

영구자석 형상 변형을 통한 동기발전기 고조파 저감

변범석* · 박의종** · 김용재***

Harmonic Reduction of Synchronous Generator by
Permanent Magnet Shape Deformation

Beom-Seok Byeon* · Eui-Jong Park** · Yong-Jae Kim***

요약

동기발전기의 고조파는 철손과 동손을 증가시켜 발열의 원인이 된다. 이를 감소시키기 위하여 전기자의 권선법을 분포권, 단절권을 이용하여 고조파를 감소시키는 방법이 있으나 본 논문에서는 영구자석의 형상을 기존에 연구되었던 방법이 아닌 새로운 형상 변형을 통해 고조파를 감소시키며 기전압의 파형을 개선하고자 한다. 형상 변형 방법으로 영구자석의 양단을 절단하고 설정값에 따라 영구자석의 면적을 증가, 감소시켜 공극의 길이를 조절한다. 이때 자속밀도의 분포를 다르게 하여 이에 따른 기전압과 왜형률을 비교하였다. 이를 통해 논문에 기술된 영구자석의 형상 변화 모델들을 비교하고 가장 효과적인 변형 방법을 나타냈다.

ABSTRACT

The harmonics of synchronous generators increase iron and copper loss, which is the cause of fever. For harmonic reduction, the armature winding method is used as a distribution winding, a short pitch winding. In this paper, we want to improve the waveform of the instrument voltage by reducing the harmonics in a new way to the shape of the permanent magnet. The method cuts both ends of the permanent magnet and adjusts the air gap by increasing and decreasing the area according to the set value. By varying the distribution of magnetic flux density, the resulting electromotive voltage and strain were compared. This compares the shape-changing models of permanent magnets and shows an effective deformation method.

키워드

Harmonics, Permanent Magnet, Shape Change, Synchronous Generator, Total Harmonic Distortion
고조파, 영구 자석, 형상 변화, 동기 발전기, 왜형률

1. 서론

최근 온난화와 같은 지구 환경의 문제가 중요한 문제로 떠오르고 있다. 이는 친환경 에너지에 관한 관심

과 투자가 증가하게 되는 계기가 되었다. 친환경 에너지인 신재생 에너지의 대표적인 풍력발전의 시스템에 는 주로 고효율, 고성능에 관한 부분이 중요하게 작용 하기 때문에 직접 구동형이 선호되고 있으며 영구자

* 조선대학교 전기공학과(bbs5817@chosun.kr, parkej21@chosun.ac.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전기공학과

• 접수일 : 2022. 09. 15

• 수정완료일 : 2022. 10. 29

• 게재확정일 : 2022. 12. 17

• Received : Sep. 15, 2022, Revised : Oct. 29, 2022, Accepted : Dec. 17, 2022

• Corresponding Author : Yong-Jae Kim

Dept. Electrical Engineering, Chosun University,

Email : kimyj21@chosun.ac.kr

석형 동기발전기가 사용되고 있다[1-2].

이러한 영구자석을 사용한 동기발전기의 영구자석은 네오디뮴 자석(NdFeB)을 사용하여 운전시 일반적인 유도 발전기를 이용한 방식보다 효율이 높으며 효율을 극대화하기 위해서는 손실을 줄여야 한다. 손실의 대표적인 철손과 동손은 출력 전압을 감소시킨다. 이를 줄이는 방법으로 고조파를 감소하는 방법이 있으며 고조파 저감을 위해 전기자 권선법을 이용하는 방법이 있다. 전기자 권선을 이용한 고조파 저감법은 발전기의 전기자 권선법에서 분포권을 적용하게 되면 회전자에 원주 방향으로 다수의 슬롯이 분포되도록 구성되며, 반경 방향 공극 자속의 분포를 더욱 정현적으로 만들어내는 효과를 낼 수 있지만, 극 슬롯 조합에 따라 사용하지 못하는 극 슬롯 조합이 존재한다[3-4]. 고조파 저감을 위한 다른 방법으로는 영구자석의 형상 변화를 통해 고조파를 감소시킬 수 있다.

