Check for updates

Journal of KIIT. Vol. 19, No. 11, pp. 107-113, Nov. 30, 2021. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.11.107

유도전동기의 고정자와 회전자의 스큐 형상에 관한 연구

권춘기*, 공용해**

A Study on Skew Geometry of Stator and Rotor in Induction Motor

Chun-Ki Kwon*, Yong-Hae Kong*

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구 (No. 2017R1D1A1B03029844)를 수행하였고, 2017학년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구를 수행하였음

요 약

고정자 또는 회전자 중에 스큐를 제공하는 방법은 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 정렬에 의해 발생되는 토크 리플 감소에 효과적이어서 대부분의 전동기에 적용되었다. 이러한 기존의 스큐 방법과는 달리, 본 연구는 고정자와 회전자 양쪽에 스큐 제공을 제안한다. 본 연구는 회전자에만 스큐를 제공하는 기존 방법과 비교하였을 때, 고정자와 회전자 양쪽에 스큐를 주는 제안 방법이 토크 리플을 18.4%에서 11.4%로 크게 감소함을 맥스웰 전동기 해석 3D 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 따라서 제안된 방법은 잠수함과 같이 적에게의 노출을 피하기 위해 성능보다는 노이즈의 원인이 되는 토크 리플 개선을 우선시하는 응용 분야에 매우 유용할 것으로 기대된다.

Abstract

The skewing in stator or rotor has been very useful method to reduce torque ripples caused by alignment of stator and rotor slots along the stack. Unlike the existing conventional skewing method, we proposed skewing in both stator and rotor at the same time. Maxwell motor 3D simulation results confirmed that torque ripples in the proposed method improves torque ripples to 11.4% compared to 18.4% of torque ripples in the existing method. The proposed skew method might be very useful in electric battle submarines where reduction of slot harmonics in propulsion drives is one of important factors to avoid detection by the enemy, thus improving vessel survivability.

Keywords

skewing in slots, slot harmonics, torque ripple reduction, average torque, slot alignment, 3D finite element method

* 순천향대학교 의료IT공학과 교수 (교신저자)
- ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2062-8308
** 순천향대학교 의료IT공학과 교수
- ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5639-0616

· Received: Oct. 15, 2021, Revised: Nov. 01, 2021, Accepted: Nov. 04, 2021
· Corresponding Author: Chun-Ki Kwon
Dept. of Medical IT Engineering, Soonchunhyang-ro 22-20, Asan-si, Chungnam, Korea.
Tel.: +82-41-530-3091, Email: chunkikwon@sch.ac.kr

Ⅰ. 서 론

유도전동기를 비롯하여 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 정렬로 인한 토크 리플를 감소하기 위해 스큐(Skew)를 적용하는 것이 가장 효과적으로 코깅 토크, 토크 리플, 전자파 노이즈를 감소하는 것을 많은 연구에서 보여주었다[1]-[9]. 회전자를 이등분하여 각 부분에 대하여 스큐 각도를 반대로 제공하거나[1], 스큐 각도에 따른 토크 리플의 감소를 연구하거나[2], 스큐 적용에 따른 회전자의 비대칭이 미치는 영향[3] 등이 있다. 하지만 이러한 연구는 모두 고정자 또는 회전자 중 하나에 스큐를 주는 방법에 근간을 두고 있다.

이와는 달리, 본 연구는 고정자와 회전자에 모두 스큐를 제공하여 토크 리플 감소 측면에서 개선이 이루어지는지를 검토하였다. 이를 위해서, 본 실험실에서 보유하고 있는 유도전동기의 스펙과 유사한 모델을 앤시스(Ansys)사의 맥스웰(Maxwell) 전동기 해석 툴에 구현하였다.

구현된 모델은 i) 고정자와 회전자에 모두 스큐가 없는 조합, ii) 기존 방법으로 회전자에만 스큐를 제공한 조합, iii) 본 연구에서 제안하는 고정자와 회전자 모두에 스큐를 제공하고 스큐의 방향을 동일 방향과 반대방향으로 제공하는 4가지 조합에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 결과를 비교하였다.

