

고출력 브러시리스 직류전동기 개발(III)

공영경\*, 김현철\*, 김창림\*\*, 송종환\*\*, 홍성영\*\*, 김병성\*\*, 정용배\*\*  
국방과학연구소\*, (주)효성\*\*

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

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

**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. 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) at 25,000(rpm) at leading angle of encoder at 34.6°

해석 모델에 적용된 상전류에 대한 엔코더 ON/OFF 및 역기전력 파형은 그림 2와 같다. 상전류는 180° 통전하는 것으로 하였다.

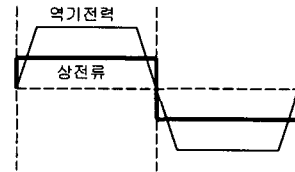


그림 2 해석에 적용된 파형

1. 서 론

군사용 전동기의 설계 개념이 경량화와 고출력이며, 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 [1].

기 행하였던 연구에서는 100(kW)급 고출력 브러시리스 전동기 개발을 위해 역기전력, 인덕턴스, 와전류등을 해석 및 제작에 적용하여 100(kW)급 이상의 BLDCM 고출력화를 이루었다[3][4]. 또한 역기전력에 대한 상전류 leading angle을 실험적으로 고찰해 보았다[5]. 본 논문에서는 100(kW)급 이상의 고출력 BLDCM 개발을 위해 최대출력점을 찾는 시뮬레이션 및 실험을 행하였다. 고속 운전시 최대출력점을 찾는 방안으로 역기전력에 대한 상전류 위상을 앞서도록 하는 것으로, 상전류 위상 조정은 엔코더의 조절에 의해 가능해진다. 본 논문은 역기전력에 대한 상전류 특성에 대해 시뮬레이션 및 실험을 해 보았으며, leading angle이 BLDCM 출력에 미치는 영향을 고찰하였다.

제어 블록도는 그림 3과 같다.

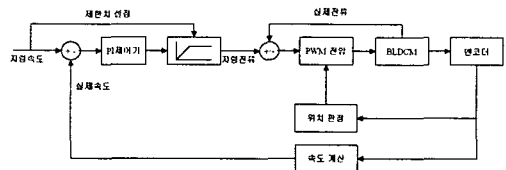


그림 3 제어 블록도

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.

시뮬레이션은 10000(rpm)과 20000(rpm)에 대해 leading angle을 0°, 10°, 20°, 34.6°, 45° 등으로 나누어 특성을 고찰해 보았다.

**2.1.1 10000[rpm]에 대한 상전류 leading angle 특성**  
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.

2. 상전류 leading angle 특성 시뮬레이션

2.1 해석 및 시뮬레이션

회로 해석에 사용된 모델은 그림 1과 같다.

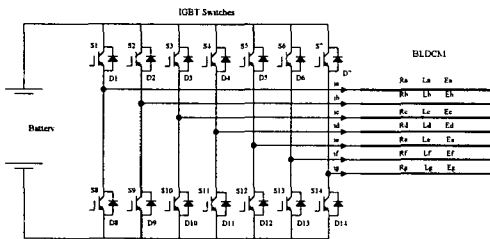


그림 1 전동기 모델

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

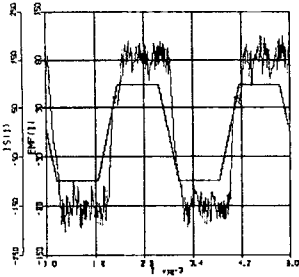


그림 4 10000[rpm], leading angle : 0(deg.)

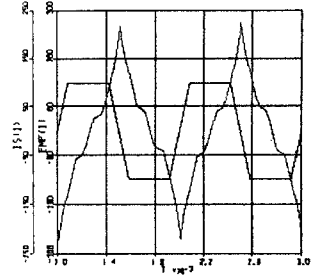


그림 8 20000[rpm], leading angle : 0(deg.)

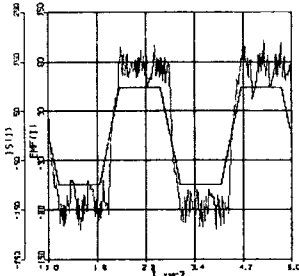


그림 5 10000[rpm], leading angle : 10(deg.)