형상 변화를 적용하기 위해 사용한 표면부착형 영구자석(SPM)에서 공극면이 균일한 원통형을 사용하였다. 원통형 영구자석의 형상 변형 방법은 모따기, 라운딩, 노치, 필렛 등의 형상 변형을 적용할 수 있다[5]. 본 논문에서는 영구자석 전단부와 후단부의 변형에 따라 고조파의 변화를 확인하기 위해 앞서 언급한 형상 변형 방법을 사용하지 않고 새로운 방법으로 형상 변형을 진행하였다. 또한 공극 자속밀도의 변화에 따라 기전압과 왜형률의 관계가 있음을 확인한 연구들이 진행되었다[6-10]. 이는 영구자석 형상 변형으로 공극 자속밀도의 변화를 주어 기전압과 왜형률을 개선할 수 있는지 확인하기 위해 수행되었다.

고조파 개선을 위해 간소화한 영구자석 형상 변형 연구를 선행하여 수행했고 선행연구를 통해 영구자석 형상 변형이 기전압의 왜형률 개선에 도움이 되는 것을 확인하였다[11]. 하지만 선행연구의 고조파 개선은 기전압의 감소를 크게 유발하여 효율성이 부족하다고 판단했다. 이에 따라 선행연구의 추가적인 고조파 개선과 감소된 기전압을 높이기 위하여 1차 개선된 영구자석의 회전 방향에 따라 전단부와 후단부를 절단과 증가를 통해 형상변형을 진행하였다.

II. 영구자석 형상 1차 개선모델

영구자석의 형상 변형에 따라 기전압과 왜형률을 비교하기 위하여 동일한 극수, 슬롯 수의 동기발전기 모델에 전기자 권선 내의 점적률과 발전기의 직경, 적층의 사이즈와 재료 등을 동일하게 하였으며 영구자석의 형상만을 변경하여 진행하였다. 그림 1은 선행연구 과정으로 기존 영구자석의 개선을 진행할 때 회전자에 회전 방향에 따라 절단을 진행하는 방법을 나타내며 양단면을 동시 절단하였을 때 효과적이었다.

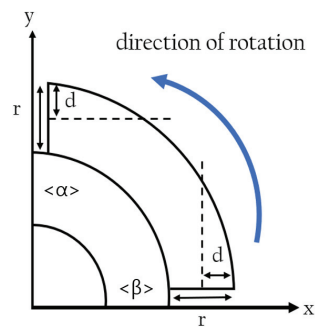


그림 1. 영구자석 절단
Fig. 1 Permanent magnet disconnect

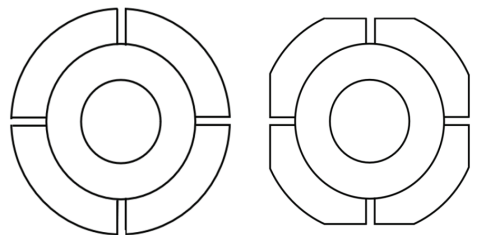


그림 2. 기본 모델과 1차 개선모델
Fig. 2 Basic Model and 1st Improvement Model

영구자석 절단을 하여 기본 모델과 개선된 모델은 그림 2를 통해 비교할 수 있다. 좌측은 기본 모델이며 우측은 영구자석의 양단을 절단하여 1차 개선한 모델이다. 1차 개선모델의 경우 그림 1을 통해 회전 방향과 개선 방향에 따라서 기본 모델의 영구자석을 회전 전단 방향과 후단 방향에 각각 0.5mm에서부터 시작

하여 2mm까지 절단하여 비교하는 과정이 있었다.

전단부의 절단이 후단부의 절단보다 효과적이며 동시에 전단부, 후단부를 같은 길이로 절단하였을 경우 전단부를 절단하는 것 보다 효과적이었다. 이때 양단 1.5mm를 절단하여 개선하는 것이 기전압은 600V에서 579V로 3.5% 감소하였지만, 왜형률이 4.49%에서 2.69%로 1.8 %p를 개선하였다. 또한 3 고조파와 5 고조파가 감소하여 기본파의 비율이 82.63%에서 86.7%로 증가하였다. 이에 따라 기전압의 파형 개선을 하는데 효과적임을 확인하였다. 영구자석의 전단부와 후단부가 수직으로 1.5mm씩 절단된 모습을 확인할 수 있으며, 표 1을 통해 기본 모델과 1차 개선모델의 기전압과 왜형률을 비교할 수 있다.