전동기 해석 프로그램의 발전은 물론 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로, 선정된 4가지 조합을 가지는 모델을 앤시스사의 맥스웰 전동기 해석 툴에서 3D 모델링 해석을 수행하여, 정상상태에 도달하였을 때에 조합별로 평균 토크와 그에 상응하는 토크 리플을 획득하고 분석하였다[8][9]. 시뮬레이션 결과는 본 연구에서 제안한 고정자와 회전자에 반대 방향을 가지도록 스큐를 제공하는 것이, 기존 방법보다 토크 리플이 18.4%에서 11.4%로 개선됨을 확인하였으며, 전자계 소음의 최소화가 우선시되는 응용분야에서 유용할 것으로 기대된다.

본 논문은 다음과 같다. 2장은 앤시스사의 맥스웰 전동기 해석 툴에서 선정한 테스트 전동기의 모델을 구축하고 그의 해석 결과가 테스트 전동기와 유사함을 확인하여 전동기 모델의 신뢰도를 확보하였다. 3장에서는 본 연구에서 제안하고자 하는 방법인 고정자와 회전자에 각각 반대 방향으로 스큐를 제공하는 방법을 앤시스 전동기 해석 툴을 활용하여 시뮬레이션을 수행하고, 기존 방법에서의 토크 리플 개선 결과인 18.4%보다 작은 11.4 %로 개선되었음을 보였다. 마지막으로 4장에서는 본 연구에 대한 결론과 향후 연구에 대하여 기술하였다.

Ⅱ. 테스트 전동기 모델링

테스트 전동기는 르로이 소머(Leroy somer)사의 일반적인 산업용 4극(2p = 4) 1.5kW 400V Y결선의 고효율 농형 유도전동기의 정격을 충족하도록 선정하였으며, 주요 정격 파라미터는 표 1과 같다.

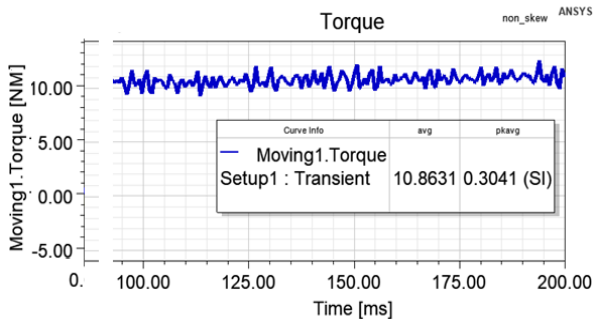
테스트 전동기의 주요 치수들은 르로이 소머 전동기를 전기자동차 등 자동차용 전동기 개발 및 제조업체인 ㈜맥시스(Mcsys.co.kr)에 의뢰하여 획득한 것을 기본으로 하여 설정하였으며, 이를 표 2에 나타내었다.

표 1. 테스트 유도전동기의 정격 파라미터들
Table 1. Rated parameters of the test induction machine

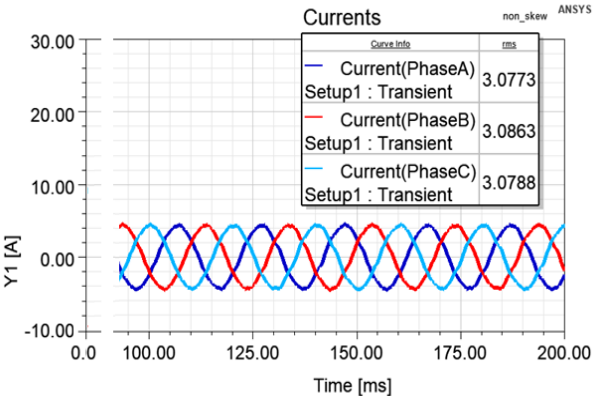
Leroy somer LSMV90LU 3p induction motor		
Parameter	Value	Unit
Rated power (P_h)	1.5	kW
Terminal voltage (U_h)	400	V
Rated current (I_h)	3.1	A
Rated torque (T_h)	9.4	Nm
Rated frequency (f_h)	50	Hz
Rated speed (n_h)	1456	rpm

표 2. 테스트 유도전동기의 주요 치수
Table 2. Main size of the test induction machine

Leroy somer LSMV90LU 3p induction motor			
Parameter		Value	Unit
Stator	Number of slots	48	
	Tooth width	3.15	
	Outside diameter	145	mm
	Inside diameter	116.5	mm
	Stack length	114.94	mm
	Skew	0°	degree
Rotor	Number of slots	28	
	Outside diameter	90	mm
	Stack length	114.55	mm
	Thickness of lamination	0.5	mm
	Skew	0°	degree
Electric-al circuit	Number of turns	66	turn
	Parallel circuit	2	
	Number of layers	1	



