

소수력 발전용 30kW급 매입영구자석형 동기발전기의 역기전력 개선

Improved back-EMF of 30kW Interior Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Hydropower Generation

김 대 경* · 정 학 균** · 박 한 석†
(Daekyong Kim · Hak-Gyun Jeong · Han-Seok Park)

Abstract - This paper presents the improved back-EMF of Interior Permanent Magnet Synchronous Generator(IPMSM) for small hydropower generator. To improve back-EMF characteristics, the size and position of notch are applied to the rotor. In addition, parametric analysis of the notch size and position was performed. Finally, the back-EMF characteristic analysis are confirmed by the experimental results.

Key Words : Back-EMF, Cogging torque, Notch, Small hydropower generator

1. 서 론

국내 신재생 에너지사업의 경우 화석연료의 고갈과 자연 문제가 부각됨에 따라 사회적으로 신재생에너지인 풍력, 수력, 태양광발전 등에 관심이 증가하고 있는 추세이다. 이중 수력발전은 국내의 자연적인 지역조건에 맞는 무공해에너지로 환경오염 규제에 대비할 수 있는 방법 중 하나이지만 국내의 대규모 수력 발전의 경우에는 이미 포화상태에 도달해 있는 실정이다. 또한 대규모 수력 발전의 경우 수력 발전소 개발 과정에서 환경보호 문제로 환경보호 단체와 지역 주민들의 민원이 심해 대형 수력 개발은 점차 어려워지고 있는 추세이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 민원 발생 우려가 적고 환경훼손을 방지할 수 있는 기존 시설물인 농업저수지, 수도관로, 중소규모 댐, 발전소의 방출되는 유량을 이용한 2차 발전 등 방류량을 이용한 소수력발전기의 연구도 활발히 시도되고 있다[1-5].

또한, 고효율 발전기의 관심도 함께 증가함에 따라 대용량 발전기에서는 권선형과 영구자석형의 가격적인 비용 차이가 심해 배제되어 왔던 영구자석형 발전기를 적용하여 보다 고효율 발전기로 개발 할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 이러한 영구자석형 동기발전기는 고밀도 에너지를 갖는 회토티계 영구자석의 사용으로 높은 운전 효율을 갖고, 계자 권선과 전류를 필요하지 않기 때문에 구조의 단순화가 가능하며, 제작에 용이하다는 장점을 가지고 있어 고효율에 유리하다. 효율과 발전특성을 높이기 위한 방법으로는 설계과정에서 적절한 극-슬롯 비와 이에 맞는 권선법이 가장 기초가 되어야 하지만 이는 설계자의 경험에 의해 좌우되는 부분이

크므로 누구나 쉽게 따라 하기는 힘들다. 다른 방법으로는 회전자, 고정자의 형상변경이나 영구자석의 형상변경을 이용해 효율, 코깅토크, 토크, 역기전력 등을 개선 할 수 있다 [6-8]. 특히, 회전자 및 고정자에 노치(Notch)를 적용하면 제작이 쉽고 코깅토크 개선 및 역기전력 파형을 개선할 수 있다 [8-9].

본 논문은 소수력 발전용 30kW급 매입 영구자석형 동기발전기의 역기전력 개선에 관한 것으로 회전자에 노치 위치 및 크기의 파라미터 변경 해석을 통해서 역기전력 개선을 위한 최적치를 찾았다. 특성분석은 2차원 유한요소법을 이용하여 특성 해석을 수행하였으며 최적의 노치 위치 및 크기를 적용한 시제품을 제작하여 실험을 통하여 역기전력 개선의 타당성을 확인하였다.

2. 영구자석형 동기발전기의 역기전력 개선

2.1 소수력 발전기 구조 및 사양

그림 1은 장하분배법과 유한요소법을 이용하여 설계된 매입 영구자석형 동기발전기의 초기설계 2D 모델과 소수력 발전기를 인버터에 연결하여 계통에 연결하는 형태를 나타내었다. 초기모델은 인버터 사양을 고려하여 수차에서 발전기로 전달되는 축동력은 30[kW]급 450[rpm]에서 약 670[Nm]이다. 표 1은 노치를 적용할 초기모델의 설계 사양을 나타낸다.