표 1. 기본 모델과 1차 개선모델의 비교
Table 1. Comparison of basic model and 1st improvement model

	Basic model	1st Improved model
Number of Pole	4	
Number of Slot	9	
EMF [V]	600	579
THD [%]	4.49	2.69

III. 각도를 적용한 영구자석 형상 변형

3.1 영구자석 형상 변형 방법

선행연구를 통해 영구자석의 절단을 통해 왜형률이 개선됨을 확인하였다. 추가적인 개선을 진행하고자 개선모델의 회전 방향에 따라 전단부와 후단부를 정하여 θ 를 증가, 감소시키며 영구자석의 형상을 변형하였다. 편의상 전단부를 α section, 후단부를 β section으로 하겠다.

형상 변형 방법은 그림 3에서 나타낸다. θ 의 범위 내에서 영구자석의 α section과 β section의 증가(+), 감소(-)하는 방법들을 나열하였다. 형상 변화는 θ 범위가 기본 모델의 공극 길이인 1mm를 넘어서지 않는 최대 각도인 10 deg까지 증가시켰으며, 감소하는 경우 각도 증가 10 deg에 맞춰 -10 deg까지 범위를 선정하였다. α 부분과 β 부분의 동시 감소는 기전압이

많이 감소하고 1차 개선모델보다 왜형률이 증가하였기 때문에 연구 모델에서 제외하였다.

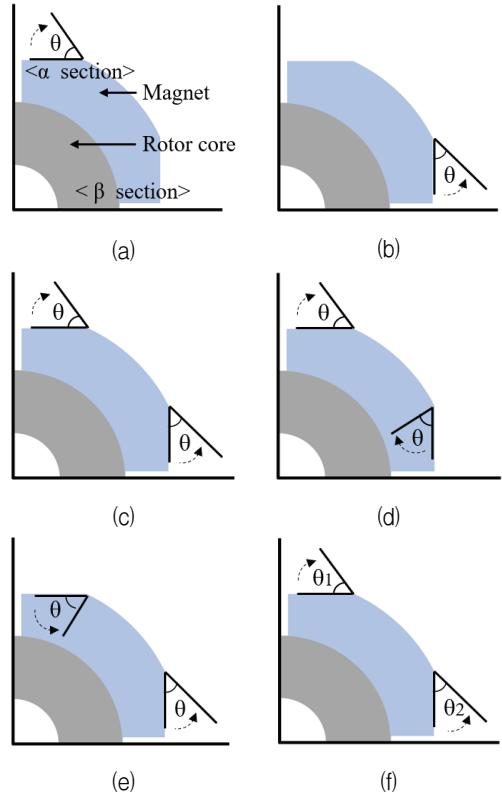


그림 3. 형상 변형 개념도

Fig. 3 A concept of shape deformation

- (a) α section +, (b) β section +, (c) α, β section +,
- (d) α section +, β section -, (e) β section +, α section -, (f) Each increase in α and β

3.2 변형 모델별 기전압과 왜형률 비교

기본 모델에서 1차 개선모델로 개선 중 영구자석의 α 부분만의 절단, β 부분만의 절단, 그리고 α , β 부분을 동시에 같은 길이로 절단하는 과정이 있었다.

단일 방향 절단 시 α 부분이 β 부분의 절단보다 왜형률 개선에 도움이 되었다. 또한 α , β 부분을 동시에 절단하는 것이 더 효과적임을 선행연구에서 확인하였다. 이에 따라 3.1절의 형상 변형 중 공통으로 영구자석의 크기가 증가하는 방법으로

- (a) α 부분의 θ deg만큼 증가.

(b) β 부분의 θ deg만큼 증가.

(c) α , β 부분의 동시 θ deg만큼 증가이다.

모델들의 기전력과 왜형률 먼저 비교하였다. 표 2는 영구자석의 단일 방향(α 부분, β 부분)의 θ 증가와 양단을 동시에 증가 시 기전압과 왜형률을 확인할 수 있다. 형상 변화 시 왜형률의 변화는 그림 4를 통하여 표현하였으며 θ 증가에 따른 형상 변화 시 α 부분의 증가를 통한 형상 변화보다 β 부분의 증가를 통한 형상 변화가 왜형률 개선에 효과적이다. 양단을 동시에 증가한 형상 변화는 θ 의 크기가 작을 때 효과적이었으나 증가함에 따라 왜형률이 증가하는 폭이 커져 1차 개선모델보다 증가하게 됨을 알 수 있다.