(a) 정격 속도에서의 평균 토크 및 토크 리플
(a) Torque and its ripples at rated speed



(b) 정격 속도에서의 정격 전류
(b) Rated current at rated speed

그림 1. 테스트 전동기의 맥스웰 2D 모델 성능
Fig. 1. Performance of test motor maxwell 2D model

또한, 앤시스의 맥스웰 전동기 해석 시뮬레이션 상에 2D 모델로 구축하고 표 1에서 적시한 정격 성능이 나오는 것을 시뮬레이션 모델에 대한 신뢰성을 확보하였다. 본 모델에서는 스큐 여부에 따른 토크 리플의 영향을 살펴보는 연구이므로, 맥스웰 모델에서는 스큐가 없는 것을 기본 모델로 시뮬레이션을 수행하였다.

구축된 모델에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 1에 보였으며, 정격토크가 9.4 Nm 보다 조금 큰 10.86 Nm 인 것은 맥스웰 전동기 해석이 전자장적인 특성만을 고려하므로, 실제 동작에서 발생하는 기계손실이 포함되지 않아서이다.

III. 고정자와 회전자의 스큐 유무 조합에 따른 3D 유한요소법 해석

3.1 스큐 제공에 따른 고정자와 회전자의 조합

본 연구는 전동기의 고정자와 회전자에 제공한 스큐 유무가 전동기 소음 중의 주요 요인 중에 하나인 토크 리플에 미치는 영향을 연구한 것으로, 4가지 타입의 조합에 대해서 3D 유한요소법(FEA, Finite Element Analysis)으로 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째는 고정자와 회전자에 스큐가 없는 조합으로, 시뮬레이션 결과는 그림 2(a)에 나타내었으며 비교용 기준으로 정하였다. 두 번째 조합은 회전자에 스큐를 주는 것으로 기존의 방법에 해당하는 것으로 해석 결과는 그림 2(b)에 나타내었다. 일반적으로 스큐 각도를 한 슬롯 간격으로 선정하고 있어서, 본 연구에서도 고정자 한 슬롯 간격인 7.5°(=360°/48)를 택하였다[3][4].

기존 방법인 두 번째 조합과는 달리, 본 연구에서 제안하는 고정자와 회전자의 양쪽에 스큐를 주는 조합은 동일한 스큐 각도를 가지도록 주는 방법과 역방향으로 스큐 각도를 가지도록 주는 방법이며, 이들에 대해서 해석을 각각 진행하였다(그림 2(c)와 (d)). 이들 조합에 제공한 스큐 각도는 두 번째 조합과 동일한 7.5°를 유지하였다. 이들 조합에 대하여 표 3에 정리를 하였다.

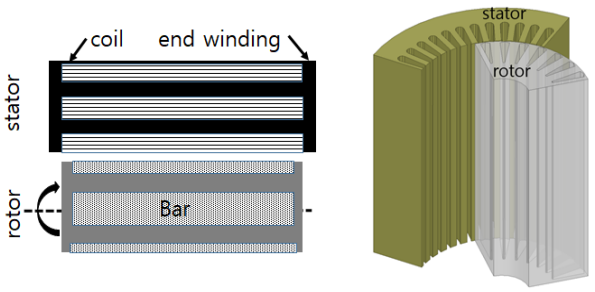
3.2. 스큐의 고정자와 회전자의 조합에 따른 시뮬레이션 결과

앞서 3.1.절에서 기술한 고정자와 회전자에 제공되는 스큐 조합에 대하여, 앤시스사의 맥스웰 전동기 해석 시뮬레이션 툴을 활용하여, 시뮬레이션을 수행하였다.