2.2 노치를 적용한 역기전력 개선[9]

역기전력의 경우 자기력선의 분포에 따라 많은 영향을 받으며 누설자속, THD 등에 의해 고르지 못한 역기전력이 발생하므로 이러한 자기력선의 분포를 조절함으로써 역기전력을 개선할 수 있다. 노치적용 방법은 이러한 자기력선의 분포를 조절하여 코깅토크 저감방법에 많이 사용되어 왔지만 본 논문에서는 역기전력파형에 영향을 미치는 THD를 줄이는 방법으로 노치를 적용함으로써 역기전력을 개선할 수 있

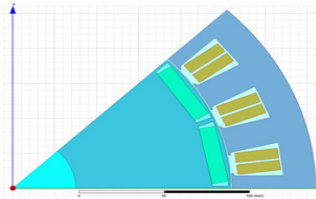
* Dept. of Electrical Control Engineering, Sunchon National University, Korea

** Sun-Tech Cop. Korea

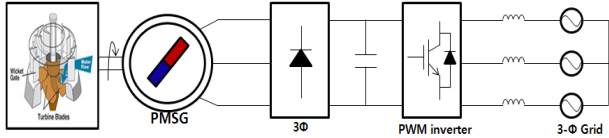
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail : phanseok@pknu.ac.kr

Received : April 7, 2014; Accepted : April 29, 2014



(a)



(b)

그림 1 소수력 발전 시스템용 매입 영구자석형 동기발전기 (a) 2D 모델 (b) 소수력 발전기 시스템 구성도

Fig. 1 Interior Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Hydropower Generation (a) 2D-Model (b) System configuration of small hydropower generator

표 1 설계사양

Table 1 Specifications of design

항목		제원
정격 출력	kW	30
정격 속도	rpm	450
출력 전압	Vac	220
정격 토크	Nm	670
효율	%	95

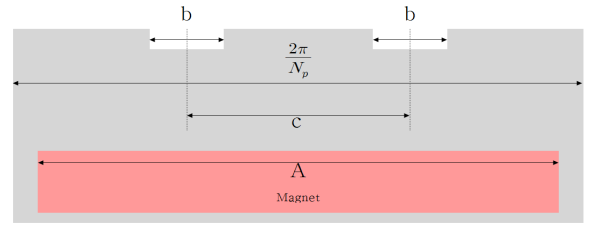
다고 본다. 이때 노치 적용의 특성을 알아보기 위한 기본모델의 공극 에너지는 식(3)과 같으며, 공극 기자력 함수 식(1)과 공극 퍼미언스 함수 식(2)로부터 구할 수 있다.

$$F(\theta) = \frac{g}{\mu_0} B(\theta) \tag{1}$$

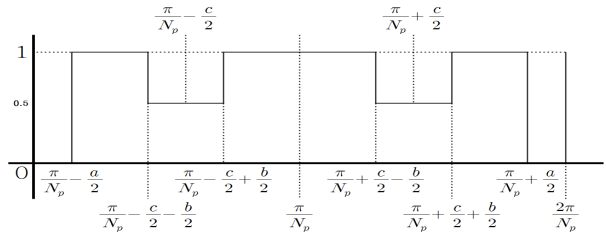
$$P(\theta) = \frac{\mu_0}{g} G(\theta) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} W(\alpha) &= \frac{1}{2\mu_0} \int_V F(\theta, \alpha) \cdot P(\theta)^2 dV \tag{3} \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \int_V B(\theta, \alpha) \cdot G(\theta)^2 dV \\ &= \frac{L_s}{4\mu_0} (R_m^2 - R_s^2) \frac{L_s}{4\mu_0} (R_m^2 - R_s^2) \int_0^{2\pi} B(\theta, \alpha) \cdot G(\theta)^2 d\theta \\ W(\alpha) &= \frac{L_s}{4\mu_0} (R_m^2 - R_s^2) \sum_{n=0}^{\infty} B_{n,N_L} G_{n,N_L} n N_L \sin(n N_L \alpha) \end{aligned}$$

