

고속 고휘력 영구자석 전동기 최대 출력 운전에 관한 연구

빈재구, 김철우
국방과학연구소, 부산대학교

Study of high speed and high torque performance of brushless DC motor drive for maximum power

J. G. Bin, C. U. Kim
ADD, Busan National University

ABSTRACT

ADD is under development for the high speed motor. This paper describes simulation and test results for obtaining the maximum output by leading angle of encoder. So we carried out the test for obtaining the optimum leading angle of encoder. Test results on the motor of 7 phases 6 poles were showed the validity of proposed methods and phase-leading angle.

1. 서 론

군사용 전동기는 고속, 고휘력, 고신뢰성, 저소음의 특징을 갖고 있어야 하며 이러한 성능을 구현하기 위한 전동기/드라이브의 설계 및 제조, 시험은 일반적인 전동기, 인버터 구조와는 많이 상이하다. 특히, 어뢰 추진용으로 사용되는 전동기는 기본적으로 직경, 부피, 무게, 출력, 속도 변화, 효율, 소음 특성, EMC에 대한 제약 조건이 엄격하다. 따라서 개발된 BLDC 전동기는 이러한 모든 조건을 만족하도록 설계 제작되었고 특히 설치공간상의 제약으로 인한 경량, 고휘력 설계가 이루어졌고 이를 위하여 전동기의 고속 회전 설계가 필수적이다. 따라서 일반 3상 전동기와 달리 7상 6극의 다상 구조를 선택하였다.

우선 7상6극의 전동기 특징은 같은 상전류에 대해 3상 전동기보다 높은 출력을 얻을 수 있어 동일 출력의 3상 제어반에 비해 적은 용량의 전력 조사를 분산 시킬 수 있으므로 IGBT와 같은 전력소자의 부담을 줄이고 조립이 용이하다. 또한 전류 리플을 동일 용량의 3상 전동기에 비해 약 2배 가량 감소시킬 수 있다. 또한, 고속(25000rpm) 회전을 통해 체적적용에 중요한 부분이 부피를 줄이 수 있게 되어 체적대비 출력을 극대화하였다. 그러나, 사각파 모양의 역기전력을 가지는 영구자석 동기전동기의 경우 저속 운전에는 유도성 리액턴스가 거의 영향을 미치지 않고 있지만, 고속 운전에는 권선에 유도성 리액턴스가 중요한 항으로 작용을 한다. 고속시 전류가 스위칭 되어 정상적인 값을 유지하기까지의 전기적 시정수가 저속에 비해 커지게 되며, 상 역기전력에 대한 상전류가 동위상에 있지 않게 되는 현상이 발생하게 된다. 이는 전동기 토크 출력의 저하의 원인이 된다.

본 연구에서는 고속 운전시 최대 출력 운전을 위해 시뮬레이션을 통한 브러시리스 직류전동기의 고속 운전시 전류파형 특성을 분석하는 데 초점을 맞추었다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

해석에 사용된 모델은 그림 1과 같다.

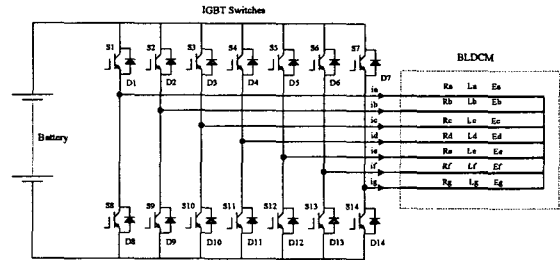


그림 1 전동기 모델

해석모델에 따른 해석 수식은 기 발표된 자료^[3,4]등에 의해 나타내었다.

