

고출력 브러시리스 직류전동기 개발(II)

최태인*, 공영경*, 김현철*, 김창립**, 송종환**, 홍성영**, 김병섭**, 정용배**, 최경호**
국방과학연구소*, (주)효성**

The development of BLDC motor with high power density(II)

T.I.Choi*, Y.K.Kong*, H.C.Kim*, C.L.Kim**, J.H.Song**, S.Y.Hong**, B.S.Kim**, Y.B.Jung**, K.H.Choi**
ADD*, HYOSUNG Corp.**

Abstract - ADD is under development for the high speed motor. This paper describes the 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. Maximum output 80[Kw] at 20,000(rpm) was obtained at leading angle of encoder at near 22°. We confirmed the maximum output 106[Kw] of 25,000(rpm) at leading angle of encoder at 34.6°.

1. 서 론

군사용으로 사용되고 있는 전동기는 많은 것이 고려되지만 그 중 가장 기본적인 설계 개념이 경량화와 고출력이 요구되고 있다. 경량화와 고출력은 상호 밀접한 관계에 있는 것으로 이 두가지를 하나로 나타내어 표시할 수 있는 것이 중량 대 출력비(Kw/Kg)이다. 중량 대 출력비는 1970년대에 1.0정도, 1980년대에 1.7정도, 1990년대에 2.1정도, 최근에 와서는 약 3.0을 넘는 추세로 진행되고 있다. 이런 변화를 가져오게 된 배경은 신소재, 전력전자 및 센서의 발달 등으로 최근에 와서는 중량 대 출력비가 과거에 비해 수 배에 달할 정도로 진보되어 왔다[1][2][3][5].

기 행하였던 연구에서는 100Kw급 고출력 브러시리스 전동기 개발을 위해 역기전력, 인덕턴스, 와전류등을 해석 및 제작에 적용하여 100Kw급 이상의 BLDCM 고출력화를 이루었다[5][6]. 본 논문에서는 100Kw급 이상의 고출력 브러시리스 전동기 개발을 위해 최대출력점을 찾는 실험을 행하였다. 최대출력점을 찾는 한 방안으로 엔코더 진상각(Leading Angle)에 대한 상전류 특성을 실험해 보았으며, 엔코더 진상각이 BLDCM 출력에 미치는 영향을 고찰하였다[4]. 엔코더 진상각에 따른 출력특성 실험 결과 등으로 100Kw급 이상의 고출력 브러시리스 전동기의 개발의 결과를 비교하고자 한다.

2. 엔코더 진상각에 따른 상전류 특성

2.1 엔코더 및 역기전력의 전환 파형

본 연구 대상인 25,000[rpm], 106(Kw)급의 7상 6극 브러시리스 직류전동기는 600[V], 200[A]급의 IGBT를 사용하고 있으며, 최대 30[KHz]의 주파수를 사용하고 있다. DSP는 TMS320C31를 사용하여 구성하였다. 연구자서는 표면부착형으로 SmCo2-17계를 사용하였다.

엔코더는 축방향 자화된 디스크형 6극 자석과 7개의 홀센서를 사용하여 극위치 및 회전수 정보를 제어보드로 보내고 있다. 전동기 회전수는 M/T 방식으로 계산하였고, 홀센서의 출력 신호로부터 전환의 시작 시점의 정보를 검출하게 된다. 7상에 모두 상전류 센서를 갖고 있으며 검출된 상전류 신호는 지령전류와 비교되도록 귀환되고 있다. 상전류의 ON/OFF되는 순서는 그림 1과 같

다. 상전환이 되는 간격은 $2\pi/7$ 마다 전환이 된다.

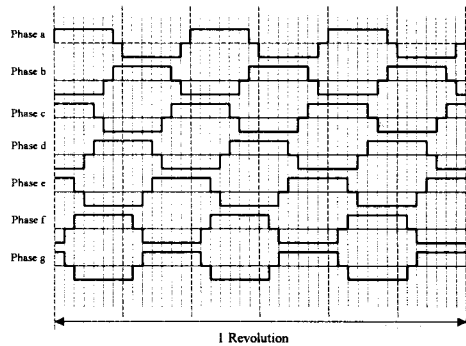


그림 1 7상 BLDCM의 상전류 파형

그림 2는 엔코더 전환 파형을 측정된 그림으로서 상전환이 되는 간격과 마찬가지로 $2\pi/7$ 마다 전환이 되고 있다. 실험에서는 1,500[rpm] 기준으로 $2\pi/7$ 에 해당하는 1.9[msec.]마다 전환이 되고 있다. 그림 3는 역기전력의 전환 파형을 측정된 그림으로 상전환이 되는 간격과 마찬가지로 $2\pi/7$ 마다 전환이 되고 있다.

