전력전자학술대회 논문집 2002. 7. 3 ~ 7. 6

크랭크축 직결형 42V기동/발전기(ISG)의 개발

배본호, 윤석영, 설승기
서울대학교 전기 · 컴퓨터공학부 전력전자연구실

Development of crank shaft mounted ISG(Integrated Starter Generator)

Bon-ho Bae, Seok-Young Yun, Seung-ki Sul
Seoul National University
School of Electrical Engineering and Computer Science

ABSTRACT

This paper presents the development of ISG(Integrate Starter Generator). The ISG is the crank shaft mount type and it is installed at the flywheel. The wide operating range of ISG requires large constant power speed ratio, good overload performance and high efficiency. High saliency ratio permanent magnet motor is developed for the ISG applications and 500A MOSFET inverter is designed to derive the ISG. The characteristic of developed ISG is investigated using the special test-bed for the 42V PowerNet and the detailed results is presented.

1. 서 론

최근 자동차의 배출규제 및 고효율에 대한 필요성과 자동차 내 전력소비 증가로 인해, 자동차용 전원을 현재의 14V에서 42V로 승압하려는 연구가 전 세계적으로 수행되고 있다. 현재 고급자동차의 경우 2~3KW의 전력소비를 하는데 이러한 현실에서 새로운 전력 공급장치가 필요하게 된다. 이러한 42V 전원시스템에서 가장 핵심적인 역할을 하는 요소가 42V 일체형 기동발전기(ISG)로서 특히 크랭크축에 직결하여 구동되는 크랭크 직결형 기동발전기의 경우 기동발전기로서의 역할이외에도 마일드 하이브리드(Mild Hybrid) 자동차의 역할을 병행할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 자동차의 발전에도 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 그러나 자동차의 특성상 크기와 가격의 제한이 심하고 특히 고속 운전시 대전력을 발전해야 하므로 작은 부피를 가지면서 효율적인 약계자 특성을 가지는 기동발전기의 설계 및 개발이 자동차용 42V 시스템에서 가장 중요한 요소가 된다.

본 논문에서는 42V 기동발전기 응용분야를 위한 큰 돌극성을 가지는 3상 교류 영구자석 동기 전동기형 기동/발전기의 설계 및 제작에 대한 연구성과를 기술하였다. 또한 고속 유도전동기를 이용하여 자동차 엔진을 모의하여 실제 실험한 결과를 보이고 있다.

2. 돌극비가 큰 기동발전기의 설계

2.1 기동발전기의 설계 사양 및 설계 제작

자동차의 내연 기관의 크랭크축에 직결되어 초기 기동과 주행 중 발전기능을 담당하는 장치인 기동발전기(ISG)의 설계사양은 기동시 100r/min 까지는 150Nm의 토오크를 발생시켜야 하고 기동 후 발전기로 작동할 때는 600~6000r/min의 속도 영역에서는 4~6kW의 전력을 발전하여야 하며 1500r/min에서 3.57kW를 발전할 때 75%이상의 효율을 가져야 한다. 또한 인버터 고장 시 영구자석에 의한 역기전력의 제한에 의해 내연기관의 최고속도인 6000r/min에서 내장된 영구자석에 의해 발생하는 전압이 인버터의 역병렬 다이오드를 통해 정류되는 경우, 정류된 전압이 42V 전압 시스템의 제한 최고전압인 52V를 넘지 않아야 한다. 사용 가능한 출력전압의 범위에 의해 자속의 크기가 결정되고 전동기의 극수, 돌극비, 인덕턴스값의 범위를 설정하게 된다. 또한 기동 토오크 150Nm를 출력하기 위해 필요한 전류의 크기를 구한다. 이 결과에 의해 전류최고치가 설계 목표인 500Apeak를 넘지 않는 구간을 선택하여 기동발전기의 극수가 12극, 8극, 6극, 4극에 대해서 돌극비는 1.5~5의 값을 가정하여 극수, 돌극비, 인덕턴스 값에 따라 최고 속도

6,000r/min에서 6kW를 발전하는 것이 가능한 기동 발전기를 선정하였다.

