ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 27(1), 1-8 (2017) https://doi.org/10.4283/JKMS.2017.27.1.001

A Study on the Determination of Slot's Number of Rotor to Reduce Noise and Vibration and Design the 3-Phase Induction Motor Considering Kinetic Energy in Flywheel Energy Storage System

Jae Ho Ryu, Hui Min Kim, Chee Woo Lee, and Gwan Soo Park*
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Dong Wook Jeong
LG Electronics Inc., Changwon 51533, Korea

(Received 11 November 2016, Received in final form 8 February 2017, Accepted 10 February 2017)

Flywheel Energy Storage System (FESS) is composed by flywheel generating rotating potential energy and motor/generator set charging and discharging electric potential energy. The flywheel and motor/generator is connected by rotating shaft. And torque characteristics of motor/generator part can influence charging and mechanical traits of FESS. This paper analyze about motor/generator design method of 5 [kWh] FESS and torque ripple, harmonic effects by change of slots. At First, this paper proposes a method to estimate the flywheel size and the rotor size of the motor from the the rotational kinetic energy by inertia of FESS. The number of induction motor rotor slots for torque ripple reduction in the high speed operation region is selected. This paper performs to reduce the noise and vibration of the flywheel composed of coaxial with motor/generator and flywheel and realize the high efficiency.
Keywords : FESS, slot, 3-phase induction motor, torque ripple, harmonics, FESS design

운동 에너지를 고려한 Flywheel Energy Storage System 설계와 진동 저감을 위한 3상 유도기의 슬롯수 산정에 관한 연구

류재호 · 김희민 · 이치우 · 박관수*
부산대학교 전기컴퓨터공학부, 부산시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241

정동욱
LG전자, 경남 창원시 성산구 성산패총로 170, 51533

(2016년 11월 11일 받음, 2017년 2월 8일 최종수정본 받음, 2017년 2월 10일 게재확정)

플라이휠 에너지 저장 장치(Flywheel Energy Storage System, FESS)은 회전 운동 에너지를 저장하는 플라이휠 부분과 저장된 회전 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 전동기/발전기 부분으로 구성된다. 일반적으로 플라이휠의 회전축은 전동기 및 발전기의 회전축과 동축 일체형으로 연결되고, 이때 전동기 및 발전기의 전자기 토크특성에 따른 동특성 변화는 전체 플라이휠 에너지 저장 장치의 충방전 특성과 기계적인 출력에 영향을 미친다. 본 논문에서는 5[kWh] 급 플라이휠 에너지 저장 장치 용 3상 유도전동기의 설계방법과 회전자 슬롯 수 변화에 따른 토크리플 특성과 고조파 영향을 중점적으로 분석하였다. 먼저, 플라이휠 에너지 저장 장치의 용량과 관성 모멘트에 의한 회전운동에너지의 관계식으로부터 플라이휠 크기와 전동기의 회전자 크기를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한 플라이휠 에너지 저장 장치의 회전축의 고속구동 조건을 반영하여, 고속운전 영역에서의 전동기 토크리플 저감을 위한 유도전동기 회전자 슬롯수를 선정하였다. 이로부터 본 논문에서는 전동기 회전축과 동축으로 구성된 플라이휠의 소음 · 진동을 줄이고 고효율 충방전 특성을 구현하고자 한다.
주제어 : Flywheel Energy Storage System, 슬롯, 3상 유도전동기, 고조파, 토크리플, 플라이휠 에너지 저장 장치 설계법

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-51-510-2788,
Fax: +82-51-513-0212, e-mail: gspark@pusan.ac.kr

I. 서 론

1995년 교토의정서에 따라 2012년 총 37개국은 앞으로의 온실가스 총 배출량을 1990년 수준보다 평균 5.2 % 감축을 하기로 하였다. 이 협약은 이산화탄소를 줄이는 일환으로 전기, 수소 자동차등의 친환경 운송수단의 발전과 더불어 에너지 저장 시스템의 발전을 촉진하였다. 에너지 저장 수단에는 크게 축전기식 에너지 저장 장치와 배터리 에너지 저장 장치 그리고 플라이휠 에너지 저장 장치가 있다. 축전기식 에너지 저장 장치는 충전시간이 매우 짧은 장점을 가지지만, 초 단위의 매우 짧은 방전 시간과 좋지 않은 에너지 밀도 특성을 가진다. 반대로 배터리 식 에너지 저장장치는 니켈 또는 리튬을 이용한 화학적 저장 방식으로 에너지의 밀도가 높으며 방전시간이 매우 긴 장점을 가지고 있지만, 충전시간이 그만큼 긴 단점을 가지고 있다. 마지막으로 플라이휠 에너지 저장 장치(Flywheel energy storage system, FESS)는 회전 운동 에너지를 저장하는 플라이휠 부와 저장된 회전 운동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 전동기/발전기 부분으로 구성된 저장 장치이다.