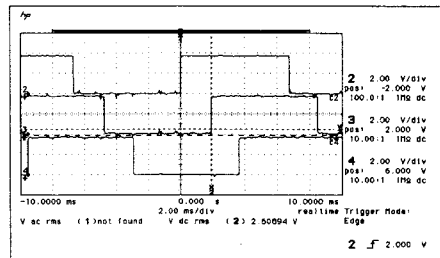


그림 2 엔코더 전환 파형

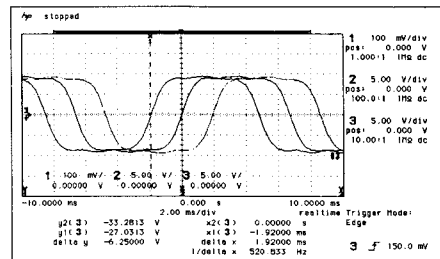


그림 3 역기전력 전환 파형

2.2 엔코더 진상각에 따른 상전류 특성

역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 상전류와 전동기 출력에 미치는 영향을 조사해 보았으며, 진상각

을 5가지로 분류하여 실험을 해 보았다. 또한 진상각에 따른 속도와 출력에 대한 특성을 실험해 보았다. 시험조건은 10,000[rpm], 9[Kw]와 20,000[rpm], 74[Kw]의 2가지로 실험해 보았다.

2.2.1 엔코더 진상각 0° 일 때

상 역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 0° 일 때 파형이 그림 4와 같다. 그림 5는 속도 10,000[rpm], 출력 9[kw], 상전류 33[A]였다. 엔코더 진상각을 11°로 변화한 실험에서는 진상각 0°와 같은 결과가 나왔다. 그림 6은 15,260[rpm], 출력 51[Kw]로 토크에 만족하는 상전류가 만들어지지 않아 속도지령에 추종하지 못하였다.

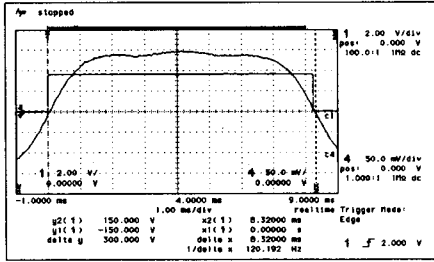


그림 4 엔코더 출력과 역기전력 파형

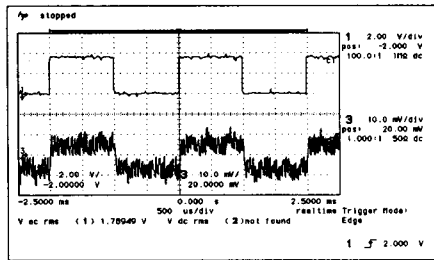


그림 5 10000RPM일 때, 엔코더 출력과 상전류 파형

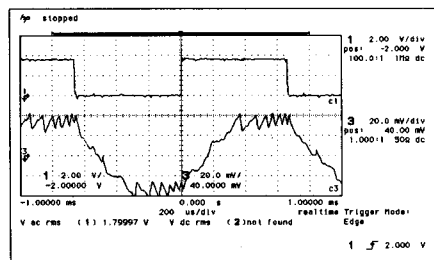


그림 6 15260RPM, 출력 51KW, 엔코더 출력과 상전류 파형

2.2.2 엔코더 진상각 22° 일 때

상 역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 22° 일 때 파형이 그림 7과 같다. 그림 8은 속도 10,000[rpm], 출력 9[kw], 상전류 38[A]였다. 그림 9는 20,000[rpm], 출력 74[Kw], 상전류 118[A]였다. 20,000[rpm], 출력 74[Kw]시험에 대한 엔코더 진상각을 0° 및 11°로 변화한 실험에서는 토크가 낮아 출력을 달성하지 못하였고, 34.6° 및 45.4°로 변화한 실험에서는 원하는 출력을 달성하였지만 상전류 실효치가 더 커져 역토크 성분의 상전류가 있음을 확인하였다.

