

◆특집◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 I

초고속 발전기형 다이내모미터의 개발

김창순\*, 정원지\*\*, 윤상환\*\*\*

Development of the High Speed Dynamometer using the Generator

Chang Soon Kim\*, Won Jee Chung\*\* and Sang Hwan Yoon\*\*\*

**Key Words** : Dynamometer (성능평가장치), BLDC motor (브리쉬리스 직류모터), Induction motor (유도모터), Constant torque (정토크), Constant current (정전류), Constant speed (정속도), Generator (발전기)

1. 서론

모터 개발에 있어서 설계 후 그 제품 품질의 검증이 중요하다 할 수 있다. 그 중 성능시험은 설계한 품질의 검사로서 주로 다이내모미터(Dynamometer, Dynamo)를 통하여 이루어지게 된다. 다이내모의 기본적인 개념은 모터와 발전기의 복합적 형태이다. 현재 많이 이용되는 다이내모미터는 동력의 흡수와 발생이 동시에 가능한 복합적 형태, 즉 모터와 발전기의 복합체 형태인데 그 용량과 특성에 따라 히스테리시스(Hysteresis) 다이내모미터, 수(Hydraulic) 다이내모미터, 와류전류(Eddy current)의 형태로 변환측정을 하는 EC 다이내모미터, 직류전류로 측정하는 DC 다이내모미터 방식, 그리고 최근엔 AC 다이내모미터(교류전기로 측정)로 측정하는 방식 등 다양한 종류의 다이내모미터가 사용되고 있다.

에너지 보존 법칙에 의해 동력원의 에너지를 흡수한다는 것은 변환된 에너지가 어떤 형태로 간에 존재한다는 것을 의미하는데, 이 변환된 형태가 풍

력, 수력 또는 전기력 등 발열 및 손실의 형태로 전환된다. 즉, 출력(Power)은 힘(Force)과 속도(Speed)에 의해 결정되어지는데, 이는 다이내모가 동력원의 출력 측정 순간에 해당하는 힘과 속도를 연속적으로 측정하고, 이를 소프트웨어로서 계산하여 동력원의 출력을 얻게 된다. 얻어진 출력으로 인하여 프로그램을 이용하여 모터의 특성을 얻을 수 있다.

현재 국내에서는 다이내모와 같은 설비 대부분이 해외수입에 의존하고 있으며, 다이내모미터에 수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 또한 국내 설치된 다이내모미터는 15,000rpm 이하의 저속 다이내모미터 및 저용량 다이내모미터가 주류로 되어 있으며, 본 연구의 목적은 35,000rpm, 50kW 급 다이내모미터 개발을 국내기술로 개발하고자 한다.

2. 관련 이론

동력과의 비교 및 개선, 양산 모터의 주기적인 동력특성의 점검과 확인, 일정수준의 품질관리 유지, 부품 성능 개선 및 내구성 확보 등에 중요한 데이터로 사용되고 있다. 이러한 여러 종류의 회전체 시험에는 크게 구분해서 성능시험과 내구시험으로 나누어지며, 성능시험과 함께 내구성 시험은 제품의 신뢰도를 확인하기 위해 필수적으로 거쳐야 하

\* 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

Tel. 055-213-2893, Fax. 055-213-2900

Email cluster3@changwon.ac.kr

\*\* 창원대학교 기계설계공학과

\*\*\* 창원대학교 R&D 클러스터사업단

는 과정이다. 내구시험은 연속사용을 비롯하여 반복 부하 연속사용, 변속도반복부하 연속사용 등의 조건을 선정할 수 있다. 모터의 성터의 성능시험은 기본적으로 기동토크, 최대토크, 미세토크 특성 측정, 동특성 시험, 각종 회전 계수 측정으로 나타낼 수 있으며 타주파수분석, 소음진동의 측정 및 전기적 특성의 시험기능을 부가할 수 있으며, 엔진 다이내모의 경우에는 대상 엔진을 직접 다이내모미터에 연결한 상태로 실제 엔진에 연료와 공기를 주입, 실차 조건에서의 엔진 가동 상태로 재현한 상태에서 그 출력을 측정한다. 이 때 엔진에서 발생하는 배기가스, 연료 소모율, 각종 압력 및 온도 상태, 유해 입자 검사, 각종 엔진 구성 단품의 기능과 성능 및 내구 정도, 엔진 길들이기를 총체적으로 시험하게 된다.<sup>1</sup>

현재 많이 이용되는 다이내모는 동력의 흡수만 가능한 형태화 흡수와 구동이 동시에 가능한 형태로 나누어진다. 엔진시험에는 동력의 흡수만이 가능한 와전류 형태와 대형 선박용 엔진의 경우에는 수력 다이내모 등이 많이 사용되며, 모터에는 히스테리시스 또는 하이브리드형이 주로 사용된다. 그리고 동력전달장치, 브레이크의 시험에는 동력의 흡수와 발생이 동시에 가능한 집합적 형태인 하이브리드, 파워더형, DC 다이내모미터가 주로 사용된다.