플라이휠 에너지 저장 장치는 용량이 적은 단점을 가지지만 충전이 빠르고 에너지 밀도가 높은 장점을 가지며, 축전기식과 배터리식의 중간 정도인 짧은 방전시간을 가진다. 이러한 특징을 바탕으로 플라이휠 에너지 저장 장치는 전동차 또는 전기 자동차 등의 운송 수단 산업 분야에서 꾸준히 연구되어지고 있다. 일본은 1970년 이후 전동차에 에너지 저장 기술을 적용시켜 12 %의 에너지 저장 효과를 달성하였으며, 1988년 상용화하여 이용 중이다[1, 2]. 그리고 2014년 Volvo 자동차 주식회사가 Volvo Powertrain사와 SKF사와의 공동 프로젝트를 통해 플라이휠 KERS(Kinetic Energy Recovery Systems) 으로 알려진 에너지 저장 시스템을 자동차 후부 축에 장착 시도 중이며, 뉴욕 지하철 또한 플라이휠 저장 시스템을 설치하여 이용 중이다.

현재 전기자동차를 비롯한 전동기로 운영되는 운송수단에는 유도 전동기가 많이 사용되고 있다. 유도전동기는 영구자석 전동기에 비해 견인력은 좋지 못하지만 운전시의 가/감속 특성이 좋으며, 특히 간단한 구조와 높은 견고성 그리고 양산 비용이 저렴하다는 장점으로 인해 차량용으로 많이 사용되고 있다[3, 4]. 차량용으로 많이 사용되는 유도전동기에 플라이휠을 동축으로 연결하여 회전에너지를 전기에너지로 변환시켜 에너지를 좀 더 효율적으로 사용할 수 있다[5].

따라서 본 논문에서는 플라이휠 에너지 저장 장치의 용량과 관성 모멘트에 의한 회전운동에너지의 관계식으로부터 플라이휠 크기와 전동기의 회전자 크기를 산정할 수 있다. 또한, 산정 되어진 모터/발전기의 회전자의 고속운전 회전 시 발생하는 토크리플을 저감하기 위해 회전자 슬롯수를 선정하였다. 이로부터 본 논문에서는 전동기 회전축과 동축으로 구성된 플라이휠의 소음 · 진동을 줄여 고효율 충방전 특성의 플라이휠 에너지 저장 장치를 설계방안을 제안하였다.

II. 플라이휠 에너지 저장 장치의 설계

1. 플라이휠 에너지 저장 장치용 플라이휠의 설계

플라이휠에서 가장 중요한 부분은 관성모멘트의 관점에 의한 설계이다. 관성 모멘트란 회전축을 중심으로 회전하는 물체가 계속해서 회전을 지속하려는 성질의 크기를 나타낸 것이다. 관성 모멘트는 $\boldsymbol{I}$로 나타내며 단위는 $kg \cdot m^2$로 표현된다. 회전축에 대비해 강체의 질량의 분포에 따라 정해지는 양이며 질량 m이 r만큼 떨어진 질점들에 대한 관성 모멘트의 식은 (1)과 같다.

$$\sum_i m_i r_i^2 = I \tag{1}$$

관성모멘트 식은 회전체의 형태에 따라 다양하게 나온다[2]. 기본적으로 에너지 저장 장치에서는 일체 실린더(Solid cylinder)형 과 같은 중공축(hollow shaft)을 가진 원통의 형태를 가진다. 기본적으로 식은 질량 $\boldsymbol{M}$ 반지름이 $\boldsymbol{R}$인 경우

$$I_c = \frac{1}{2}MR^2 \tag{2}$$

과 같은 형태로 나타나게 된다.

병진운동에서의 질량 부분과 마찬가지로 회전 관성모멘트 부분은 회전체를 계속 회전할 수 있게 하는 관성을 담당하는 역할을 하는데 이 관성모멘트 $\boldsymbol{I}$와 각속도 ω의 관계로 회전에너지의 식을 만들 수 있다.

플라이휠 에너지 저장 장치는 이러한 관성 회전 모멘트 에너지 식을 이용하여 플라이휠의 에너지를 산출할 수 있으며 식(3)과 같이 나타낸다.

$$W = \frac{1}{2}I\omega^2 \tag{3}$$

플라이휠을 설계하기 위해선 회전속도와 재질 등 여러 가지 영향을 고려하여야 한다. 플라이휠의 운동에너지는 회전체의 무게에 비례하며 직경과 회전속도의 제곱에 비례한다. 플라이휠에 에너지를 많이 저장하려면 회전체의 마찰력이 무게와 비례하므로 저장용량을 증가시키기 위해서는 회전속도와 회전체의 반지름을 증가시키는 것이 타당하다. 하지만 플라이휠 고속 회전 시 자체 질량의 원심력에 의한 응력 증가가 문제가 되고 또한 원심력에 의한 한계 속도가 생기게 된다.