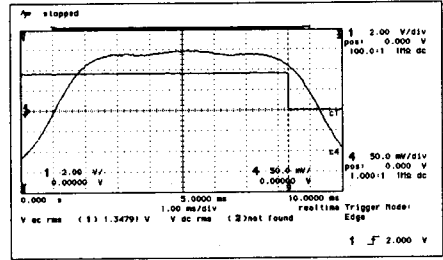


그림 7 엔코더 출력과 역기전력

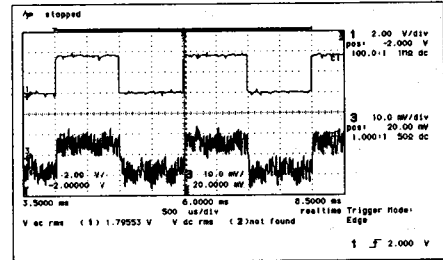


그림 8 10000RPM일 때, 엔코더 출력과 상전류 파형

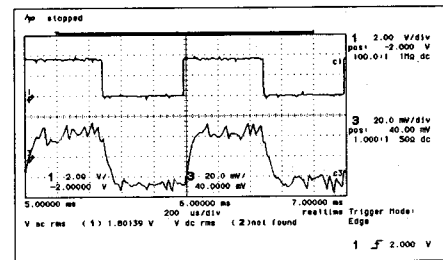


그림 9 20000RPM, 출력 74KW, 엔코더 출력과 상전류 파형

2.2.3 엔코더 진상각 45.4° 일 때

상 역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 진상각이 45.4° 일 때 파형이 그림 10과 같다. 그림 11은 속도 10,000[rpm], 출력 9[kw], 상전류 61[A]였다. 엔코더 진상각을 22°로 변화한 실험보다 상전류가 23[A]가 많이 흐른다. 그림 12는 20,000[rpm], 출력 74[Kw], 상전류 157[A]였다. 엔코더 진상각을 22°로 변화한 실험보다 상전류가 39[A]가 더 많이 흐른다. 상전류 파형은 그림 9에 비해 상전류 피크치가 커져 있음을 알 수 있다.

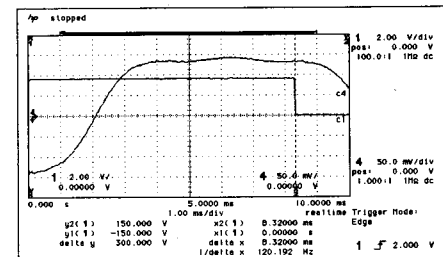


그림 10 엔코더 출력과 역기전력 파형

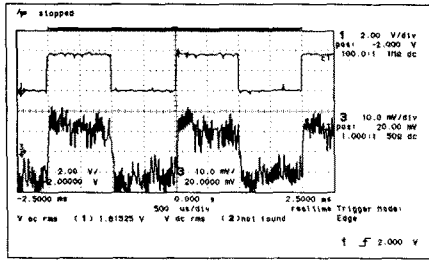


그림 11 10000RPM일 때, 엔코더 출력과 상전류파형

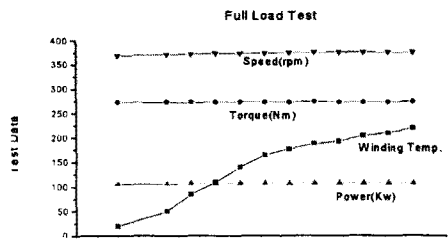


그림 13 전부하 시험 결과 (Speed : rpm x 10)