μ_0 는 공극 투자율, F 는 공극 기자력 함수, P 는 공극 퍼미언스, B 는 자속밀도, G 는 상대공극 퍼미언스, L_s 는 고정자의 적층 길이, R_s 는 고정자 외경, R_m 은 영구자석의 내경이다. 이때, 회전자 부분에 노치를 적용하게 되면 상대 공극 함수의 형상이 바뀌게 되고, 고조파 항이 커지게 노치를 적용하여 고조파 영향을 작게 할 수 있다. 그림 2(a)는 노치를 적



(a)



(b)

그림 2 노치를 적용한 회전자 형상 (a) 회전자 형상 (b) 상대 퍼미언스 함수

Fig. 2 Rotor shape applied notch (a) Rotor shape (b) Relative permeance function

용한 회전자 형상을 나타내었다. 그림 2(b)의 $0 \sim (\pi/N_p - a/2)$, $(\pi/N_p - a/2) \sim (2\pi/N_p)$ 의 값은 0으로 IPM형태에서 회전자의 자속이 고정자에 흐르지 못하고 회전자 내부에서 N극과 S극 사이에 자속선이 생김으로서 고정자에 자속의 영향이 0에 가깝다고 보고 계산 하였다.

여기서 ($A=a$)는 한 극의 길이, $2\pi/N_p$ 는 회전자 한극의 자속 범위, b 는 노치 길이, c 는 노치와 노치사이의 간격이다. 공극 퍼미언스 함수에서 노치로 들어간 부분을 등극 노치와 자속의 영향을 받아 0.5가 된다고 가정하고 그림 3과 같은 형상이라고 할 때, 상대 퍼미언스 함수를 푸리에 급수 전개를 통하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{n,N_L} &= \frac{N_s}{2\pi} \left\{ \int_{\frac{\pi}{N_p} - \frac{a}{2}}^{\frac{\pi}{N_p} - \frac{c}{2} - \frac{b}{2}} \cos n N_L \theta d\theta + \int_{\frac{\pi}{N_p} - \frac{c}{2} + \frac{b}{2}}^{\frac{\pi}{N_p} + \frac{c}{2} - \frac{b}{2}} \cos n N_L \theta d\theta + \int_{\frac{\pi}{N_p} + \frac{c}{2} + \frac{b}{2}}^{\frac{\pi}{N_p} + \frac{a}{2}} \cos n N_L \theta d\theta + 2 \int_{\frac{\pi}{N_p} - \frac{c}{2} - \frac{b}{2}}^{\frac{\pi}{N_p} - \frac{c}{2} + \frac{b}{2}} \cos n N_L \theta d\theta \right\} \\ &= \frac{N_p}{2\pi n N_L} \left\{ \left[\sin n N_L \theta \right]_{\pi/N_p - a/2}^{\pi/N_p - c/2 - b/2} + \left[\sin n N_L \theta \right]_{\pi/N_p - c/2 + b/2}^{\pi/N_p + c/2 - b/2} + \left[\sin n N_L \theta \right]_{\pi/N_p + c/2 + b/2}^{\pi/N_p + a/2} + \left[\sin n N_L \theta \right]_{\pi/N_p - c/2 - b/2}^{\pi/N_p - c/2 + b/2} \right\} \\ &= \frac{N_p}{\pi n N_L} \left\{ \cos n N_L \frac{c}{2} \sin n N_L \frac{b}{2} \right\} \tag{4} \end{aligned}$$

여기서 $2\pi/N_p$ 는 한 극당 로터의 길이, b 는 노치의 크기, c 는 노치와 노치사이의 거리이다.