표 2. 전단부, 후단부, 전단부 후단부 동시 증가
Table 2. Increase of α section and β , increase of both α and β

	θ [deg]	α section +	β section +	α and β section +
EMF[V]	1	579.5	579.6	580.3
THD[%]		2.62	2.59	2.53
EMF[V]	2	580.3	580.3	581.7
THD[%]		2.57	2.5	2.42
EMF[V]	3	581	581	583.1
THD[%]		2.53	2.42	2.35
EMF[V]	4	581.7	581.7	584.4
THD[%]		2.5	2.34	2.35
EMF[V]	5	582.4	582.4	585.5
THD[%]		2.48	2.28	2.43
EMF[V]	6	583.1	583.1	587.2
THD[%]		2.49	2.25	2.59
EMF[V]	7	583.8	584.2	588.6
THD[%]		2.52	2.25	2.8
EMF[V]	8	584.6	584.6	590
THD[%]		2.57	2.26	3.03
EMF[V]	9	585.3	585.3	591.4
THD[%]		2.65	2.3	3.27
EMF[V]	10	586.0	586.1	592.8
THD[%]		2.76	2.37	3.55

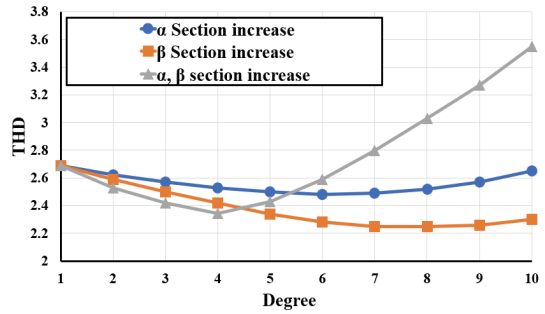


그림 4. 전단부, 후단부, 전단부 후단부 동시 증가
Fig. 4 Increase of α section and β , increase of both α and β

단일 방향의 θ 증가 또는 같은 크기로 양단을 θ 만큼 증가시킨 형상 변형이 아닌 형상 변형은 다음과 같다.

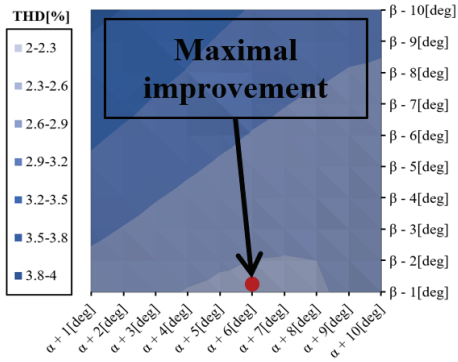
(d) α 부분의 θ 증가 시 β 부분의 θ 는 감소.

(e) β 부분의 θ 증가 시 α 부분의 θ 를 감소.

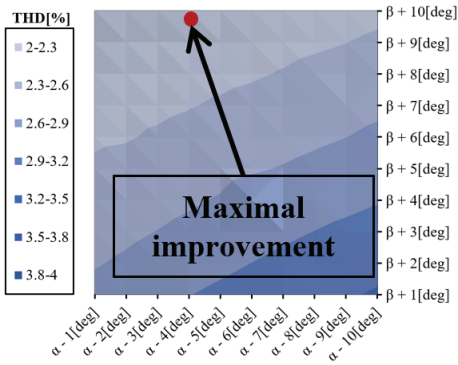
(f) α 부분과 β 부분의 θ 를 다른 크기로 증가시킨 모델이다.

(d)와 (e)의 경우 각각의 왜형률을 그림 5를 통하여 동시에 비교 하였다. 표 2와 같이 동시에 기전압과 왜형률을 비교하지 않은 이유는 기전압의 차이는 각각 0.1V 이내로 동일한 수준이었으나 비교군의 수가 많아 동시에 표로 비교하기 어려워 그림 5(a)~5(c)로 분리하였다.