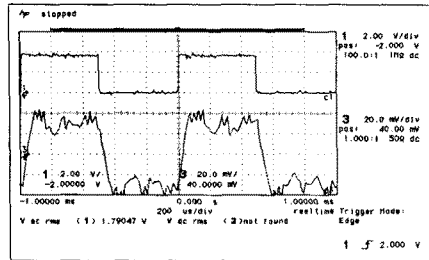


그림 12 20000RPM, 출력 74KW, 엔코더 출력과 상전류파형

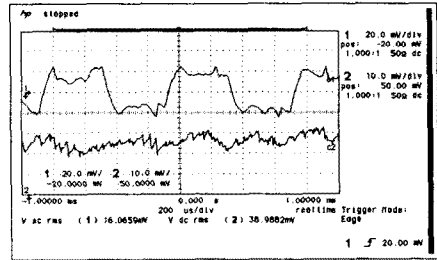


그림 14 106[Kw] 전부하시험시 상전류 파형

2.3 엔코더 진상각에 따른 상전류 및 출력 특성

표 1 엔코더 leading 각에 따른 상전류 및 출력 특성

엔코더 진상각	속도 (RPM)	상전류 실효치(A)	출력 (KW)	엔코더와 상전류 ZC 위상차	상전류 ZC와 역기전력 ZC 위상차
0°	10,000	33	9	-	-
	15,260	148	51	+46°	-46°
11°	10,000	33	9	-	-
	18,540	129	67	+40°	-28°
22°	10,000	38	9	-	-
	20,000	118	74	+14°	+8°
34.6°	10,000	53	9	-	-
	20,000	137	74	+10°	+23°
45.4°	10,000	61	9	-	-
	20,000	157	74	+10°	+36°

표 1에서 알 수 있듯이 엔코더 진상각을 주지 않았을 때와 11° 주었을 경우 출력이 나오지 못하고 있으며, 상전류 ZC(Zero Crossing)과 역기전력 ZC의 위상차가 -로 나타나 원하는 토크를 얻을 수 없었다. 진상각을 더 키우는 경우 상전류 ZC와 역기전력 ZC의 위상차가 +로 커지기 때문에 역토크가 발생하여 원하는 출력을 내기 위해 상에 흐르는 전류는 점점 커지고 있었다. 결론적으로 속도 20,000RPM기준으로 가장 적절한 엔코더 진상각은 22° 보다 조금 적은 값을 알 수 있다.

2.4 부하시험 결과

그림 13은 106[Kw]의 부하 시험한 결과이다. 부하 기는 와전류형 다이내모메타를 이용하였다. 그림 13에서 회전속도는 감속기 측 회전속도이다. 속도가 증가하는 것은 제어기 PI 게인 값의 영향이다. 기어비는 약 6.9:1 이다. 부하 토크는 약 275[Nm]이다. 권선온도는 코일 엔드부에서 측정된 온도로 6분 후 약 210[°C] 정도 상승하였다. 그림 14는 엔코더 진상각을 34.6°로 하였을 때 106[Kw]의 부하 시험시 상전류 파형이다. 본 논문의 전동기의 최대출력 엔코더 진상각 실험결과 34.6° 임을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 106Kw급 고출력 브러시리스 전동기 개발을 위해 엔코더 진상각(Leading Angle)에 대한 상전류 특성에 대한 최대출력점을 찾는 실험을 행하였다. 고토크 및 고출력을 원하는 BLDCM은 엔코더 진상각에 따른 상전류 및 출력 특성을 반드시 고려하여야 함을 확인하였다.

실험결과등에 의해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 측정된 엔코더 및 역기전력의 파형이 상전환 로직과 마찬가지로 $2\pi/7$ 마다 전환이 되고 있다. H/W적으로 엔코더 및 고정자 권선이 시간/공간적으로 안정되어 있다.
- 2) 상전류와 역기전력의 위상차가 적을수록 고토크가 가능하며, 저속에서는 큰 차이가 없으며, 고속/고출력으로 갈수록 그 영향이 클을 알 수 있다.
- 3) 20,000[rpm], 80[Kw]에서는 진상각이 22°가 최대출력점에 가깝고, 25,000[rpm], 106[Kw]에서는 34.6°가 최대출력점 임을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Clarendon Press, Oxford, 1994
- [2] Jocke F. Gieras and Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Technology Design and Application, Marcel Dekker, Inc.
- [3] Peter Mongeau, "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.
- [4] S.K.Safi, P.P.Acarnley, A.G.Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives"
- [5] 공영경 외 6명, "단시간 고출력 BLDC 전동기 개발", 추계학술대회 논문집, pp 43-45, 1998. 11
- [6] 공영경 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발", 하계학술대회 논문집, pp 394-396, 1999. 7