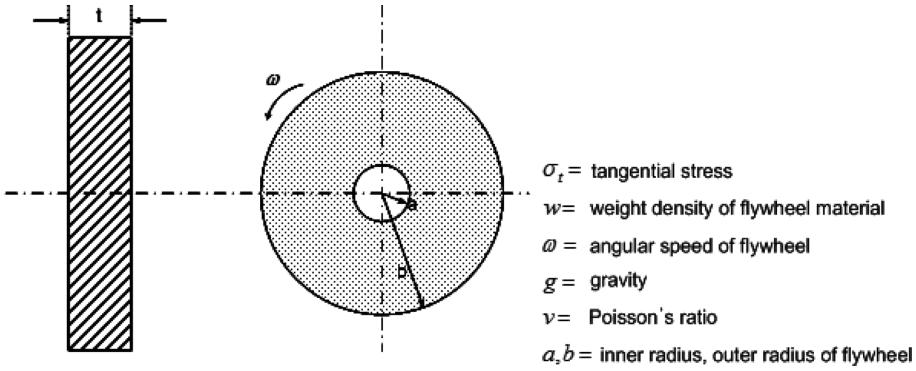

Fig. 1. Details of flywheel.

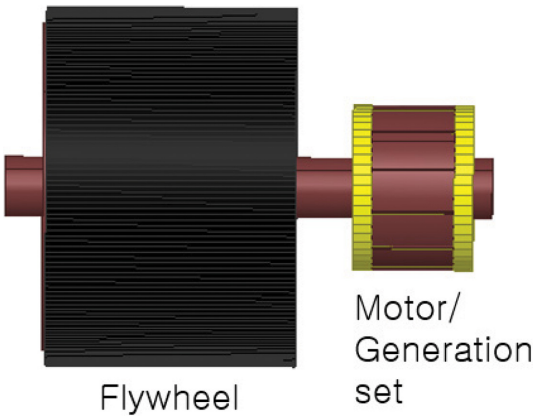

Fig. 2. (Color online) Flywheel energy storage system.

Table I. Design specification of flywheel.

Requirement	Value
Flywheel outer diameter	400 [mm]
Flywheel height	200 [mm]

$$(\sigma_t)_{max} = \frac{W\omega^2}{4g}[(3+v)b^2 + (1-v)a^2] \quad (4)$$

$$(\sigma_t)_{max} = \frac{\rho\omega^2}{8}(3+v)(b-a)^2 \quad (5)$$

5[kWh] 급 플라이휠 설계를 위해 원심력의 한계 속도에 의한 최대응력 식(4)와 (5)에 따라 $r^2\omega^2$에 비례한다. 계산 결과 최대로 나올 수 있는 플라이휠의 크기를 넘지 않는 선에서 설계를 하게 되면 Table I과 같이 설계를 할 수 있다.

2. 플라이휠 에너지 저장 장치용 3상 유도전동기의 설계

5[kWh] 급의 설계를 위해 위의 식을 이용하여 플라이휠을 Table I과 같이 설계할 수 있다. 먼저 플라이휠의 회전시간 ***t*** (s)를 선정하였다. 그리고 관성모멘트의 회전 에너지 방정식 식(3)을 이용하면 5[kWh] 급의 전동기의 크기 선정이 식(6)

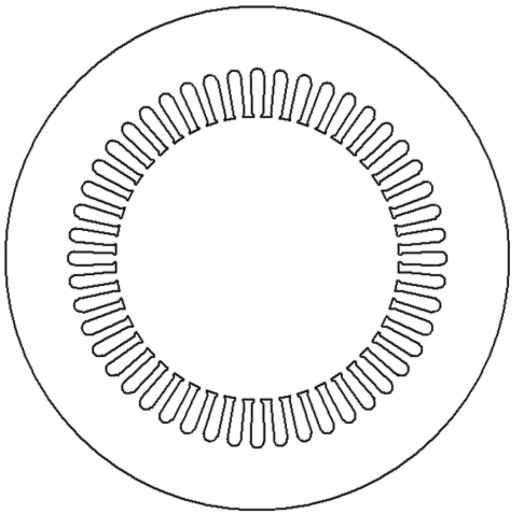

Fig. 3. Stator of induction motor.

Table II. Design specification of induction motor.

Requirement	Value
Type	3-Phase induction motor
Synchronous speed	3600 [rpm]
Electric power source	AC 440 [V]
Frequency	60 [Hz]
Stator outer diameter	320 [mm]
Stator inner diameter	180 [mm]
Rotor outer diameter	177 [mm]
Rotor inner diameter	50 [mm]

과 같이 유도가 된다.

$$r_{motor/rator} = \sqrt[4]{\frac{2}{\rho\pi}\left(\frac{18000}{\omega^2 t} - I_{flywheel}\right)} \quad (6)$$

식(6)을 이용하여 유도기의 반지름 선정이 가능하며 선정된 반지름을 바탕으로 전동기 설계가 가능하다.

3상의 48슬롯의 고정자 설계를 바탕으로 회전자의 슬롯을 설계하게 된다. 회전자의 슬롯의 형상은 같은 비율로 선정되

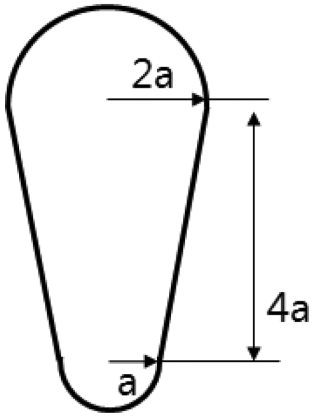

Fig. 4. Specification of slot's shape.