3. 매입 영구자석형 동기발전기의 역기전력 개선을 위한 특성해석 및 실험

3.1 노치 적용에 따른 역기전력 특성

노치의 유효성을 확인하기 위해서 노치는 2개를 선정하였고, 수식 4에서 보는 것과 같이 상대 퍼미언스 함수는 코깅

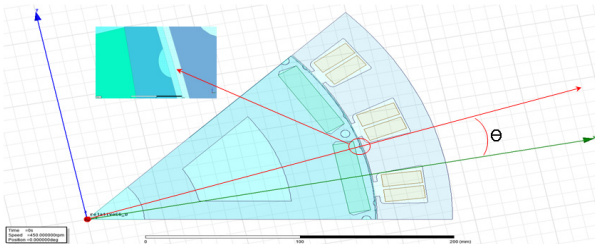


그림 3 노치 위치
Fig. 3 Position of notch

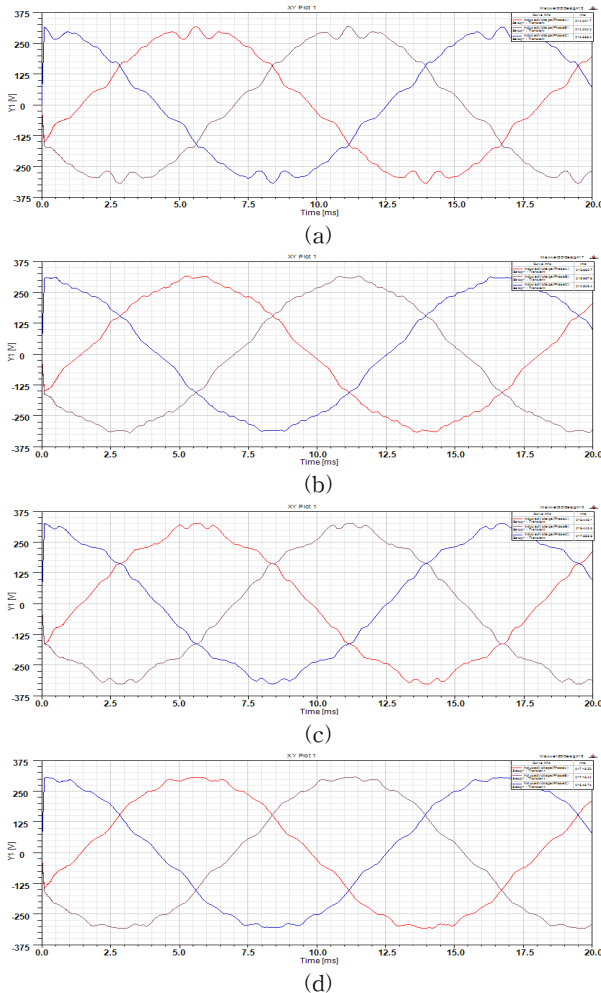


그림 4 노치의 위치에 따른 역기전력 특성 해석 결과 (a) $\theta=6.25$ (b) $\theta=7.25$ (c) $\theta=8.25$ (e) $\theta=9.25$
Fig. 4 Results of back-EMF characteristic analysis according to position of notch (a) $\theta=6.25$ (b) $\theta=7.25$ (c) $\theta=8.25$ (e) $\theta=9.25$

토크 및 역기전력 특성에 영향이 있음을 알 수 있다[8-9]. 상대 퍼미언스는 노치의 크기(b) 및 위치(c)에 따라 변화되는 것을 알 수 있으며, 본 논문은 노치의 크기 및 위치 파라미터 변경 해석을 통해서 역기전력 특성 개선을 하였다.

그림 3은 노치 위치를 보여준다. 노치의 위치 선정은 자기력선의 영향을 고려해야 하므로 자기력선이 대칭이 되는 자석의 중심을 x축으로 잡고 원점에서부터 노치까지 이어지는 선을 그어 x축과의 각을 θ 로 놓고 파라미터 변경 해석을 하였다. 노치의 위치에 따른 역기전력 특성은 그림 4에서 보여주고 있다.

노치의 위치 따른 특성해석 결과 $\theta=7.25$ 에서 가장 좋은 역기전력을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이 $\theta=7.25$ 도에서 노치의 크기에 따른 역기전력 특성을 알아보기 위하여 그림 5와 같이 고정자 안쪽선과 $\theta=7.25$ 도를 갖는 선이 만나는 점을 기준점으로 잡고 이 기준점에서 원을 만들어 원의 크기에 따른 자속의 영향을 변화 시켜 역기전력에 미치는 영향