주어진 기동 토오크 및 발전사양을 만족시키기 위하여 8극의 큰 돌극성을 갖는 기동발전기를 설계 제작하였다. 그림 1은 설계된 8극 기동발전기의 d-축 및 q-축 인덕턴스를 (주)Komotek 사의 전동기 설계 전용 소프트웨어인 MotorPro를 사용하여 계산한 것이다. 돌극비가 가장 큰 경우는 약 5가 나오므로

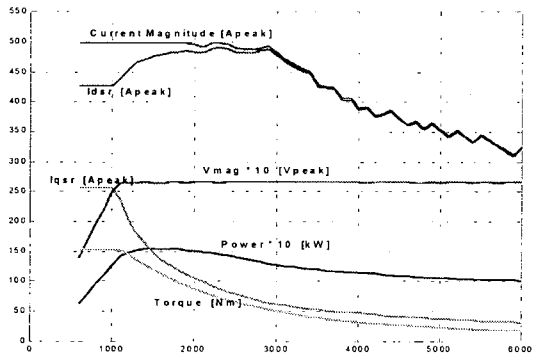

그림 1. 계산된 인덕턴스에 의한 기동발전기 최대출력.
Fig. 1. Maximum capability curve of ISG with calculated parameters.

원래 의도했던 값보다 여유있게 설계되었다. 그림 1에 보여지는 곡선들은 FEA 소프트웨어를 사용하여 계산된 전동기 파라메터 값들을 이용하여, 속도에 따라 최대 가능한 토오크 및 출력을 계산한 것이다. 저속에서 150Nm이상의 토오크를 발생하며, 고속에서 최대 발전량이 10kW를 넘기 때문에 설계된 전동기는 저속 기동 토오크 및 고속 발전 사양을 충분히 만족함을 알 수 있다.

FEA 소프트웨어에 의해 계산된 d-축과 q-인덕턴스의 값들은 다른 축의 전류에 의한 포화(cross saturation)를 무시하고 계산되었는데 실제 이 현상에 의해 q-축 인덕턴스 값이 감소하면서 출력이 줄어 들 가능성이 있으므로 약간의 설계 마진을 두고 설계해야 한다.

2.2 제작된 기동발전기의 파라미터 측정 및 평가

그림 2는 부하용 스핀들(Spindle)전동기를 충분한 역기전력이 발생되는 속도인 3000r/min으로 일정하게 운전하게 하고 측정한 기동발전기의 한 상의 역기전력을 보여준다. 기동발전기가 스큐(skew)가 없는 관계로 슬롯에 의한 고조파가 존재함을 알 수 있다. 측정된 역기전력은 FEA 설계치의 95% 정도로 비교적 정확한 값으로 측정되었음을 알 수 있다.

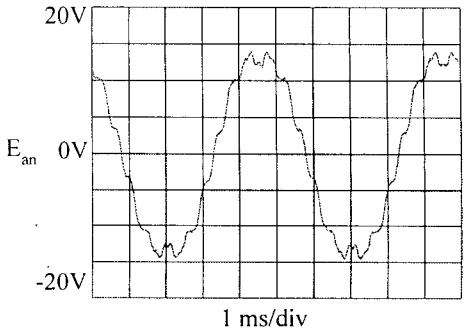

그림 2. 3000 r/min 에서의 a상 역기전력 파형.
Fig. 2. Back EMF waveform at 3000 r/min.