어 있다. 그리고 10개의 슬롯에서 72개의 슬롯까지 슬롯을 2개씩 변화시키며 설계하였다. 총 슬롯의 면적은 2866.858 [mm^2]이다.

Fig. 3에서 슬롯의 윗부분을 2a 밑의 부분을 a라고 둔 후, 높이를 4a로 하여 일정한 비율로 설계 하고 슬롯 면적을 같게 하면 Table III과 같이 a의 길이가 각각 슬롯의 개수에 따라 산정이 된다.

III. Flywheel Energy Storage System용 유도전동기의 분석

1. 회전자의 슬롯수에 따른 토크변화 분석

슬롯수에 따라 속도에 따른 토크 분석을 해보면 슬롯수가

Table III. Selected '*a*' value by amount of slots.

Slot's number	'a' value	Slot's number	'a' value
12	5.47	42	2.92
14	5.27	44	2.86
16	4.74	46	2.79
18	4.24	50	2.68
20	4.04	52	2.63
22	3.87	54	2.58
24	3.72	56	2.53
26	3.58	58	2.49
28	3.46	60	2.44
30	3.35	62	2.40
32	3.25	64	2.37
34	3.16	66	2.33
36	3.07	68	2.30
38	3.00	70	2.26
40	2.92	72	2.23

unit: [mm]

많아질수록 전체적인 토크 곡선이 상승하는 것을 볼 수 있다. 총 넓이는 일정하게 유지했지만 슬롯의 머리에 해당하는 2a 부분의 차지 면적이 커지게 되어 기동 토크 역시 상승하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6을 보면 세 그래프 모두 가파르게 상승하다 2의 구간에서 완만해 지다 3에서 거의 일정하게 되는 경향을 볼 수 있다. 기동토크와 최고토크의 경우는 52슬롯의 지점에서부터 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있으며 정격 토크의 경우는 30슬롯 지점에서 거의 평평해지는 그래프 양상을 살펴 볼 수 있었다.

이러한 경향성은 Fig. 7과 같이 회전자 슬롯수에 따라 전

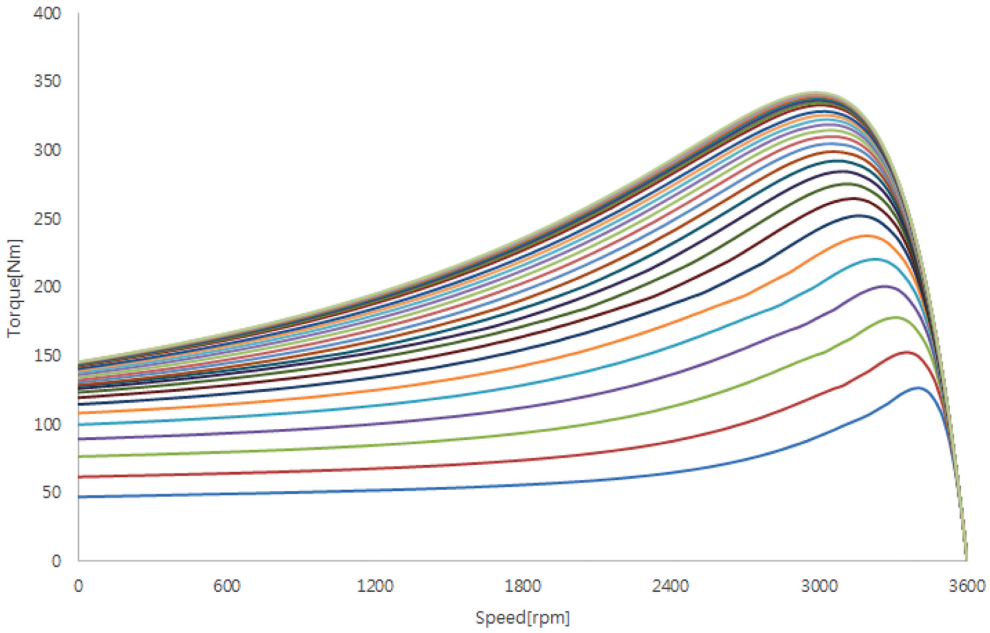

Fig. 5. (Color online) Toque characteristic by slot's number.