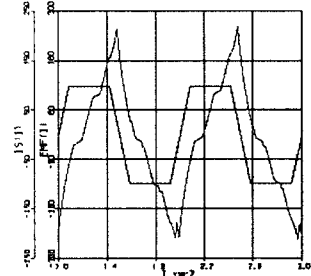


그림 9 20000[rpm], leading angle : 10(deg.)

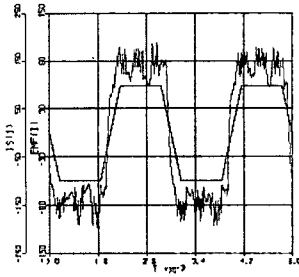


그림 6 10000[rpm], leading angle : 20(deg.)

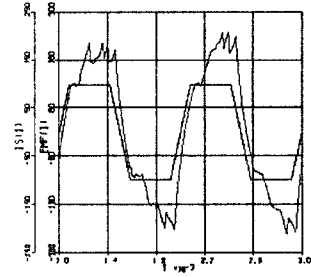


그림 10 20000[rpm], leading angle : 20(deg.)

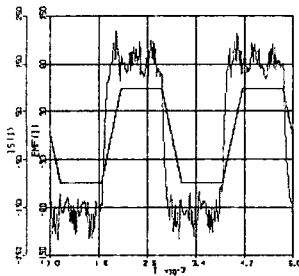


그림 7 10000[rpm], leading angle : 34.6(deg.)

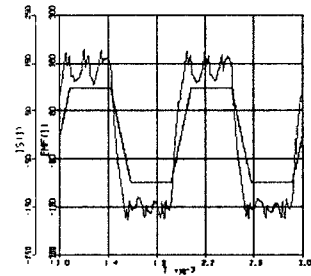


그림 11 20000[rpm], leading angle : 34.6(deg.)

**2.1.2 20000[rpm]에 대한 상전류 leading angle 특성**  
 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.

**2.2 속도 대 상전류/토크 비교**

표 1은 속도 단계에 따라 leading angle에 대한 상전류와 토크 값을 조사한 것이다. leading angle에 따라 상전류 실효치 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.

표 1 속도 대 상전류/토크

속도[rpm]	leading angle(deg.)	상전류[A]	토크[Nm]
25000	10	30.89	2.79
	15	33.12	6.50
	30	59.62	16.52
	45	85.04	19.97
	60	93.02	20.38
20000	10	54.27	3.94
	15	56.91	8.63
	30	68.35	19.84
	45	77.10	19.92
	60	92.93	20.20
15000	0	89.64	1.76
	10	61.69	19.98
	15	59.84	20.04
	30	68.33	20.08
	45	82.86	19.92
10000	60	97.30	19.99
	0	62.76	19.97
	15	61.04	19.95
	30	68.25	19.91
	45	84.85	19.97
5000	60	104.01	19.97
	0	61.58	19.99
	15	62.81	20.01
	30	71.03	19.96
	45	84.21	19.98
	60	107.75	19.95

2.3 인덕턴스 대 상전류/토크 비교

표 2는 인덕턴스 변화에 따라 leading angle에 대한 상전류와 토크 값을 조사한 것이다. 표1의 설명과 마찬가지로 상전류 값이 가장 적게 나타나고 있는 leading angle 값이 속도 변화에 최적 값을 알 수 있다.

표 2 인덕턴스 대 상전류/토크

인덕턴스[μH]	leading angle(deg.)	상전류[A]	토크[Nm]
60	10	54.27	3.94
	15	56.91	8.63
	30	68.35	19.84
	45	77.10	19.92
	60	92.93	20.20
50	10	4.95	63.06
	15	59.34	9.82
	30	70.63	20.08
	45	85.91	19.89
	60	101.60	20.10
40	10	75.67	7.74
	15	62.84	19.64
	30	77.10	20.17
	45	92.52	20.07
	60	105.50	19.72
30	0	86.10	3.33
	15	68.48	20.03
	30	79.47	20.00
	45	102.05	19.90
	60	121.60	20.07
20	10	78.71	19.50
	15	82.40	19.52
	30	88.25	20.18
	45	117.27	19.83
	60	147.55	19.56