그림 3은 측정된 q축 인덕턴스 값과 FEA 소프트웨어에 의해 계산된 인덕턴스 값을 보여주고 있는데, FEA소프트웨어 결과에 비해 실제 측정값이 작고 특히 상호 포화(cross saturation)에 의해 차이가 더 커짐을 알 수 있다. 그림 4는 측정된 d-축 인덕턴스를 보여 주는데, FEA소프트웨어에 의해 계산된 값에 비해 크고 그 오차가 많음을 알 수 있다. 실험을 통해 측정된 그림 3과 그림 4의 인덕턴스 값들을 계산된 값들과 비교해 보면 q-축 인덕턴스는 작게, d-축 인덕턴스는 크게 측정되었음을 알 수 있다. 이 것은 두 전동기의 돌극비가 설계 기준보다 작아지게 됨을 의미하고 따라서 기동 특성 및 고속 약계자 특성이 예상보다 저하됨을 알 수 있다.

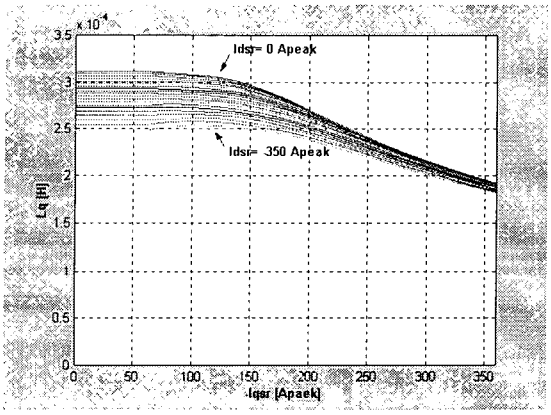

그림 3. 실험으로 측정된 q축 인덕턴스와 FEA소프트웨어에 의해 예상된 값.
Fig. 3. Q-axis inductances measured by experiments and calculated by FEA software.

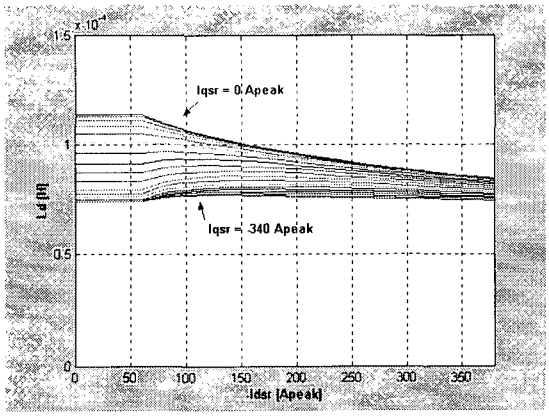

그림 4. 실험으로 측정된 d축 인덕턴스와 FEA소프트웨어에 의해 예상된 값.

Fig. 4. D-axis inductances measured by experiments and calculated by FEA software.

3. 42V PowerNet 개발

그림 5에서 컨버터는 42V의 전압을 만들기 위해 변압기를 사용하여 220V의 전원을 20V로 감압할 수 있게 3상 변압기를 만들었고 50μH의 부스트 컨버터용 인덕터를 제작했다. 직류단 커패시터로는 내압100V 용량 4700μF 의 커패시터 10개를 사용하였다. 42V 전원은 부하급변 등에 의해 33V에서 52V까지 변동할 수 있는데 부스트 컨버터에 의해 위의 전압을 모의할 수 있게 했다. 이것은 실제 밧데리의 전압변동을 모의실험할 수 있고 부하로 사용되는 전동기가 발전할 때 에너지를 회생할 수 있도록 부스트 컨버터를 제작했다. 기동 토오크 사양이 전동기의 최대 전류를 결정하는 요소인데, 본 논문에서는 최대 전류를 500Apeak 로 설계하였다. 기동 발전기의 구동을 위하여 허용전류를 흘릴 수 있는 인버터를 설계, 제작하였다. 인버터는 정격전류를 늘리기 위해 IXYS 사의 230A 급 MOSFET 두 개를 병렬로 연결하여 사용하였다.

시험에서 자동차 엔진을 모의하면서 기동 발전기를 일정 속도로 구동하기 위한 부하 전동기로는 6,000rpm까지 구동 가능한 Yaskawa사의 연속 정격 11kW (30분 정격 15kW)의 스핀들용 유도전동기가 사용되었다.