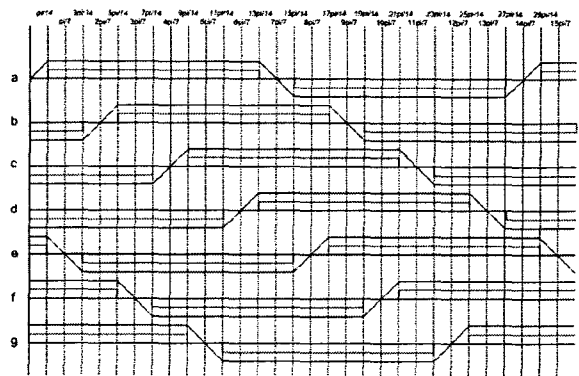


그림 2 7상 6극 전동기 6π/7 통전 파형

그림 2는 3상 영구자석 전동기의 120° 통전에 해당하는 것으로 7상중 1상이 쉬고 6상이 통전하는 것이다. 초기 전동기 개발시 이와 같은 방식을 적용하였으나, 고속 운전시 고휘력의 부하 조건을 만족하지 못하였다. 이에 고속에서의 출력을 증가하고자 상전류가 그림 3과 같이 180°통전하는 방식을 채택하였다.

그림 3은 역기전력에 대한 상전류 파형으로 3상 전동기의 180° 통전시 상전류 파형과 상이하다.

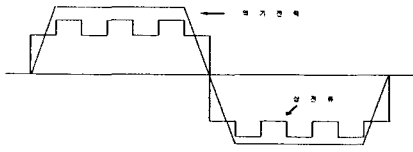


그림 3 역기전력과 상전류 파형

시뮬레이션은 브러시리스 직류전동기의 고속 운전시 전류파형 특성을 분석하는 데 초점을 맞추었다. 저속 운전에는 유도성 리액턴스가 거의 영향을 미치지 않고 있지만, 고속 운전에는 권선에 유도성 리액턴스가 중요한 항으로 작용을 한다. 고속시 전류가 스윕칭되어 정상적인 값을 유지하기 까지 전기적 시정수가 저속에 비해 커지게 된다. 그래서 상전류 크기가 작아져서, 전동기 토크 출력 또한 낮아지게 된다. 결과적으로 고속 운전시 유도성 리액턴스 영향에 의해 상 역기전력에 대한 상전류가 동위상에 있지 않게 되는 현상이 발생하게 된다[2].

따라서 고속 운전시 상전류와 역기전력에 대한 고찰이 필요하게 되었다. 고속 운전시 유도성 리액턴스에 의해 역기전력에 대해 상전류가 지연(lagging)되기 때문에 상전류를 역기전력에 대해 앞서도록(leading) 해서 역기전력과 상전류가 동위상이 되도록 해 주어 최대 토크가 나오도록 하였다.

본 논문의 전동기는 표 1과 같은 사양을 갖고 있다.

표 1 전동기 주요 사양

구분	설계 내용
회전수	25,000rpm
출력	100kW
상수	7상
극수	6극
영구자석	SmCo
상당 역기전력	143V/25000rpm
선간 인덕턴스	108 μ H
상 저항	11m Ω

2.2 시뮬레이션 결과

전동기 속도는 10000[rpm], 부하 토크는 20[Nm]에 대해 역기전력과 상전류 파형을 시뮬레이션 해 보았다. 역기전력에 대한 상전류 leading angle을 0°, 10°, 20°, 34.6°로 변화시켜 보았다. 10000[rpm]에서는 유도성 리액턴스 효과가 크지 않아 상전류 파형이 leading angle 변화에 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다. 상전류 실효치 값은 leading angle이 10°부근에서 가장 적게 나타남을 확인 할 수 있었다.

전동기 속도는 20000[rpm], 부하 토크는 20[Nm]에 대해 역기전력과 상전류 파형을 시뮬레이션 해 보았다. leading angle이 작을 때는 상전류 파형의 찌그러짐 현상이 나타남을 알 수 있다. 20000[rpm]에서는 유도성 리액턴스 효과가 크게 나타남을 볼 수 있으며, 상전류 파형이 leading angle 변화에 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 상전류 실효치 값이 leading angle을 34.6°부근에서 가장 적게 나타남을 확인 할 수 있었다.

2.3 실험 결과

역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 상전류와 전동기 출력에 미치는 영향을 조사해 보았으며, 진상각을 5가지로 분류하여 실험을 해 보았다. 또한 진상각에 따른 속도와 출력에 대한 특성을 실험해 보았다. 시험조건은 20,000[rpm], 74[Kw]로 실험해 보았다.