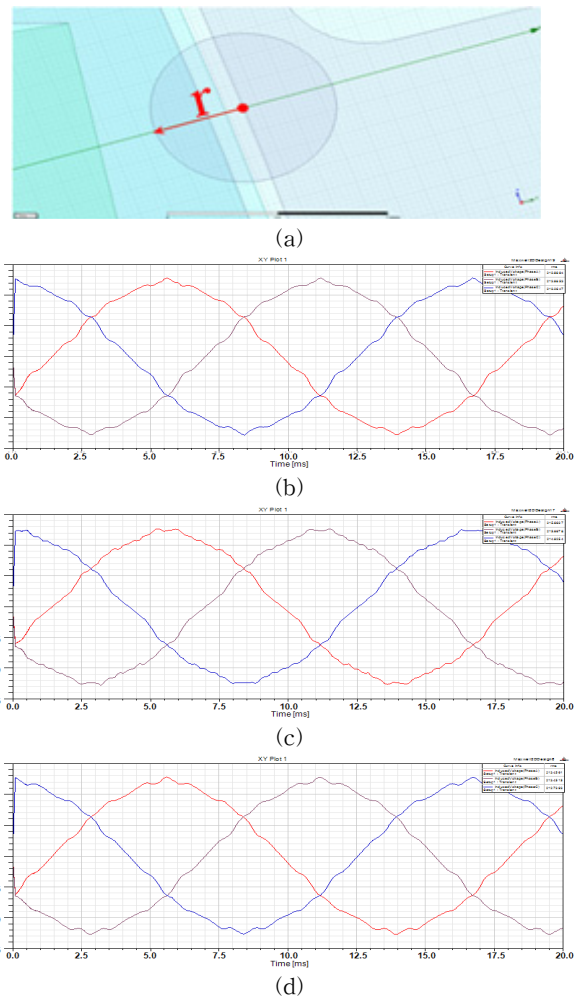


그림 5 노치 크기에 따른 역기전력 특성 해석 결과 ($\theta=7.25$ 선정) (a) 노치 크기 (b) $r=2$ [mm] (c) $r=2.5$ [mm] (d) $r=3$ [mm]
Fig. 5 Results of back-EMF characteristics analysis according to size of notch (a) Size of notch (b) $r=2$ [mm] (c) $r=2.5$ [mm] (d) $r=3$ [mm]

을 알아보았다. 특성해석 결과 $\theta = 7.25$ $r=2.5$ [mm]의 크기를 가질 때 가장 좋은 특성을 나타냄을 확인 하였다.

3.2 매입 영구자석형 동기발전기의 AC부하 특성해석

특성해석은 모델로부터 권선 저항 및 end-turn누설 인덕턴스를 추출한 후, 영구자석형 동기 발전기의 정밀한 특성 해석을 위해 유한요소법을 이용하여 시간차분 2차원 유한요소 해석을 수행하였고, 보다 정확한 특성해석을 위하여 외부 회로와 연동해석을 수행하였다.

또한, 특성해석을 통하여 입력을 구하는 방법은 입력토크만을 사용하여 구하는 방법과 출력을 구한 후 동손과 철손을 더하여 입력을 구하는 두 가지 방법이 있다. 본 논문에서는 입력토크로 입력을 계산 하였으며 입력토크로 계산할 경우 발전기가 원형구조이기 때문에 회전속도를 각속도로 바꿔서 계산하여야 하며 식 (5)와 같다. 여기서 출력은 식 (6)과 같다.