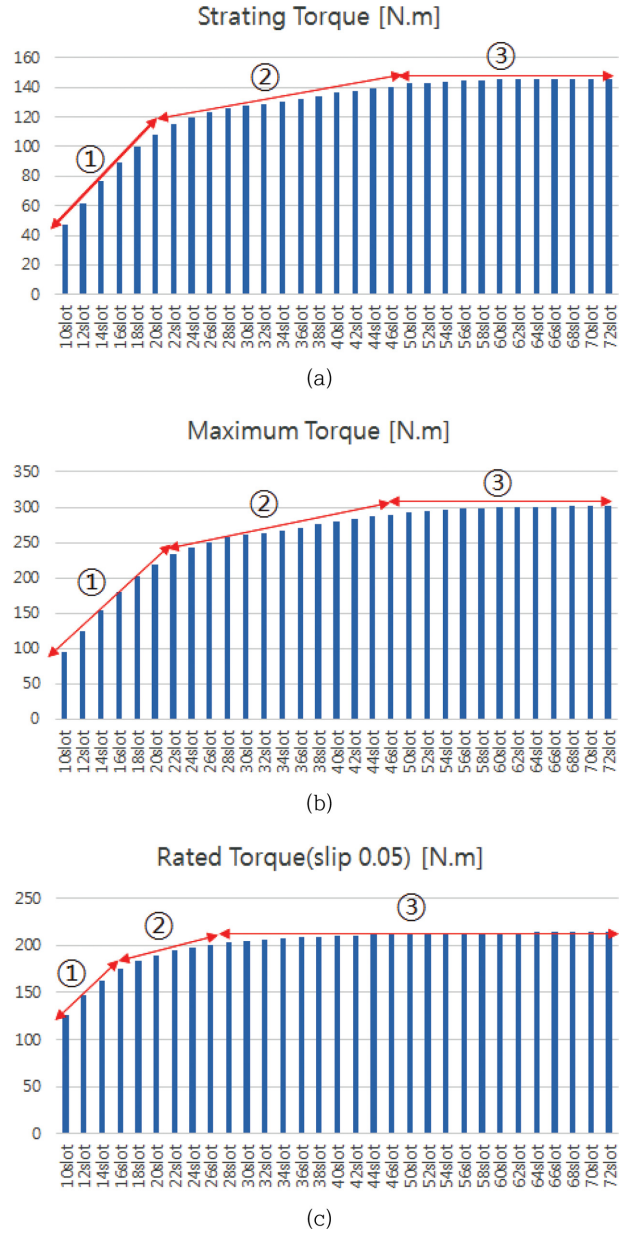

Fig. 6. (Color online) Torque graph (a) Starting torque (b) Maximum torque (c) Rated torque.

류의 특성에 의한 것으로 분석할 수 있다. 전류 역시 기동 전류 시에 52슬롯 주위에서 거의 평평해지며 기동 전류에서는 그보다 더 앞쪽인 30슬롯 지점에서부터 거의 일정한 경향을 보이고 있다.

토크가 변하는 부분에 대해 대표적으로 12슬롯, 36슬롯, 52슬롯, 72슬롯을 살펴보면, 12슬롯의 토크 값은 174.99[Nm]이며 리플은 96.74이다. 36슬롯의 토크 값은 221.49[Nm]이고 토크리플은 60.85, 52슬롯의 경우는 228.17[Nm]이며 토크리플은 61.69이다. 72슬롯의 경우는 229.54[Nm]이며 토크리플은 53.74이다. 곧 슬롯의 수가 많아질수록 토크 값은 커지며

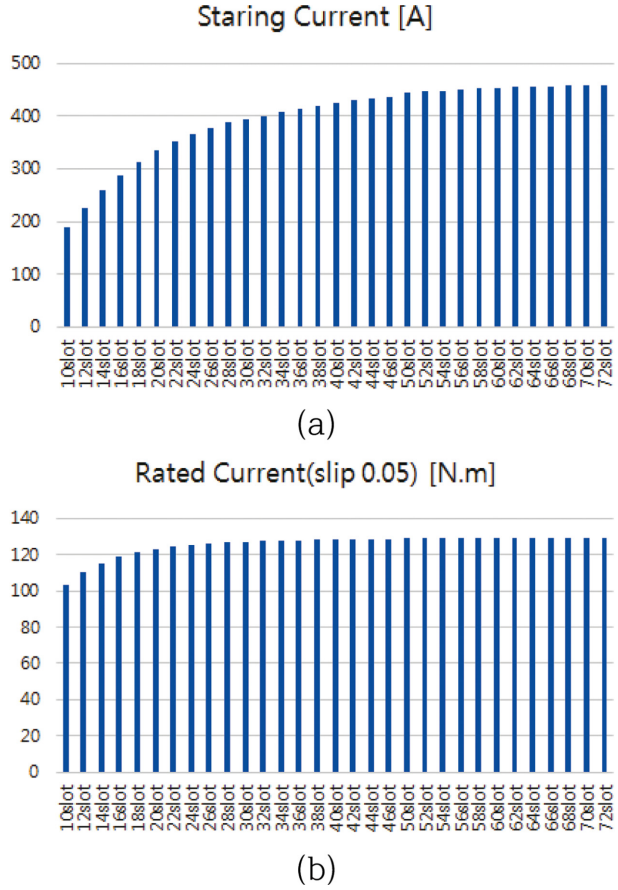

Fig. 7. (Color online) Current graph (a) Starting current (b) Rated current.

토크리플 역시 작아지는 것을 알 수 있다.