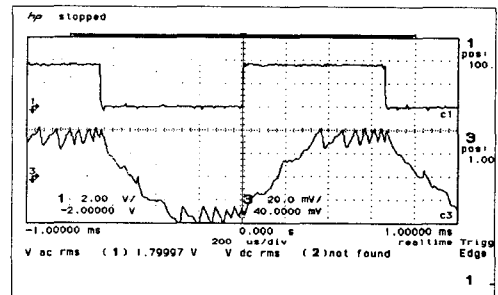
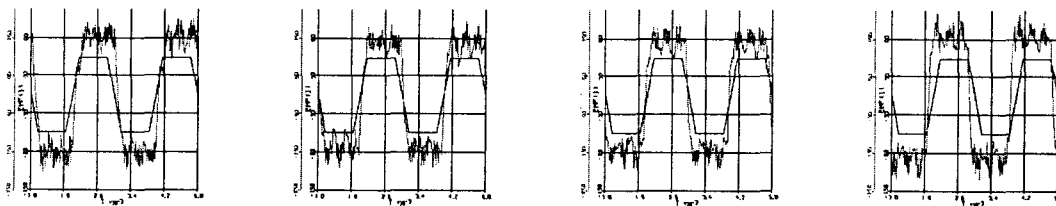


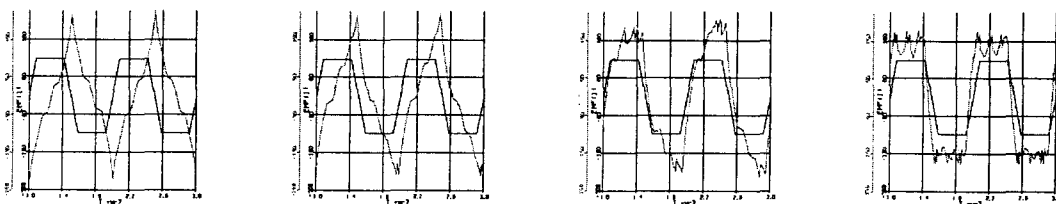
그림 6 leading angle 0° 일 때 상전류파형

진상각이 0°일 때 파형이 그림 6과 같다. 이 때 전동기는 부



a) leading angle : 0° b) leading angle : 10° c) leading angle : 20° d) leading angle:34.6°

그림 4. 10000[rpm], 출력 9[kW] 부하시 leading angle에 따른 상전류 파형



a) leading angle : 0° b) leading angle : 10° c) leading angle : 20° d) leading angle:34.6°

그림 5 20000[rpm], 출력 74[kW] 부하시 leading angle에 따른 상전류 파형

하 조건을 만족하지 못하는 속도 15,260[rpm], 출력 51[Kw]로 토크에 만족하는 상전류가 만들어지지 않아 속도지령에 추종하지 못하였다.

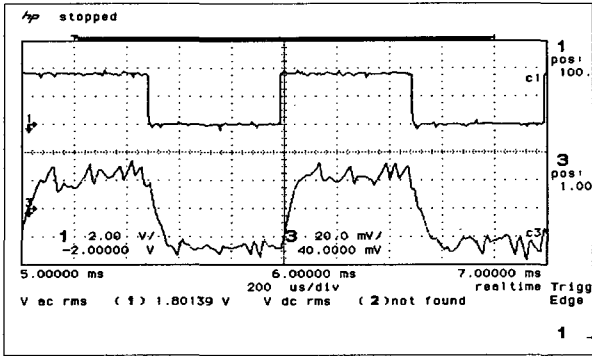


그림 7 leading angle 22° 일 때 상전류파형

상 역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 22°일 때 파형이 그림 7과 같다. 적절한 leading angle 만큼 인가되는 시점을 앞 당겼을 때의 상전류 파형이다. 부하 출력 조건을 만족하였으며, 상전류가 정상값에 도달하는 시간이 짧다. 상전류 실효값(118[A])도 커졌으며 상전류 모양도 사각파에 가까워져 출력이 향상되고 있다.