**2.1 영구자석 모터의 개요**

영구자석 동기모터(PMSM; Permanent Magnet Synchronous Motor)는 직류모터의 브러시와 정류자에 의한 기계적 정류작용을 반도체의 스위칭 작용으로 대체한 모터를 총칭한다. 그 중 120도 통전형의 인버터로 구동되는 모터를 브러시리스 DC모터(Brushless DC Motor)라고 한다.

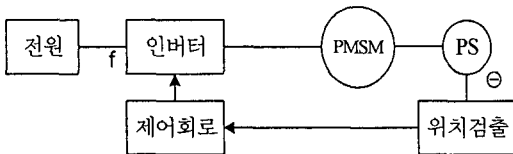


Fig. 1 Simplified block diagram of PMSM

직류모터는 원리적으로 계자용 영구자석이 고정자에, 전기자 권선이 회전자에 배치되어 있으므로 전기자 회전형이 되지만, 영구자석 동기모터는

기계적 정류작용을 반도체의 스위칭 작용이 대신하므로 영구자석을 회전자에, 전기자 권선을 고정자에 설치하여 계자회전형의 구조가 된다. Fig. 1은 회전자의 위치에 따라 제어되는 인버터 구동의 영구자석 동기모터의 구성을 보여준다.<sup>2</sup> 그러나, 영구자석 전동기는 영구자석 재료의 물리적 특성상 고온의 고온의 주위환경에서의 동작이 어렵다는 단점을 가지고 있다.<sup>6</sup>

**2.2 BLDC 모터의 기본원리**

BLDC 전동기는 회전자의 자속위치 검출이 필요하지만 소형화가 가능하고 효율이 좋은 이유로 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 구체적으로 BLDC 모터는 영구자석(PM :Permanent Magnet)의 위치와 회전자의 위치에 따라 분류한다. 영구자석의 위치에 따라 매입형 영구자석(IPM : Interior Permanent Magnet), 표면형 영구자석(SPM : Surface Permanent Magnet)으로 분류하며 회전자의 위치에 따라 외부 회전자형(Outer Rotor Type)과 내부 회전자형(Inner Rotor type)으로 분류한다.

Table 1 Characteristics of the BLDC motor

구분	IPM	SPM
특징	고회전시 영구자석 유지 유리 릴럭턴스 토크 때문에 고효율이지만 동작점이 일정하지 않아 제어가 불리함	고속시 영구자석이 떨어질 수 있으므로, 접착구조 필요함 자속토크만 있기 때문에 IPM보다 제어가 유리
장단점	중대형용량 정출력 특성 가격 저렴	소용량 전류토크 직진성 순시토크 제어성 유리
용도	산업용	서보용

**3. 다이내모미터**

**3.1 제작된 다이내모미터의 기본원리**

제작된 다이내모미터는 모터에 역으로 걸리는 저항을 다이내모에 재현시켜 그 때의 모터 반응 상태를 보기도 한다. 이렇게 얻어지는 데이터를 통해 모터에 발생할 문제점을 미리 발견함과 동시에 모터의 성능을 파악하게 된다.

35,000rpm급 다이내모미터의 개발을 위해 설치된 다이내모미터의 제원은 Table 2와 같다.

본 실험에 사용할 다이내모미터는 시험회전모터에 의하여 다이내모미터의 로터에 전기가 발생하게 되는 발전기방식(Generator type)이며, 발생된 전압을 전원부에서 스위칭회로를 이용하여 전압을 조정하여 저항기에서 소비시키게 되며, 여기서 발생하는 전압은 시험모터의 속도와 비례하게 된다.

Table 2 Parameters of the dynamometer

Table legend	
Type	AC Generator
Motor type	Brushless DC
Voltage source	AC 380V, 50/60Hz, 3 $\phi$
Input voltage	$\pm 10\%$ of Voltage Source
Output voltage	0 ~ 440V
Winding type	W-Y
rpm range	8,000 ~ 35,000 rpm
Torque range	14 ~ 24 N·m
Output	50kW
Control mode	Constant current, Constant torque

### 3.2 DAQ 시스템

성능시험장치는 하드웨어적으로 크게 다이내모미터와 콘트롤 장치로 구분된다. Fig. 2에서 발전기 방식의 성능시험장치의 구성도를 나타낸다. 다이내모미터는 발전기부, 센서부, 피시험모터의 세부분으로 구성된다.

브레이크부는 피시험모터에 부하를 인가하기 위한 장치로 정적토크특성을 측정하기 위한 히스테리시스 브레이크와 동적 토크특성을 측정하기 위해 토크제어용 브레이크를 사용하며, 센서부는 토크센서를 이용하여 토크를 검출하고나, rpm을 검출하기 위한 부분이다. 피시험모터에는 홀센서와 모터시험 중 온도를 측정하기 위한 센서가 부착된다.

Fig. 3에서 보이는 콘트롤 박스에서는 다이내모미터로부터 검출된 신호를 디스플레이 또는 증폭하거나 전력분석기(Power Analyzer)로부터 검출된 데이터를 이용하여 유제가 피시험모터의 파라미터를 확인하는 기능이 갖추어져 있다.