공극에서의 자속 밀도를 보면 12개의 슬롯이었을 때는 자속밀도의 최대값이 1.5[T]를 넘어간다. 하지만 그 크기가 점점 줄어들어 72슬롯 일 때는 1[T]를 넘기지 않는다. 12슬롯의 경우 고정자 슬롯간의 자속밀도는 1.5[T]의 값을 가지며 72슬롯에서는 1.6[T]를 가진다. 회전자의 경우 슬롯 윗 간격의 1.7[T]가 72슬롯 부분에서 전체적으로 고루 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 곧 슬롯의 수가 많아질수록 공극과 슬롯사이의 자속 밀도 포화가 이루어지는 점이 많아지며 토크와 토크리플에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

2. 회전자 슬롯수에 따른 고조파 분석

공극의 자속 밀도에 대한 고조파 분석을 통하여 회전자 슬롯의 수에 따른 토크리플, 토크리플의 관계를 분석하였다. 즉 주파수가 클수록 토크리플은 낮아지게 되는데 정방향으로 회전하는 고조파는 회전자 속도가 고조파 동기속도보다 작을 때는 정방향 전동기 토크를 발생하지만 역방향으로 회전하는 고조파는 제동토크를 발생시킨다. 곧 고조파 분석을 통해 토크리플이 클수록 유도전동기와 Flywheel의 회전을 방해하여 회

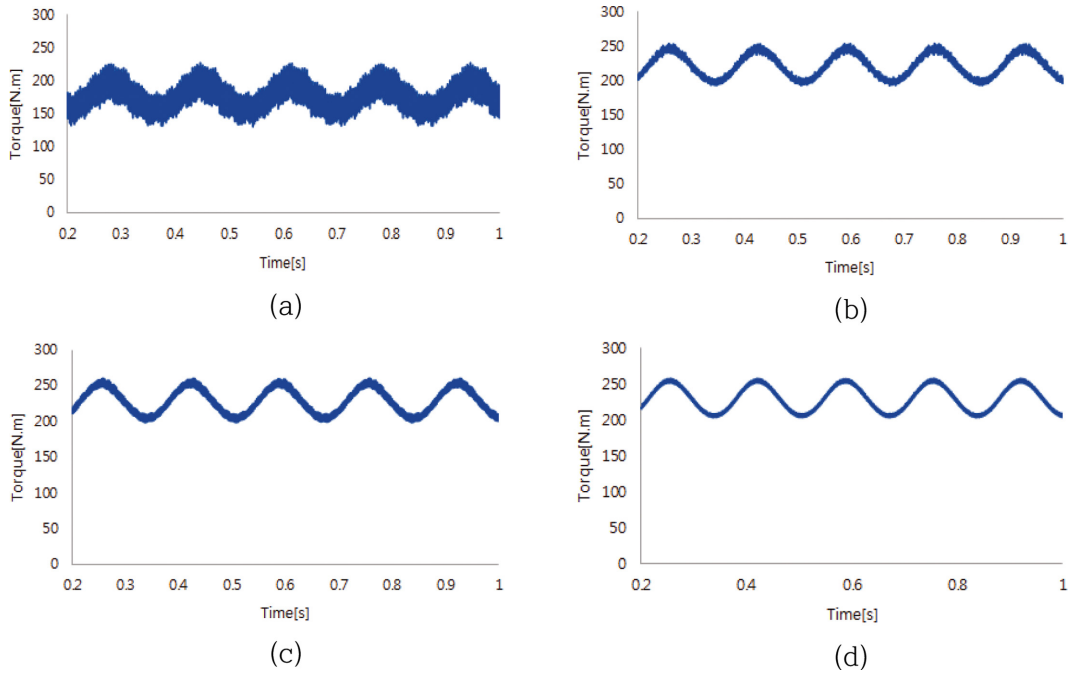

Fig. 8. (Color online) Torque (a) 12 slot (b) 36 slot (b) 52 slot (b) 72 slot.

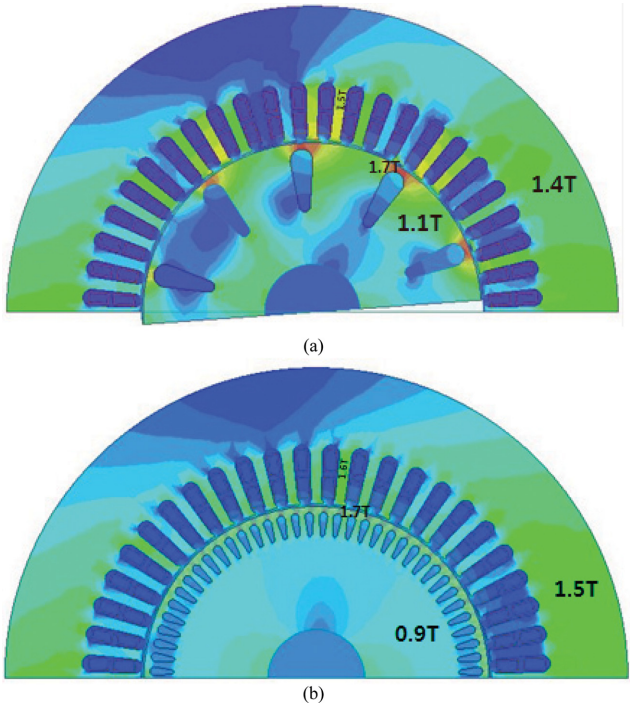

Fig. 9. (Color online) Flux density of Induction motor (a) 12 slot (b) 72 slot.