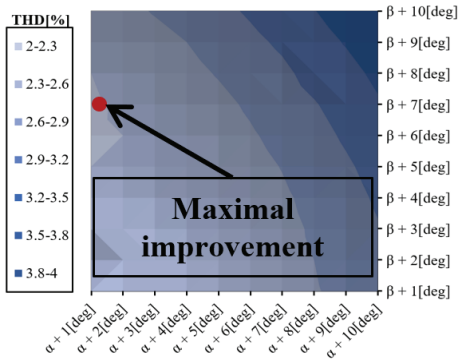
그림 5(a)를 통해 α 부분의 θ 가 증가함에 따라 β 부분의 θ 가 감소가 커지게 될 때 왜형률이 좋지 않으며 β 부분의 감소가 작은 모델들이 좋은 왜형률 경향을 나타낸다. 형상 변화 (d)는 그림 5(b)를 통해 α 부분의 θ 의 감소 크기가 3~6[deg] 감소하며 β 부분의 θ 를 증가하는 모델일수록 왜형률이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또한 형상 변화 (f)는 그림 5(c)를 통해 α 부분의 θ 가 조금 증가하였을 때 β 부분의 θ 를 4~8[deg] 정도 증가하였을 경우 왜형률의 개선이 좋았다. 이는 형상 변화 (c)보다 더 정확하게 양단면을 증가시켰을 때 더 효과적인 개선 방법을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 형상 변화 별 왜형률
Fig. 5 THD by shape change

- (a) α section increase, β section decrease,
- (b) β section increase, α section decrease,
- (c) Each increase in α and β

3.3 형상 변화 별 THD 최대 개선모델

형상 변화를 통하여 변화 방법들에 따라 각각의 왜

형률이 최대로 개선된 모델들은 다음과 같다.

- (1) α 부분만의 5 deg 증가
 - (2) β 부분만의 7 deg 증가
 - (3) α, β 부분 동시 4 deg 증가
 - (4) α 부분 6 deg 증가 β 부분 1 deg 감소
 - (5) β 부분 10 deg 증가 시 α 부분 4 deg 감소
 - (6) α 부분 1 deg 증가 시 β 부분 7 deg 증가이다.
- 모델들의 기전압과 왜형률은 표 3, 그림 6과 같다. 최대 개선모델들은 Model (1)~(6)으로 명칭할 것이다.

표 3. 최대 개선모델별 기전압과 왜형률
Table 3. Maximum improvement models EMF and THD

Comparative model	EMF[V]	THD[%]
Basic model	600.0	4.49
1st Improved model	578.9	2.69
model (1)	582.1	2.48
model (2)	584.2	2.25
model (3)	584.4	2.35
model (4)	582.8	2.55
model (5)	583.1	2.18
model (6)	584.9	2.28

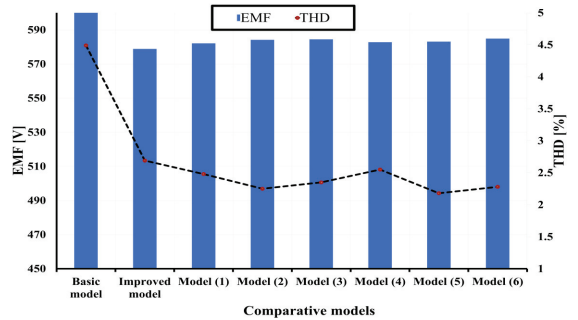


그림 6. 최대 개선모델별 기전압과 왜형률
Fig. 6 EMF and THD of the maximal improvement models

1차 개선모델을 α 부분과 β 부분의 변형하여 개선한 모델들의 기전압과 왜형률을 비교하였다. Model (2)와 Model (5)를 비교 시 β 부분 증가 시 왜형률을 개선하는 데 효과적이나, β 부분을 단독적으로 증가시킨 것이 아닌 α 부분의 θ 가 일정값으로 감소하여 β

부분을 증가시킨 모델들의 왜형률이 더 많이 개선되었다. 결과적으로 Model (5)의 형상 변형 방법과 같이 α 부분의 감소와 β 부분의 증가를 동시에 진행한 영구자석 형상 변형 방법이 왜형률 개선에 좋았으며 이는 1차 개선모델과 비교할 때 왜형률 개선에 효과적임을 확인하였다. 최대 개선된 모델들의 왜형률 변화를 확인하였으며 왜형률 개선 요인인 고조파의 비교를 통해 어떠한 차수의 고조파가 개선에 효과적인지 모델별로 고조파를 비교하였다.