제작된 기동/발전기의 특성 및 효율의 분석을 위해서 전동기 출력 토오크를 정확하게 측정할 필요가 있는데, 이를 위해서 최대 200Nm까지 측정 가능한 Kubota사의 토오크 센서 TD020을 설치하였다.

그림 6은 제작된 기동/발전기의 외형 사진이다. 그림에서 회전자의 직경은 200mm 이고 고정자의 외경은 270mm 로 컴팩트하게 설계되었음을 보여준다.

4. 실험결과

그림 7은 그림 5의 실험 장치를 이용하여 속도에 따른 기동/발전기의 최대 발전량을 측정한 것이다.

그림 8은 최대발전시의 효율의 도시한 것이다.

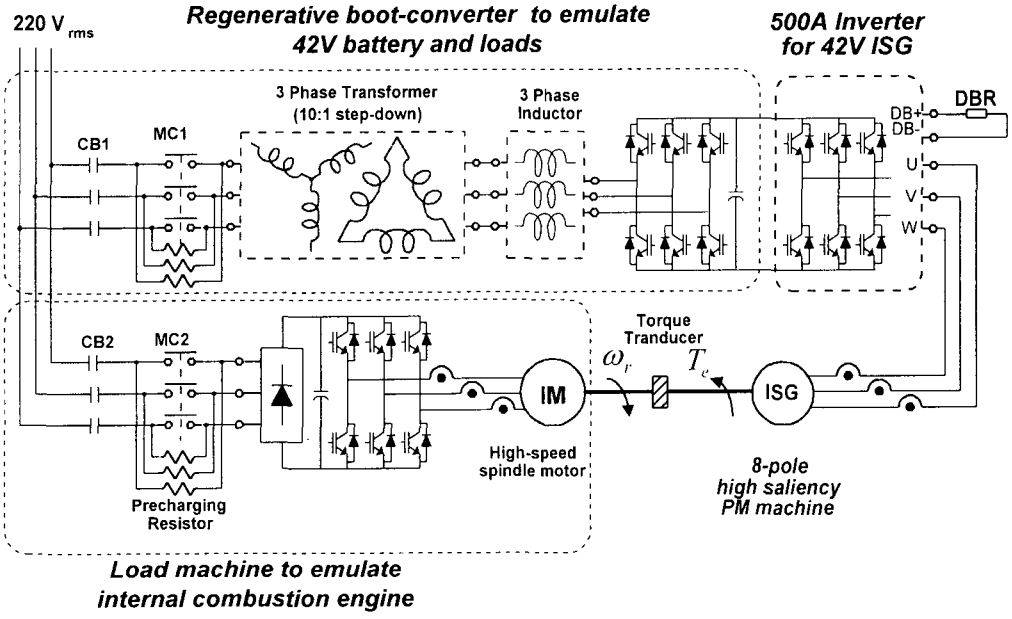

그림 5. 제작된 기동발전기.

Fig. 5. Picture of developed ISG.

그림에서와 같이 6000r/min 의 고속 영역에서도 고효율의 전력발전이 이루어짐을 보여주고 있다.

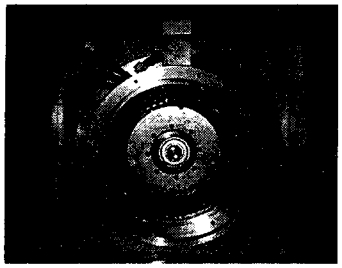

그림 5. 제작된 기동발전기.
Fig. 5. Picture of developed ISG.