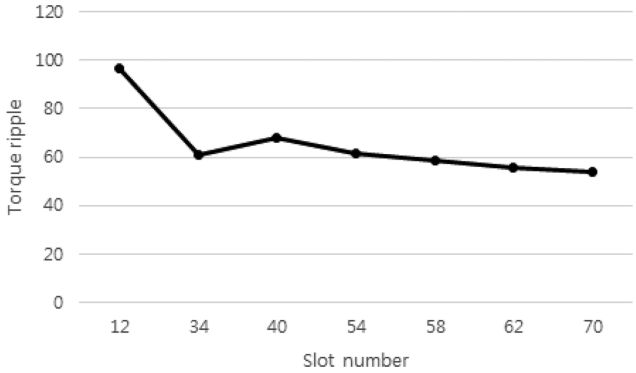

Fig. 10. Torque ripple by slot number.

전을 떨어트리고 소음과 진동을 발생시킨다.

Fig. 6을 확인해 보면 슬롯의 수가 많아질수록 고조파 차수가 커지는 것을 알 수 있다. 슬롯의 수만큼 고조파가 크게 나오는 것을 알 수 있다. 즉 12슬롯에서 13차수 고조파가 크게 나오며 36, 52, 72 슬롯에서 그 근처에 고조파가 크게 올라 온 것을 확인할 수 있다. 그리고 고정자의 슬롯수 만큼 47차수 근처에서 하나의 고조파가 올라 와 있다. 즉 회전자의 슬롯수가 많아질수록 고조파 차수가 뒤로 가는 것을 확인할 수 있으며 그 크기 또한 작아지는 것이 Fig. 12에 나타나고 있다. 곧 고조파 차수가 커질수록 토크 파형의 토크리플이 작아지며 진동과 소음이 줄어든다.

IV. 결　　론

본 논문에서는 플라이휠 에너지 저장 장치의 용량을 통해 회전 운동 방정식을 이용하여 플라이휠과 유도전동기의 크기를 산정 한 후, 플라이휠 에너지 저장 장치에 생기는 진동과

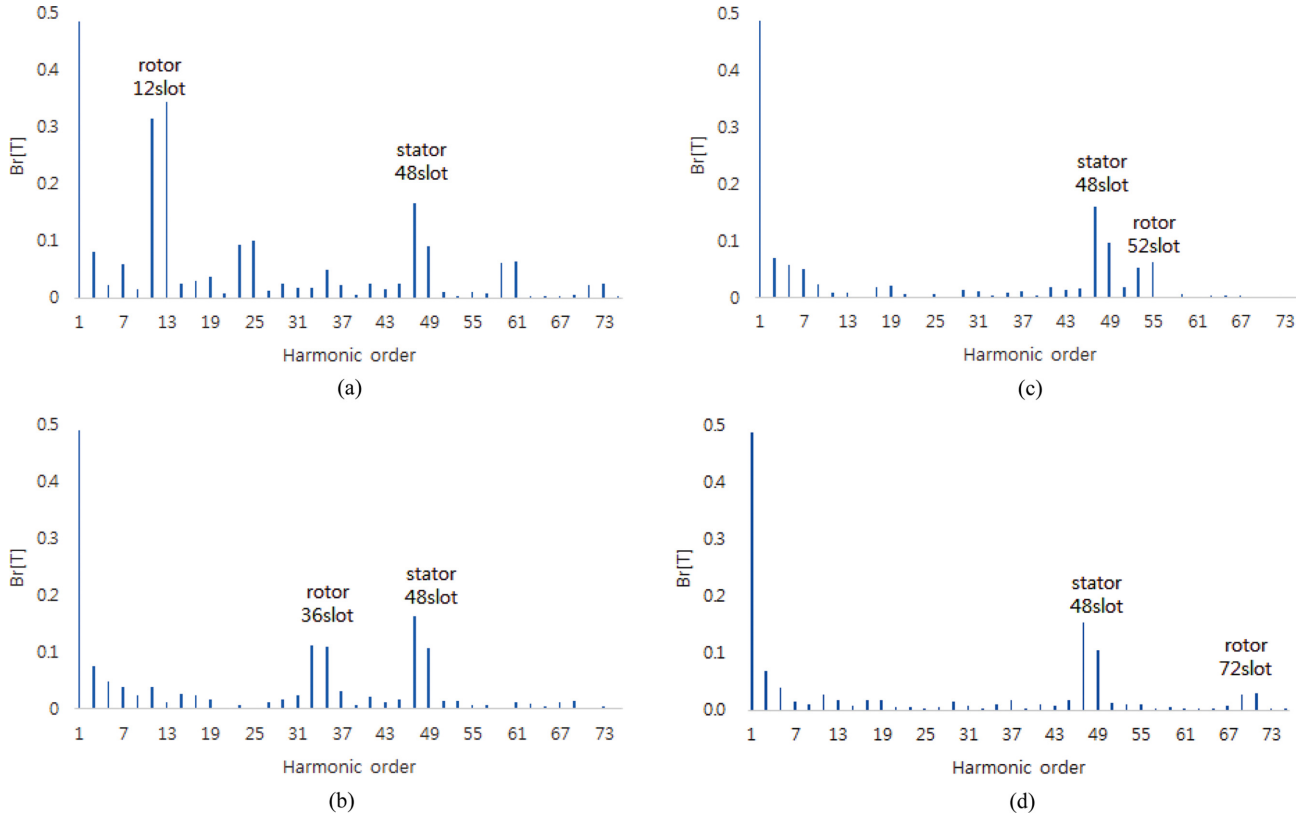

Fig. 11. (Color online) Harmonics of Induction motor (a) 12 slot (b) 36 slot (b) 52 slot (b) 72 slot.