IV. 변형모델별 고조파 성분 비교

왜형률의 개선 과정에서 고조파의 변화를 확인하기 위해 기본 모델과 1차 개선모델, α 부분과 β 부분의 θ 를 감소 또는 증가하여 변형한 Model (1)~(5)의 기본파와 홀수 차 고조파를 비교하였으며 짝수 차 고조파는 공통적으로 2V 정도로 비슷하여 생략하였다.

기본 모델 대비 전단부의 감소는 3 고조파와 5 고조파의 크기가 많이 감소함을 표 4와 그림 7을 통하여 확인할 수 있다. 1차 개선모델과 비교할 경우 α 부분을 증가하는 방향으로 형상 변형하여 최대개선이 된 Model (1)과 Model (4)는 1차 개선모델과 비교해 THD는 감소하였으나 기본파 비율이 더 감소하였다. β 부분을 증가시켜 최대 개선된 Model (2), (5), (6)은 THD가 감소하였으며 기본파 비율은 증가하였다. 개선모델 중 최대개선은 3.3 절의 Model (5)이며 기본 모델 대비 3 고조파 30.49V 감소, 5 고조파 6.49V 감소시켜 전체 왜형률은 2.31%p 개선하였다.

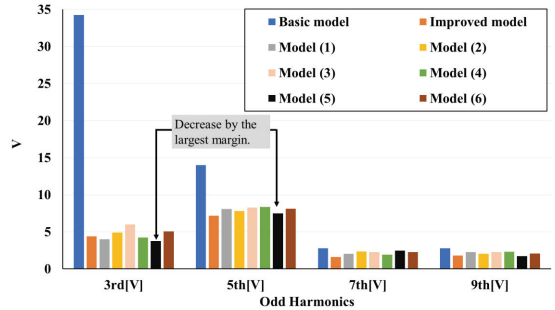


그림 7. 최대 개선모델별 고조파
Fig. 7 Harmonics by maximum improvement model

V. 결 론

본 연구는 영구자석의 형상 변형을 통해 고조파를 감소시키고 기전압 파형을 개선하기 위해 진행되었다. 선행연구에서 진행된 영구자석 형상 변형 방법은 영구자석 사이 공극 내에서 수직으로 절단하는 일종의 챔퍼링 과정을 통해 1.5mm씩 절단하는 1차 개선모델을 만드는 과정이 수행되었다. 1차 개선모델은 기본 모델의 왜형률을 4.49%에서 2.69%로 개선하였으나 문제점은 21V의 기전압 감소로 인하여 효율성이 떨어진다는 것이다. 이러한 문제를 해결하는 동시에 추가적인 왜형률 개선을 위해 영구자석의 면적을 추가로 절단, 증가하는 형상 변형을 시도하였으며 각 모델을 비교하는 연구를 본 논문에서 수행하였다.

기전압 감소를 보완하기 위해 진행된 추가 형상 변형 연구 과정에서 전단부 영구자석의 면적 증가가 개선에 효과는 있었으나 후단부 영구자석 면적 증가가 더 효과적이다. 또한 후단부의 단독 증가보다는 전단부 영구자석 절단이 같이 수반될 때 가장 좋은 개선이 되는 것을 확인하였다. 최대 개선모델은 전단부를 4 deg 감소시키고, 후단부를 10 deg 증가시켰을 때이다.

최대 개선모델의 기전압은 583.1V, 왜형률 2.18%로서 1차 개선모델보다 기전압을 4.2V 증가시키고 왜형률을 추가로 0.51%p 개선하였다. 또한 기본 모델과 비교 시 16.8V의 전압 감소가 있었으나, 왜형률을 2.31%p 개선하는 것을 확인하였다. 기본파 비율을 확

표 4. 최대 개선모델별 고조파

Table 4. Harmonics by maximum improvement model

model	1st[V]	3rd[V]	5th[V]	7th[V]	9th[V]
Basic	847.42	34.25	14	2.77	2.78
1st Improved	818.27	4.37	7.18	1.61	1.81
(1)	823.28	4.00	8.09	2.05	2.25
(2)	825.84	4.91	7.81	2.35	2.05
(3)	826.19	6.00	8.28	2.29	2.26
(4)	823.81	4.24	8.34	1.93	2.3
(5)	824.43	3.76	7.51	2.45	1.73
(6)	826.86	5.04	8.11	2.28	2.07