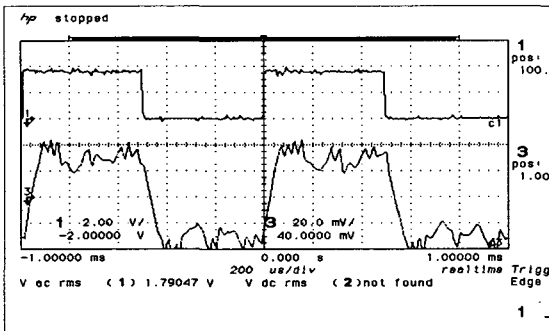


그림 8 leading angle 45.4° 일 때 상전류파형

상 역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 45.4°일 때 파형이 그림 8과 같다. 이 때 상전류의 크기는 157[A]이다. 엔코더 진상각을 22°로 변화한 실험보다 상전류가 39[A]가 더 많이 흐른다.

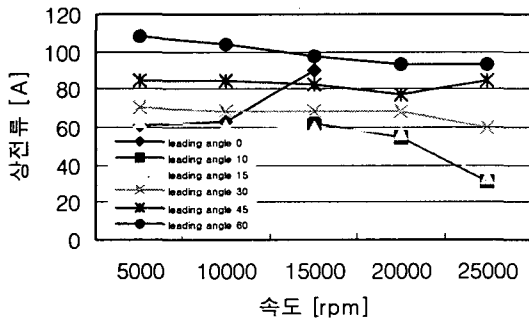


그림 9 각 속도 영역에서의 leading angle별 상전류 크기

그림 9는 각 속도 영역에서의 leading angle에 대한 상전류와 토크 값을 조사한 것이다. leading angle에 따라 상전류 실

효치 값이 차이가 나는 것은 20[Nm] 부하 조건에 상전류와 역기전력의 위상차에 의해 정(+)토크에 역(-)토크가 합쳐져 나타난 것이다. 따라서 상전류 값이 가장 적게 나타나고 있는 leading angle 값이 속도 변화에 최적 값을 알 수 있다.(단, 25000 rpm의 경우 leading angle 0°, 15°, 30°에서는 부하를 추종하지 못하였다.)

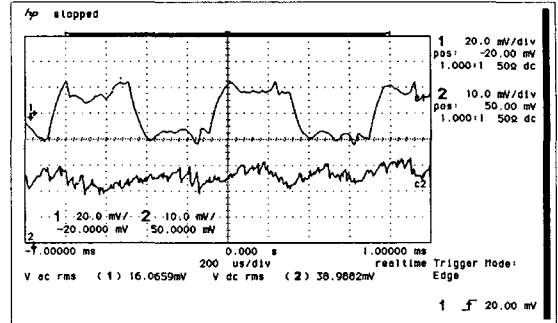


그림 10 106[kW] 전부하시험시 상전류 파형

그림 10은 leading angle을 34.6°로 하였을 때 25000[rpm], 106[kW]의 부하 시험시 상전류 파형이다. 본 논문의 전동기의 최대출력 진상각 실험 결과 34.6°임을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 100kW급 이상의 고속 고회전력 브러시리스 직류전동기 개발에 있어서 고속 운전시 역기전력에 대한 상전류 leading angle 특성 시뮬레이션 및 실험을 행하였고 상전류 진상각이 출력에 미치는 영향을 고찰하였다. 브러시리스 직류전동기를 고속 영역에 적용할 경우 유도성 리액턴스에 의해 상전류의 전기적 시정수에 의해 역기전력에 대한 상전류의 지연이 발생하여 원하는 출력을 달성할 수 없어 이에 대한 대책으로 180 도통과 상전류의 상전류 leading angle이 적용되어야 함을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 각 속도에 대한 상전류 leading angle을 조사하여 실험에 적용하였다. 실험을 통해 고속에서의 유도성 리액턴스의 영향으로 인해 발생하는 상전류의 지상을 해결하기 위해 속도와 부하에 적절한 leading angle을 적용하여 100kW 출력을 달성하였다. 추후 전속도 영역에서의 효율 향상을 위한 연구가 필요함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Peter Mongeu, "High Torque/High Power Density Permanent Magnet Motors", Naval Symposium on Electric Machines, proceedings, July 28-31, 1997, The Hotel Viking, Newport, RI, U.S.A.
- [2] S.K.Safi, P.P.Acarnley, A.G.Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives"
- [3] 김현철 외 3명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발에 관한 연구", 전기학회 논문 49B-5-2, pp 297-304, 2000. 4.
- [4] 빈재구 외 3명, "고속 회전용 7상 6극 브러시리스 직류전동기 전용 엔코더 개발", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.