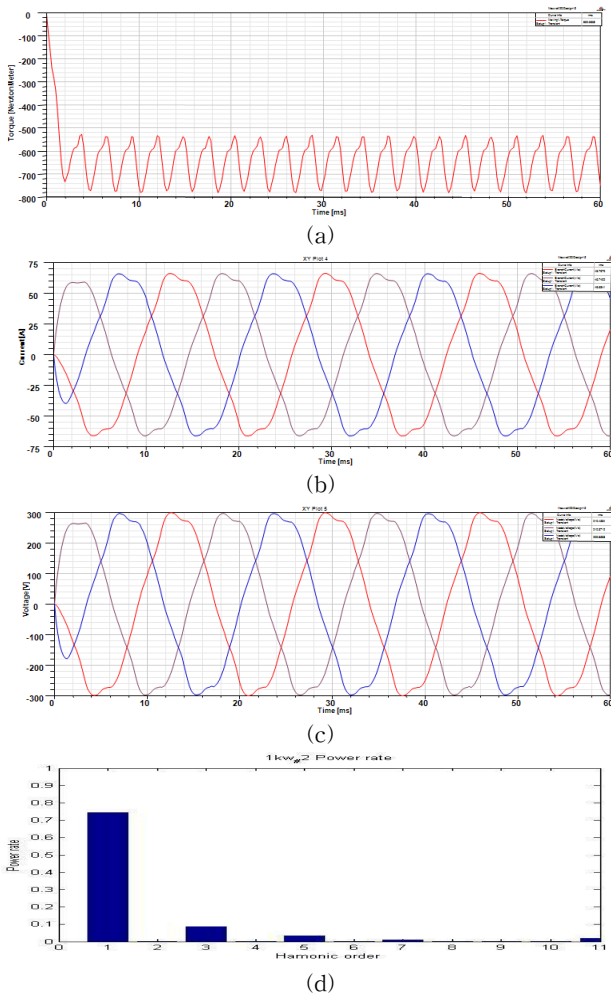


그림 6 초기모델의 AC부하 특성해석(30kW) (a) 토크 (b) 출력 전류 (c) 출력 전압 (d) THD

Fig. 6 How to Apply notch size and Back-EMF characteristic (a) How to Apply notch size (b) $r=2$ [mm] (c) $r=2.5$ [mm] (d) $r=3$ [mm]

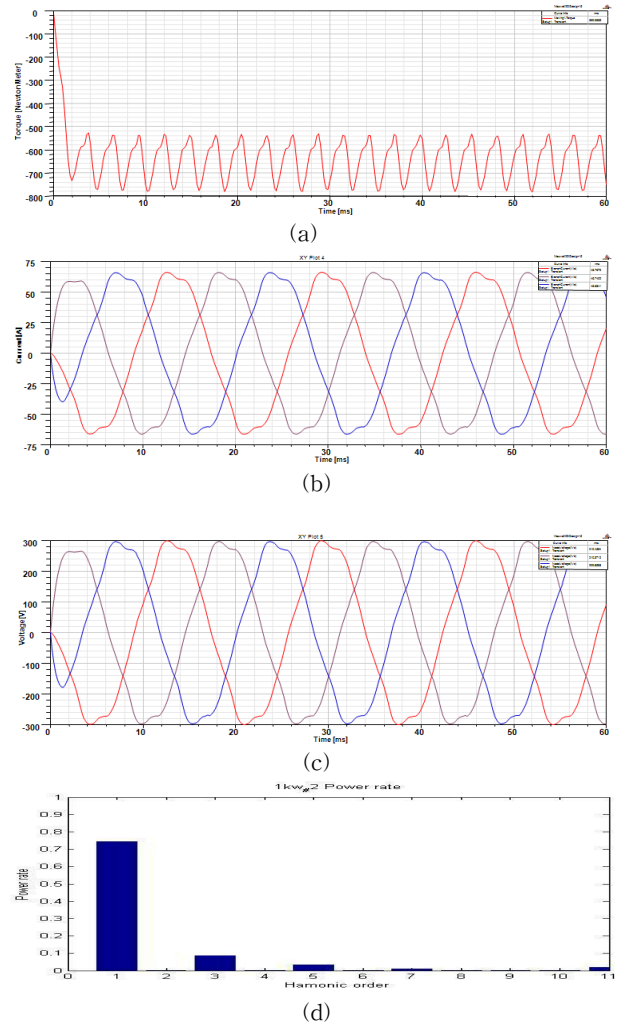


그림 7 노치모델의 AC부하 특성해석 (30kW) (a) 토크 (b) 출력 전류 (c) 출력 전압 (d) THD

Fig. 7 AC load characteristic of notch model (a) Torque (b) Current (c) Voltage (d) THD

표 2 AC부하 특성해석 (30kW)

Table 2 AC load characteristics (30kW)

항 목	단 위	초기모델	노치적용모델	
상역기전력	[Vrms]	223	229	
정격	입력	[W]	31,101	31,902
	출력	[W]	29,421	30,682
	전압	[Vrms_LL]	210	215
	전류	[Arms]	46.7	47.57
	속도	[rpm]	450	450
	부하토크	[Nm]	660	677
	효율	[%]	94.6	96.1

$$W_{in1} = T_{in} \times \{(2\pi \times \omega) / 60\} \tag{5}$$

$$W_{out} = V_{out} \times I_{out} \tag{6}$$

AC부하 특성해석은 그림 6, 7과 같고 노치적용모델을 기준으로 30kW급에서 부하저항을 계산하여 초기모델과 노치적용모델에 동일한 저항부하를 적용하였을 때를 기준으로 특성해석을 수행하였다. 특성해석결과 초기모델의 경우 AC부하의 전압, 전류, 토크리플이 좋지 않음을 확인할 수 있었