인하면 82.63%에서 87.93%로 증가하였다. 기본과 비율의 증가 원인으로서는 3 고조파 30.49V 감소, 5 고조파 6.5V 감소이다. 이를 통해 본 논문의 영구자석 형상 변화를 통하여 기전압과 왜형률의 개선이 효과적임을 확인하였으며 기존의 회전 전단부의 고정자에서 발생하는 개구부 슬롯의 전자기적 문제를 해결하는데 도움이 되었으며 1차 개선모델의 전압 감소 문제와 추가적인 왜형률 개선을 하였다. 또한 본 논문에서 연구한 극/슬롯 조합이 아닌 다른 극/슬롯 조합에서 적용을 해보며, 발전기가 아닌 전동기에서 토크와 리플의 개선이 가능한지 추가 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(2021).

References

- [1] E. Kim, "Optimal Design of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Turbine System," Master's Thesis, Dongeui University Graduate School of Industrial Technology, 2008.
- [2] J. Choi, C. Moon, Y. Chang, "A Study on System Retrofit of Complex Energy System," *Korea Institute of Electronic communication Science*, vol.16, Issue 01, 2021, pp. 61-68.
- [3] C. Kim and J. Choi, "Analysis of No-load Generation Characteristics by Pole/Slot Combination of Synchronous Generator for Hydroelectric Power," in *Proc. Korea Society for Fluid Machinery Int. Conf. Communications*, Jeongseon, Korea, December. 2017, pp. 85-86.
- [4] J. Kim, B. Kim, "An Optimal Design Method of a Linear Generator for Conversion of Wave Energy," *Korea Institute of Electronic communication Science*, vol.16, Issue 06, 2021, pp. 1195-1203
- [5] J. Yoon, U. Bong, S. An, J. Song, R. Kim, and S. Hahn, "Cogging Torque Analysis of Low-Speed High-Torque Permanent Magnet Motors According to Magnet Shapes," In *Proc. Korean Institute Electrical Engineers Int. Conf. Communications*, Busan, Korea, July 2020, pp. 1273-1274.
- [6] J. Yan, Q. Zhang, and Y. Feng, "Effect of Slot Opening on the Cogging Torque of Fractional-Slot Concentrated Winding Permanent Magnet Brushless DC Motor," *J. of the Korean Magnetic Society*, vol. 21, no. 1, 2016, pp. 78-82.
- [7] D. Im, C. Kim, and Y. Jung, "Harmonic Analysis of Output Voltage in Synchronous Generator Taking Account of the Rotor Movement," *J. of the Korean Magnetics Society*, vol. 5, no. 2, 1995, pp. 103-108.
- [8] E. Lee, H. Cho, and J. Kim, "Analysis of air gap flux density distribution by the rotor eccentricity and slot effects," In *Proc. Korean Institute Electrical Engineers, Int. Conf. Communications*, 1995 pp. 39-42.
- [9] H. Kim, J. Kim, and C. Kim, "A Study on Sinewave Air Gap Flux Density of Surface Type Magnet Motor," *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, vol. 56, no 9, 2007, pp. 1571-1576.
- [10] D. Bae, D. Kim, J. Park, D. Lee, and S. Lee, "Analysis on Air-Gap Magnetic Flux of Synchronous Generator According to Short-Circuit Types in Winding," *J. of The Korean Institute Electrical Engineers*, vol. 67, no. 1, 2018, pp. 929-935.
- [11] B. Byeon, E. Park, and Y. Kim, "Harmonics and Power Analysis of Permanent Magnet Shape of Synchronous Generator," In *Proc. Korean Institute Electrical Engineers, Int. Conf. Communications*, Yeosu, Korea, July 2022, pp. 227-228.

저자 소개



변범석(Beom-Seok Byeon)

2021년-현재 조선대학교 전기공학
학과 재학

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석



박의종(Eui-Jong Park)

2013년 조선대학교 전기공학과 졸업
2015년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
2020년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2021년~현재 조선대학교 스마트이동체융합시스템 공학부 조교수

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석



김용재(Yong-Jae Kim)

1996년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)
2003년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학석사)

2006년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학박사)

2007년~현재 조선대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석