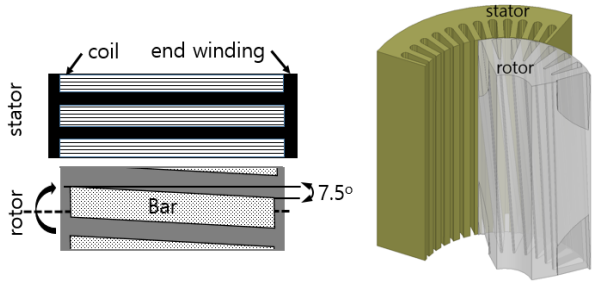
표 3. 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 스큐 유무에 따른 조합
Table 3. Combinations of skew or non-skew on stator and rotor slots

Case \ Skew angle	Stator	Rotor	Remark
No skewed	0°	0°	
Skewed rotor	0°	7.5°	1 slot pitch
Skewed stator and skewed rotor	7.5°	7.5°	same dir.
	7.5°	- 7.5°	opposite dir.

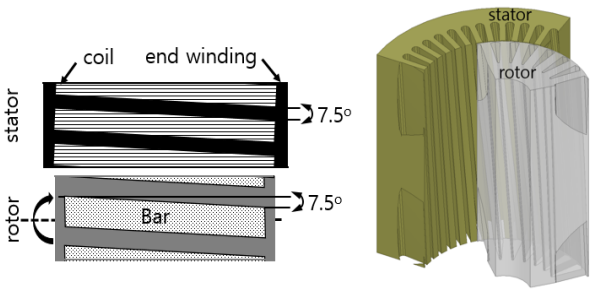
※ stator slot pitch : 7.5° (= 360°/48)



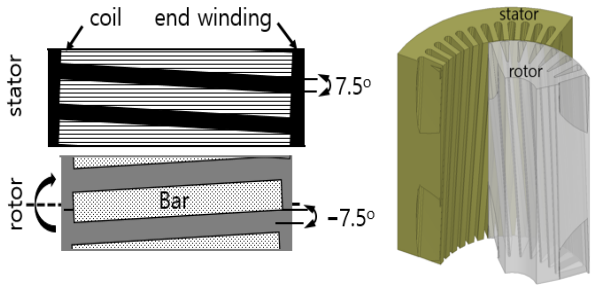
(a) 고정자/회전자 모두 스큐 없음 (조합 1)
(a) No skewed (case 1)



(b) 회전자에만 스큐 제공 (조합 2)
(b) Skewed rotor (case 2)



(c) 고정자/회전자 양쪽에 스큐 제공 (같은 방향, 조합 3)
(c) Skewed stator and rotor (same direction, case3)



(d) 고정자/회전자 양쪽에 스큐 제공 (반대 방향, 조합 4)
(d) Skewed sator and rotor (opposite direction, case4)
그림 2. 테스트 전동기의 맥스웰 2D 모델 성능
Fig. 2. Performance of test motor maxwell 2D model

스큐 제공에 따른 전동기의 출력을 살펴보기 위하여, 2장에서 구축된 2D 모델을 3D 모델로 변환을 수행하였다. 또한, 3D 모델의 경우 과도한 해석 시간을 필요로 하기 때문에[8][9], 이를 해결하기 위하여 태성에스엔이 (tsne.co.kr)사에 클라우딩컴퓨팅을 활용하여 해석을 수행하였다. 시뮬레이션의 운전 환경은 Y결선으로 정격전압 400V를 인가하고, 정격속도인 1456 rpm에서 모터가 회전하는 조건으로 설정하였다.

3.2.1. 고정자와 회전자에 스큐가 없는 조합(조합 1)

이 조합은 테스트 유도전동기 모델에 고정자와 회전자에 스큐가 없는 것으로서, 고정자 슬롯과 회전자 슬롯 간에 정렬이 이루어져, 평균 토크는 10.4 Nm로 크지만, 그로 인한 릴럭턴스 영향으로 토크 리플이 25.6% 로 크다는 것을 그림 3은 보여준다. 이러한 큰 값의 토크 리플은 전동기가 발생하는 전자계 소음의 원인이 되고 있어, 잠수함 등의 추진 동력원으로 사용할 시에, 적군에게 감지당할 수 있는 확률이 높아지게 된다.

3.2.2 회전자에만 스큐가 있는 조합(조합 2)

다음의 조합은 3.2.1.에서의 토크 리플을 감소하기 위하여 지금까지 적용되고 있는 기존 방법인 회전자에만 스큐를 제공한 것으로서, 고정자 슬롯과 회전자 슬롯간의 발생하는 릴럭턴스 성분의 정렬을 줄일 목적으로 회전자에 스큐를 제공하여 고정자 슬롯과 회전자 슬롯이 정렬되는 면적을 줄였다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 스큐 제공에 따른 슬롯간의 정렬 면적의 감소로 인해, 평균 토크는 10.23 Nm로 감소하였지만, 토크 리플은 25.6 % 에서 18.4 % 으로 뚜렷한 향상이 이루어졌다.