3. 상전류 leading angle에 따른 실험 결과

3.1 leading angle에 따른 상전류 특성

역기전력 파형에 대한 엔코더 파형의 leading angle이 상전류와 전동기 출력이 미치는 영향을 조사해 보았으며, leading angle을 5가지로 분류하여 실험을 해 보았다. 또한 leading angle에 따른 속도와 출력에 대한 특성을 실험해 보았다. 시험조건은 10000[rpm], 9(kW)와 20000[rpm], 74(kW)의 2가지로 실험해

보았다.

3.1.1 leading angle 0° 일 때

그림 12는 속도 10000[rpm], 출력 9(kW), 상전류 33(A)였다. leading angle을 11°로 변화한 실험에서는 leading angle 0°와 같은 결과가 나왔다. 그림 13은 15260[rpm], 출력 51(kW)로 토크에 만족하는 상전류가 만들어지지 않아 속도지령에 추종하지 못하였다.

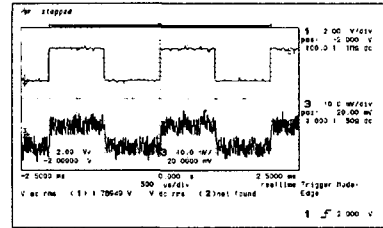


그림 12 10000[rpm], 엔코더 출력과 상전류파형

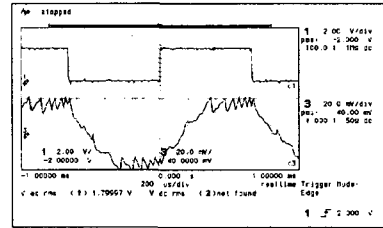


그림 13 15260[rpm], 출력 51(kW), 엔코더 출력과 상전류파형

3.1.2 leading angle 22° 일 때

그림 14는 속도 10000[rpm], 출력 9(kW), 상전류 38(A)였다. 그림 15는 20000[rpm], 출력 74(kW), 상전류 118(A)였다. 20000[rpm], 출력 74(kW)시험에 대한 leading angle을 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.

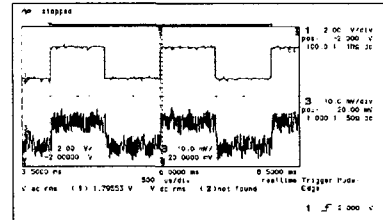


그림 14 10000[rpm], 엔코더 출력과 상전류 파형

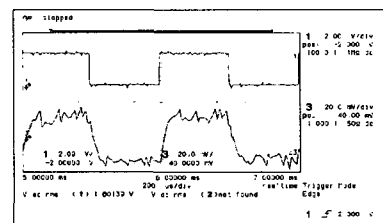


그림 15 20000[rpm], 출력 74(kW), 엔코더 출력과 상전류 파형

### 3.1.3 leading angle 45.4° 일 때

그림 16은 속도 10000[rpm], 출력 9[kW], 상전류 61[A]였다. leading angle을 22°로 변화한 실험보다 상전류가 23[A] 더 많이 흐른다. 그림 17은 20000[rpm], 출력 74[kW], 상전류 157[A]였다. leading angle을 22°로 변화한 실험보다 상전류가 39[A]가 더 많이 흐른다. 상전류 파형은 그림 15에 비해 상전류 피크치가 커져 있음을 알 수 있다.