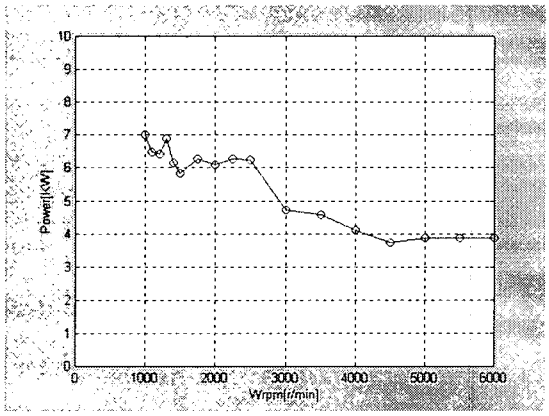

그림 6. 속도에 따른 최대 발전전력의 측정 결과.
Fig. 6. Measured maximum power accordng to speed.

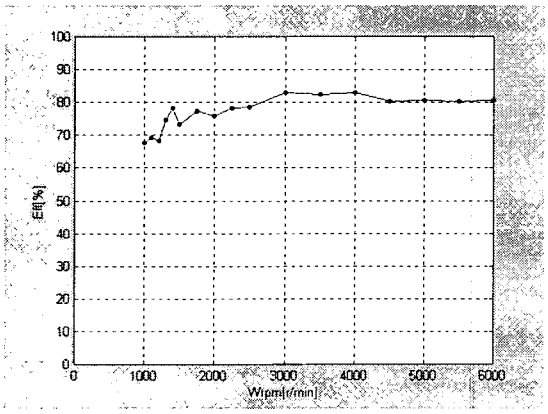

그림 7. 속도에 따른 최대 발전전력의 측정 결과.
Fig. 7. Measured maximum power accordng to speed.

5. 결 론

본 연구에서는 최근의 자동차 업계에서 연구 쟁점으로 떠오르고 있는 크랭크 축 직결형 42V 기동/발전기 및 대전류 구동시스템을 개발하였다. 또한 42V 기동/발전기를 시험하기 위한 테스트 베드를 개발하였다. 개발된 시험장치는 42V 배터리 및 부하를 소프트웨어적으로 모의하여 실험할 수 있으며 고속 운전이 가능한 부하전동기를 이용하여 6000r/min 까지 내연기관의 구동특성을 모의 할 수 있게 하였다. 이 시험장치를 이용하여 개발된 기동/발전기에 대하여 기본 설계사양을 검증 하였다.

실험 결과 6000r/min 의 고속 영역까지 효과적인 약계자 운전을 통하여 고효율의 발전이 가능하고 120Nm 이사의 기동토오크를 얻을 수 있음을 확인하였다.

실험 결과를 통해 얻어진 데이터를 이용하여 전동기 설계 소프트웨어를 보완하고 개선된 성능을 갖는 기동/발전기의 다양한 모델을 설계중이다.

참 고 문 헌

[1] Wai, J., Jahns, T.M." A new control technique for achieving wide constant power speed operation with an interior PM alternator machine." Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE , Volume: 2 , 2001 Page(s): 807 -814 vol.2

[2] Vagati, A., Canova, A., Chiampi, M.,; Pastorelli, M., Repetto, M.,"Design refinement of synchronous reluctance motors through finite-element analysis." Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 36 Issue: 4 , July-Aug. 2000 Page(s): 1094 -1102

[3] Nicastri, P.R., Huang, H.,"Jump starting 42V PowerNet vehicles ." IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine , Volume: 15 Issue: 8 , Aug. 2000. Page(s): 25 -31

[4] Nicastri, P.R.,; Huang, H.," Jump starting 42V powernet vehicles." Digital Avionics Systems Conference, 1999. Proceedings. 18th , Volume: B.6-6 vol.2 , 1999 Page(s): 8.A.6-1 -8.A.6-10 vol.2

[5] Rassem R Henry, Bruno ,"Belt-Driven Sarter-Generator for Future 42-Volt Systems."SAE Technical paper series.

[6] Engbert Spijker, Dirk Pelargues et al ,"An ISG Dual voltage Power Net Stretching Technology Boundaries for higher Fuel Economy ."18's Electric Vehicle Symposium.2001.