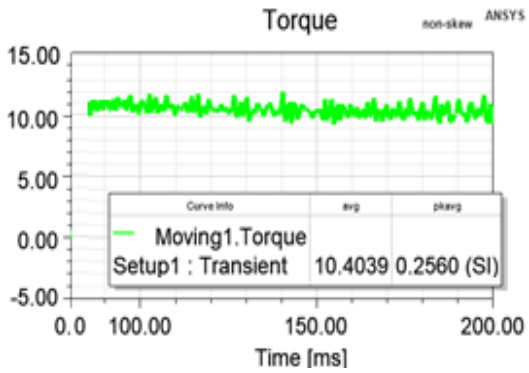


그림 3. 스큐없는 경우의 토크 파형과 토크 리플
Fig. 3. Torque and its ripples in case of no skews

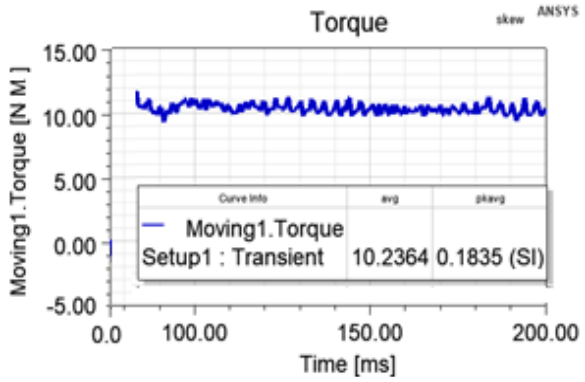


그림 4. 회전자에만 스큐가 있는 조합
Fig. 4. Torque and its ripples in case of skewed rotor slot

이로써, 본 연구에서 앤시스사의 맥스웰 전동기 해석 툴에서 구현한 모델에 대한 신뢰성도 확인된다.

3.2.3 고정자와 회전자 모두에 스큐가 있는 조합 (조합 3과 조합 4)

본 연구에서 제안하는 조합으로, 고정자와 회전자 양쪽에 스큐를 주었을 경우로서, 1) 동일 방향의 스큐 각도로 제공하는 것과 2) 반대 방향의 스큐 각도로 제공하는 것으로 나누어진다.

1) 동일 방향의 스큐 각도를 주는 조합 (조합 3)

고정자와 회전자에 동일 방향의 스큐 각도 (7.5°)로 스큐를 준 조합으로, 3D 시뮬레이션 수행 결과는 그림 5에 나타내었다. 그림 5가 보이듯이, 동일 방향의 스큐 각도를 제공하는 경우에는 스큐없는 조합처럼 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 정렬로 인하여 토크 리플의 개선이 없음을 볼 수 있다. 다만, 스큐가 없는 조합보다 토크 리플이 21.8%로 다소 개선된 것은 스큐된 회전자 슬롯은 축방향 기준으로 사선으로 회전자 표면을 걸쳐지기 때문에, 슬롯의 표면적이 다소 증가한 것에 기인하였다. 결과적으로, 고정자 슬롯에 스큐를 만드는 제작 과정의 어려움을 상쇄할 정도의 토크 리플의 개선이 없었다.

2) 반대 방향의 스큐 각도를 주는 조합 (조합 4)

고정자 슬롯에 주어진 스큐 각도 (7.5°)와 반대 방향의 스큐 각도 (-7.5°)로 회전자 슬롯에 스큐를 준 모델에 대한 3D 시뮬레이션 수행 결과는 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 평균 토크 값이 거의 평균값에 근접함을 육안으로 확인할 수 있다. 반면에, 기존 방법인 조합 2의 결과인 그림 4에서는 평균 토크 값이 다소 평균을 기준으로 변화가 있어 토크 리플이 다소 있음을 확인할 수 있다.