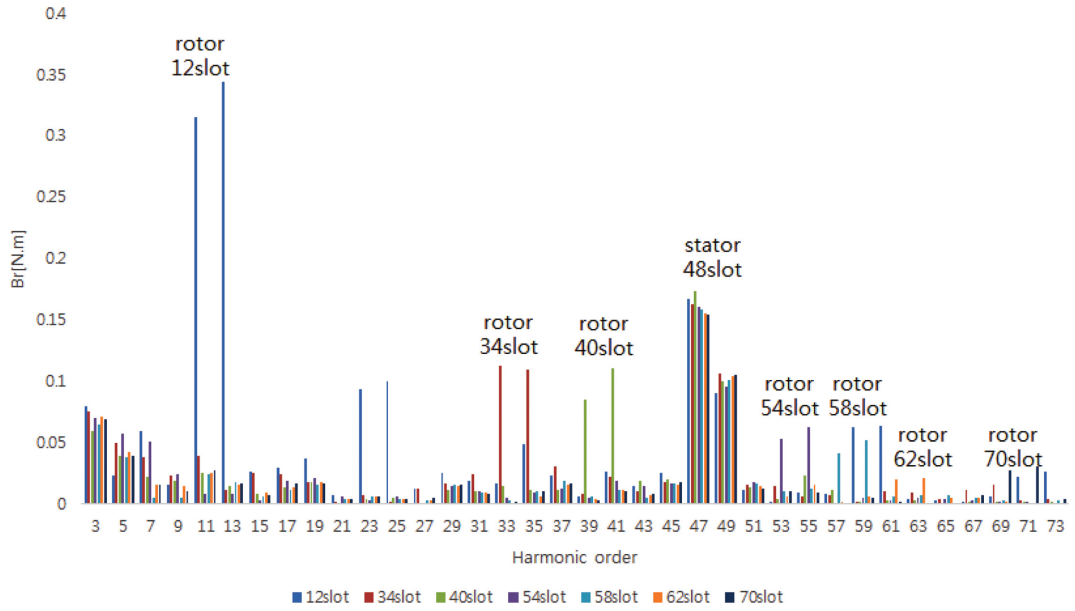

Fig. 12. (Color online) Airgap flux density by harmonics order.

소음을 저감을 위해 유도기 회전자의 슬롯수 선정 방안에 대해 연구를 하였다. 특히 유도기의 슬롯의 개수를 선정하기 위해 총 슬롯 면적을 일정하게 한 후 비율에 따라 슬롯의 개수를 변화시켜 토크, 토크리플, 고조파분석을 하였다. 슬롯수가 증가함에 따라 토크의 크기도 증가하게 되며, 가파르게 올라가는 첫 번째 지점과 완만한 두 번째 지점 그리고 거의 변화가 없는 세 번째 지점으로 크게 3구간으로 나누어 분석 가능하였다. 그러므로 같은 알루미늄의 양으로 필요한 슬롯수를

선정하고 토크 구간을 분석한 후 설계 사양에 부합하는 유도기를 설계 가능하다. 또한 공극 자속의 자속밀도에 분포에 의해 고정자와 회전자수 만큼 고조파가 생긴다는 것을 분석하였다. 그러므로 특정 주파수를 회피하여 설계를 하여 전체 플라이휠 에너지 저장 장치에 생기는 진동과 소음의 저감 설계가 가능하다.

향후에는 이러한 연구를 바탕으로 회전자 뿐 아니라 고정자 슬롯 수에 따른 분석과 더불어 극 수가 다른 유도기에 대한 분석을 통해 최적의 모터 설계 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1A4A1041584).

References

[1] Arthur L. E. Reis, Janaína G. Oliveira, and Francisco J. Gomes, 2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON) (2014).

[2] A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi, and T. Yoshi, The 2010 International Power Electronics Conference (2010).

[3] Shahriar Sharifan, Seyyedmilad Ebrahimi, Ashknaz Oraee, and Hashem Oraee, 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), 719 (2015).

[4] C. Chan, Proceedings of the IEEE **90**, 247 (2002).

[5] G. Wang, P. Wang, and X. Wang, 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (2016).

[6] Hironori Kameno, Ryouichi Takahata, Atsushi Kubo, and Stefan Gachter, IEEE Trans. Appl. Supercon **9**, 996 (2002).

[7] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, Renewable and Sustainable Energy Reviews **11**, 235 (2007).

[8] Mulukutla s. Sarma, Electric machine, Cengage Learning, Evanston (1994) pp. 360.

[9] K.-W. Lee, D.-W. Jeong, and G.-S. Park, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers **64**, 999 (2015).