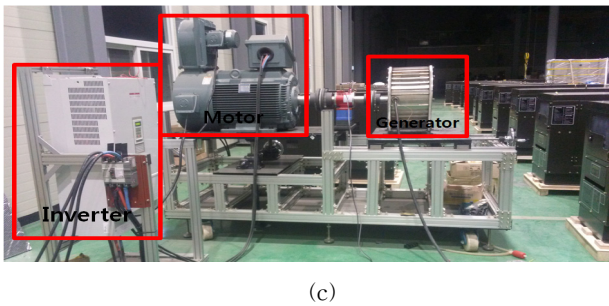
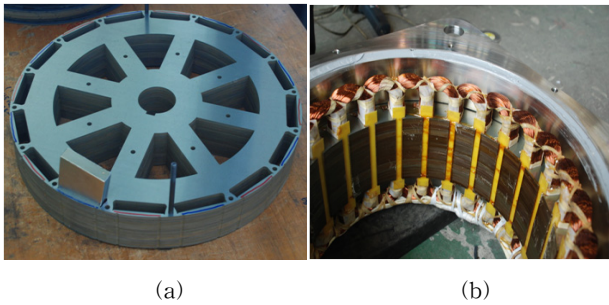


그림 8 소수력 발전기 특성시험 장치 및 발전기 형상 (a) 회전자 (b) 고정자 (c) 특성시험 장치

Fig. 8 Test set-up of small hydropower generator (a) Rotor (b) Stator (c) Test set-up

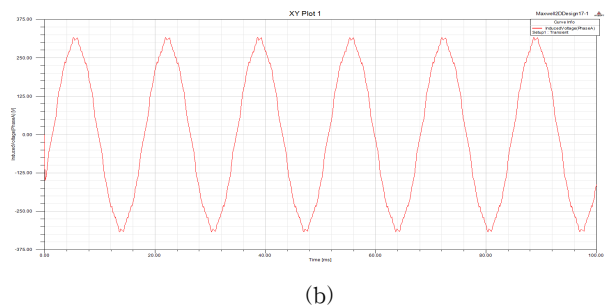
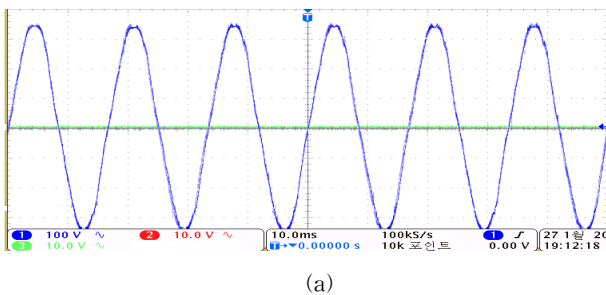


그림 9 역기전력 (a) 실험파형(100V/Div) (b) 시뮬레이션파형 (100V/Div)

Fig. 9 Back-EMF (a) Experiment waveform(100V/Div) (b) Simulation waveform(100V/Div)

으며 THD, 효율도 노치적용 모델보다 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 시뮬레이션 특성을 통하여 노치적용을 이용하여 역기전력을 개선할 수 있으며 역기전력 개선을 통해 AC부하 특성 개선과 효율도 상승 시킬 수 있음을 확인 할 수 있다.

3.3 노치를 적용 모델 특성실험

그림 8은 노치를 적용한 30kW급 소수력 발전기의 회전자와 고정자를 나타내며 특성실험을 위해 구성된 특성시험 장치를 나타낸다.

그림 9는 노치적용 모델에 대한 역기전력 파형을 나타내고 있으며 해석결과와 실험결과가 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 10과 표 3은 매입 영구자석형 동기발전기의 특성 실험한 결과를 보여주고 있으며 설계요구사항과 잘 일치함을 알 수 있다.