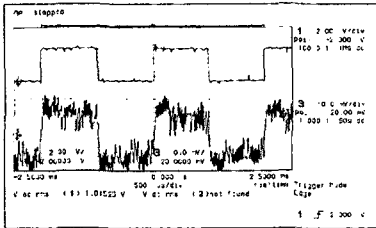


그림 16 10000[rpm], 엔코더 출력과 상전류파형

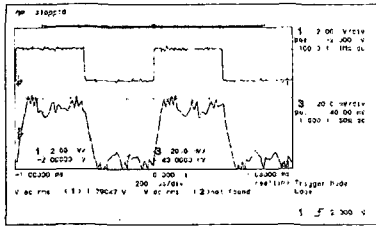


그림 17 20000[rpm], 출력 74[kW], 엔코더 출력과 상전류파형

### 3.2 leading angle에 따른 상전류 및 출력 특성

표 3 엔코더 leading 각에 따른 상전류 및 출력 특성

leading angle	속도 (rpm)	상전류 신호치(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 3에서 알 수 있듯이 leading angle을 주지 않았을 때와 11°로 주었을 경우 출력이 나오지 못하고 있으며, 상전류 ZC(Zero Crossing)과 역기전력 ZC의 위상차가 -로 나타나 원하는 토크를 얻을 수 없었다. leading angle을 더 키우는 경우 상전류 ZC과 역기전력 ZC의 위상차가 +로 커지기 때문에 역토크가 발생하여 원하는 출력을 내기위해 상에 흐르는 전류는 점점 커지고 있었다.

결론적으로 속도 20000[rpm]기준으로 가장 적절한 leading angle은 22°보다 조금 적은 값임을 알 수 있다.

### 3.3 부하시험 결과

그림 18은 106[kW]의 부하 시험한 결과이다. 부하기는 와전류형 다이내모메타를 이용하였다. 그림 19에서 회전속도는 감속기 축 회전속도이다. 속도가 증가하는 것은 제어기 PI 게인 값의 영향이다. 기어비는 약 6.9:1이다. 부하 토크는 약 275[Nm]이다. 권선온도

는 코일 엔드부에서 측정한 온도로 6분 후 약 210[°C] 정도 상승하였다. 그림 14는 leading angle을 34.6°로 하였을 때 106[kW]의 부하 시험시 상전류 파형이다. 본 논문의 전동기의 최대출력 leading angle 실험 결과 34.6°임을 확인하였다.

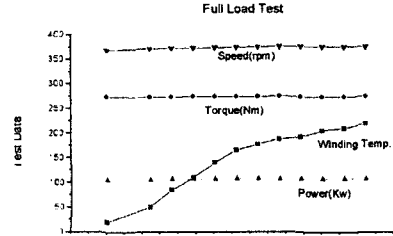


그림 18 전부하 시험 결과

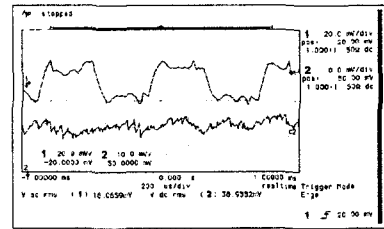


그림 19 106[kW] 전부하시험시 상전류 파형

## 4. 결론

본 논문에서는 106[kW]급 고휘력 브러시리스 직류 전동기 개발을 위해 고속 운전시 역기전력에 대한 상전류 leading angle 특성 시뮬레이션 및 실험을 행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 고속으로 갈수록 유도성 리액턴스에 의해 상전류의 전기적 시정수에 의해 역기전력에 대한 상전류의 지연 (lagging)을 확인할 수 있었으며, 고속 운전시 상전류 leading angle이 적용되어야 함을 확인하였다.
- 2) 시뮬레이션으로 속도에 대한 상전류/토크를 조사해 보았으며, 10000[rpm]에서는 유도성 리액턴스 영향이 적었으나 20000[rpm]에서는 영향이 크게 작용함을 확인하였다.
- 3) 시뮬레이션으로 인덕턴스에 대한 상전류/토크를 조사해 보았으며, 인덕턴스가 커질수록 속도 상승에 따른 leading angle 효과를 확인하였다.
- 4) 실험에 의해서는 20000[rpm], 80[kW]에서는 leading angle이 22°가 최대출력점에 가깝고, 25000[rpm], 106[kW]에서는 34.6°가 최대출력점임을 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.Acarney, A.G.Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives"
- [3] 공영경 외 6명, "단시간 고휘력 BLDC 전동기 개발", 추계학술대회 논문집, pp 43-45, 1998, 11
- [4] 공영경 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발", 하계학술대회 논문집, pp 394-396, 1999, 7
- [5] 공영경 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발 (II)", 추계학술대회 논문집 A권, pp 67-69, 1999, 11