이를 정량적으로 살펴보면, 반대 방향의 스큐 각도를 주는 경우에는 회전자에만 스큐를 제공하는 조합보다 고정자 슬롯과 회전자 슬롯이 정렬되는 면적을 더 많이 줄이게 되어 평균 토크가 다소 감소하였지만, 토크 리플은 11.4%로 감소하여 회전자에만 스큐를 주는 기존 방식인 3.2.2의 조합 2의 18.4 %보다 많은 개선이 이루어졌으며, 고정자 슬롯에 스큐를 주는 제작의 어려움을 충분히 상쇄시키고 있다. 따라서, 전자파 노이즈의 주요 요인인 토크 리플 감소가 더 우선시되는 응용에 적용시 유용함을 볼 수 있다.

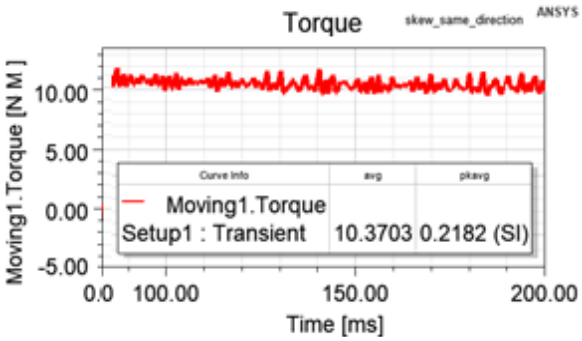


그림 5. 고정자와 회전자에 동일 방향의 스큐 각도로 제공한 조합의 토크 파형과 토크 리플
Fig. 5. Torque and its ripples in case of skews with same angle at both stator and rotor

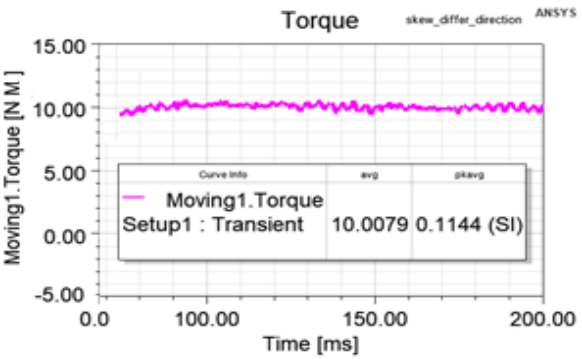


그림 6. 고정자와 회전자에 반대 방향의 스큐 각도로 제공한 조합의 토크 파형과 토크 리플
Fig. 6. Torque and its ripples in case of skews with opposite angle at both stator and rotor

3.3. 고찰

앞서 3.2절에서 고정자와 회전자에 제공되는 스큐 유무에 따라 토크 리플이 얼마나 개선되는지를 살펴보았다. 기존의 방법인 회전자 하나에만 스큐를 줌으로써, 고정자 슬롯과 회전자 슬롯이 정렬되는 간의 면적의 감소로 평균 토크도 감소하지만, 토크 리플의 저감 개선이 많이 이루어짐을 재확인할 수 있었으며, 이는 맥스웰 전동기 해석 툴에서 구현한 테스트 전동기 모델이 검증되었음을 보여준다. 3.2절에서 획득한 4가지 조합에 대하여 수행한 시뮬레이션을 통해 얻은 평균 토크와 토크 리플을 비교하여 표 4에 정리하였다.

본 연구에서 제안한 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 양쪽에 반대 스큐 각도를 제공하는 모델은 고정자 슬롯과 회전자 슬롯이 정렬되는 면적의 감소로 인해 평균 토크는 10.4 Nm에서 10.0 Nm로 감소하였지만, 기존의 방식인 회전자에만 스큐를 주는 모델보다 토크 리플이 18.4%에서 11.4%로 크게 저감되었음을 확인할 수 있다. 고정자와 회전자 모두에 스큐를 주지 않는 모델의 토크 리플을 100으로 기준을 두면, 기존의 방식인 회전자에만 스큐를 가한 모델은 토크 리플이 71.9 로 개선되었지만, 고정자와 회전자 모두에 반대 방향의 스큐 각도를 준 본 연구의 제안 모델은 44.5로 감소됨을 볼 수 있다.