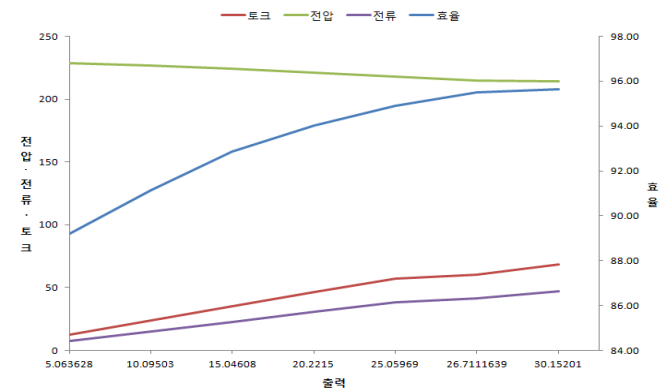


그림 10 소수력 발전기 성능시험 결과

Fig. 10 Performance test results of small hydropower generator

표 3 30kW급 소수력 발전기 실험 특성

Table 3 Experiment Characteristic of 30kW small hydropower generator

입력 [kW]	출력 [kW]	토크 [kgf.m]	전압 [V]	전류 [A]	효율 [%]
무부하	-	-	232.9	-	-
5.67	5.0	12.3	228.4	7.39	89.19
11.07	10.0	24	226.6	14.85	91.13
16.20	15.0	35.1	223.9	22.4	92.87
21.50	20.2	46.6	221	30.5	94.01
26.40	25.0	57.2	218.1	38.3	94.91
31.52	30.1	68.3	214.3	46.9	95.64

4. 결 론

본 논문에서는 30kW급 소수력 발전용 매입 영구자석형 동기발전기의 역기전력을 개선하기 위하여 노치의 위치 및 크기를 파라미터 변경 해석을 통해서 역기전력을 개선하였다. 또한 노치를 적용하여도 발전 특성에는 영향이 없음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Young-Han Gwon, Ji-Young Kim, "Environmental Consideration for Small Hydro Power Plant Development Projects", KEI, WO-14, 2006.
- [2] Kyun-Nam Kim, Bum-Soo Kim, Jeong-Ho Kim "Status and challenges of small hydropower in Gangwon Province", Research Institute for GangWon, 2010.
- [3] Bum-Soo Kim, Kyung-Nam Kim, Research Institute for Gangwon, "Issues that should be considered when introducing and Small Hydro Power Generation characteristics", 2009.
- [4] G. B. Lee, E. W. Lee, "Overview and Trend of Small hydropower Development in Korea", Korea Water Resources Corporation, 2005.
- [5] Anuradha Wijesinghe, Loi Lei Lai, "Small Hydro Power Plant Analysis and Development", IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 2011.
- [6] S. K. Jeon, S. H. Lee, H. R. Cha, K. S. Kim, J. H. Lee, "Study of 1kW Multi pole and High Efficiency Synchronous Generator for Wind power", KIEE, 14-17, Summer, 2009
- [7] A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler, "Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent magnet synchronous generator", IEEE International on Electric Drives Production Conference, 93-100P, Sept. 2011.
- [8] H. G. Jeong, D. H. Chung, J. Y. So, C. H. Cho, D. K. Kim, "Improved back-EMF of 30kW Interior Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Hydropower Generation ", KIEE Electrical Machinery & Energy Conversion Systems Society Annual Autumn Conference 2013 , 2013
- [9] Y. U. Park, J. Y. So, D. H. Chung, Y. M. Yoo, J. H. Cho, K. S. Ahn, D. K. Kim, "Optimal design of stator shape for cogging torque reduction of single-phase BLDC motor", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 11, pp. 1528~1534, 2013

저 자 소 개



김 대 경 (金 大 慶)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 2001~2005년 삼성전자 가전연구소 선임연구원. 2005~2011년 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 센터장. 2011년~현재 순천대학교 전기제어공학과 조교수



정 학 군 (鄭 學 均)

1986년 4월 18일생. 2012년 순천대 대학교 전기제어공학과 졸업. 2012년~현재 순천대학교 대학원 전기공학과 재학중(석사). 2014년~현재 (주)센테크 연구원



박 한 석 (朴 瀚 錫)

1955년 3월 23일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업(공학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.