- [9] A. Yalavarthi and B. Singh, IEEE Trans. Consum. Electron. **68**, 366 (2022).
- [10] P. Niazi, H. A. Toliyat, and A. Goodarzi, IEEE Trans. Veh. Technol. **56**, 1538 (2007).
- [11] L. Ren, H. Wang, S. Ren, Z. Zhong, F. Peng, and Y. Zhao, IEEE Trans. Ind. Electron. **71**, 4440 (2024).
- [12] L. Masisi, M. Ibrahim, J. Wanjiku, A. M. Aljehaimi, and P. Pillay, IEEE Trans. Ind. Appl. **52**, 3805 (2016).
- [13] Y. Chen, T. Cai, X. Zhu, D. Fan, and Q. Wang, IEEE Trans.

- Appl. Supercond. **30**, 5200406 (2020).
- [14] X. Zhu, W. Wu, L. Quan, Z. Xiang, and W. Gu, IEEE Trans. Energy Convers. **34**, 1178 (2019).
- [15] M.-J. Jeong, K.-B. Lee, H.-J. Pyo, D.-W. Nam, and W.-H. Kim, Energies. **14**, 3758 (2021).
- [16] S. G. Lee, J. Bae, and W.-H. Kim, IEEE Trans. Appl. Supercond. **30**, 5205706 (2020).
- [17] D. Wang, X. Wang, and S.-Y. Jung, IEEE Trans. Magn. **48**, 4228 (2012).
- [18] A. B. Letelier, D. A. Gonzalez, J. A. Tapia, R. Wallace, and M. A. Valenzuela, IEEE Trans. Ind. Appl. **43**, 685 (2007).
- [19] Y. Kawase, T. Yamaguchi, Z. Tu, N. Toida, N. Minoshima, and K. Hashimoto, IEEE Trans. Magn. **45**, 1700 (2009).
- [20] Z. Haisen, W. Yilong, W. Yuhan, Z. Yang, and X. Guorui, IEEE Trans. Magn. **53**, 8103004 (2017).
- [21] G.-J. Park, Y.-J. Kim, and S.-Y. Jung, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 0605205 (2016).
- [22] P. Yongun, Ph.D. Characteristic Analysis and Reduction Method of Cogging Torque for Single-phase Brushless DC Motor, Suncheon University, Korea (2019).
- [23] Z. Q. Zhu, L. J. Wu, and Z. P. Xia, IEEE Trans. Magn. **46**, 1100 (2010).
- [24] N. Niguchi and K. Hirata, IEEE Trans. Ind. Electron. **59**, 2189 (2012).
- [25] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. A. Staton, M. Popescu, and D. Hawkins, IEEE Trans. Ind. Electron. **59**, 2414 (2012).
- [26] J. S. Yoo, Ph.D. Dissertation, A study on improvement of cogging torque characteristics of motor for automotive brake system, Hanyang University, Korea (2019).