표 4. 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 스큐 유무에 따른 조합

Table 4. Combinations of skew or non-skew on stator and rotor slots

Case	Skew angle		Simulation result			
	Stator	Rotor	Average torque		Torque ripple	
			(Nm)	(%) [1]	(%)	(%) [1]
No skewed	0°	0°	10.4	100	25.6	100
Skewed rotor	0°	7.5°	10.2	98.1	18.4	71.9
Skewed stator and rotor	7.5°	7.5°	10.4	100	21.8	85.2
	7.5°	**-7.5°**	**10.0**	**96.2**	**11.4**	**44.5**

1) No Skew 조합을 100%로 했을 때, 다른 조합의 개선 정도를 비교한 수치임

이는 고정자 슬롯에 스큐를 제작하는 제조과정에서 나타나는 단점보다는 잠수함 등과 같이 전자계 소음 감소가 우선시되는 응용 분야에서 매우 유용함을 알 수 있다.

IV. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 전동기 소음이나 전자파의 주요 발생원 중의 하나인 토크 리플을 줄이기 위하여, 고정자 슬롯과 회전자 슬롯의 양쪽에 반대 방향의 스큐 각도를 제공하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 토크 리플의 개선이 11.4%로 회전자에만 스큐를 주는 기존의 방법의 토크 리플 개선인 18.4%보다 많이 개선되었고 효과적임을 앤시스사의 맥스웰 해석 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

제안된 방법은 이전에 시도된 바 없던 방법으로, 고정자와 회전자의 양쪽 모두에 스큐를 제작해야하는 단점이 있지만, 잠수함 등의 전동추진체인 전동기에서 나오는 전자파의 감소가 더 중요한 응용 분야에서는 필수 방법으로 적용됨이 기대된다.

향후에는 본 연구에서 수행한 시뮬레이션해석 결과를 이론적인 전개와 더불어 실험을 수반한 검증을 수행하고자 한다.

References

[1] Z. Ferkova and V. Kindl, "Influence of Skewed Squirrel Cage Rotor with Intermediate Ring on Magnetic Field of Air Gap in Induction Machine", Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 23, No. 1, pp. 26-30, Feb. 2017. https://doi.org/10.5755/j01.eie.23.1.17580.

[2] M. Jagiela, E. A. Mendrela, and P. Gottipati, "Investigation on a choice of stator slot skew angle in brushless PM machines", Electrical Engineering, Vol. 95, pp. 209-219, Sep. 2013. https://doi.org/10.1007/s00202-012-0252-8.

[3] J. Jung, D. Kim, and S. Bae, "A Study on the Improvement of Characteristics Analysis Precision of Electric Vehicle Traction Motor", in The 52th

KIEE Summer Conference 2021, YongPyeong, Korea, pp. 15-17, Jul. 2021.

[4] D. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", 2nd Ed. The Writers' Collective, pp. 165-168, Mar. 2003.

[5] N. Bianchi and S. Bolognani, "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, pp. 1259-1265, Sep/Oct. 2002. https://doi.org/10.1109/TIA.2002.802989.

[6] R. Islam, I. Husain, A. Fardoun, and K. McLaughlin, "Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 1, pp. 152-160, Jan/Feb. 2009. https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2009653.

[7] H. Jong, "Skew Leakage in Induction Machines", European Transactions on Electrical Power, Vol. 4, No. 1, pp. 43-46, Sep. 2007. https://doi.org/10.1002/etep.4450040107.

[8] H. Lai and D. Rodger, "Comparison of 2D and 3D finite element modelling results of a skewed induction machine", International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Sante Fe, USA, pp. 76-80, Jun. 2002. https://doi.org/10.1049/cp:20020144.

[9] Z. Ferkova, "Comparison of 2D and 3D Modelling of Induction Machine Using Finite Element Method", Advances in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 120-126, Jun. 2015. https://doi.org/10.15598/aeee.v13i2.1346.

저자소개

권 춘 기 (Chun-Ki Kwon)

1992년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사)
1994년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학석사)
2005년 8월 : 퍼듀대학교 전기전산공학과(공학박사)
2008년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 의료IT공학과 교수
관심분야 : 전기모터 제어 및 설계

공 용 해 (Yong-Hae Kong)

1982년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)
1986년 8월 : 뉴욕대학교(Polytech) 컴퓨터공학과(공학석사)
1991년 2월 : 뉴욕대학교(Polytech) 컴퓨터공학과(공학박사)
1991년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 의료IT공학과 교수
관심분야 : 신경망, 최적화