전압원(Voltage Source)은 다이내모미터의 히스테리시스 브레이크 토크 제어용 신호로 출력전압에 따라 인터페이스 보드의 전류제어회로를 통한 전류가 공급되고 이레 비례한 브레이크 토크가 발생한

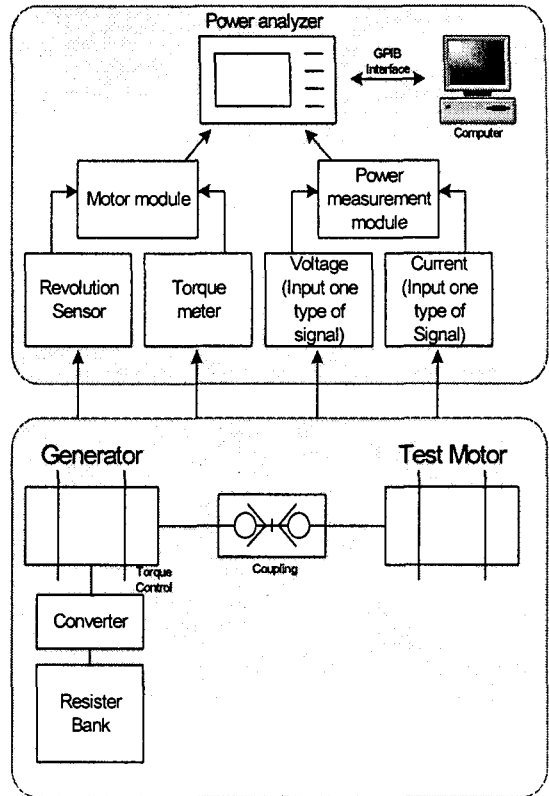
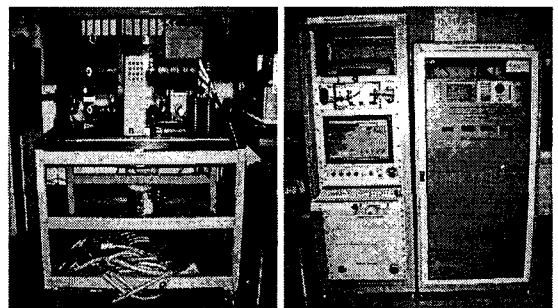


Fig. 2 Block diagram of the AC generator dynamometer



(a) Dynamometer (b) Control rack  
Fig. 3 Photograph of dynamometer and control rack

다. 또한 모터 브레이크의 토크 제어시 속도제한용 신호로 작동한다. 전력 분석기를 이용하여 모터에 공급되는 전류 및 전압을 측정하여 전압과 전류로 인한 각종 파라미터들(출력값, 유효전력, 무효전력, 역률) 및 센서부로부터 얻어지는 토크값과 rpm을 이용하여 모터의 성능평가를 위한 데이터를 얻게

된다. 콘트롤 박스의 구성은 Fig. 3(b)와 같다.

#### 4. 모터의 시험방법

##### 4.1 동기모터

회전자 위치 센서는 고정자에 대한 회전자의 위치를 전달하는 계기이다. 제어기는 시간과 상 여자 전류의 파형을 제어하기 위해 적당한 여자 전압을 고정자에 인가하기 위한 신호 발생 회로이다. 정교한 제어기는 마이크로프로세서 또는 DSP(Digital Signal Processor) 등을 이용하여 주어진 속도에 대해 원하는 토크를 얻기 위해 최적의 상태로 운전할 수 있도록 여자 신호를 발생한다.<sup>5</sup> 컨버터는 DC전원, 전력스위치, 전력다이오드 등으로 구성되며, 박스위칭(Buck-switching)을 사용하여 DC 전원을 인가시켜 토크를 발생 또는 제어한다.

저속 운전시 발생하는 유기기전력  $e$ 는 공급 직류전압  $V_s$ 에 비해 작으며, 전류는 초핑(chopping)에 의해 조정된다.

시험하고자 하는 동기모터의 제원은 Table 3과 같으며 12000rpm으로 구동중인 모터에 정토크제어 모드로 토크를 0~15Nm까지 증가시 모터의 특성변화를 알아보았다.

Table 3 Characteristics of the test motor (BLDC)

Motor type	Brushless DC
Voltage source	AC 380V, 50/60Hz, 3 $\phi$
Input voltage	$\pm 10\%$ of Voltage Source
Output voltage	0 ~ 440V
Winding type	W-Y
rpm	35,000 rpm

##### 4.2 상용 능형 유도모터

능형 유도전동기로 본 다이내모미터의 정밀한 검증을 위하여 3,600rpm급 유도전동기를 와전류 동력계를 사용하는 경남 테크노파크 정밀기기센터 모터성능센터의 다이내모미터의 시험결과와 비교하도록 하였다.<sup>3</sup>

발전기형 다이내모미터는 정토크제어모드로 설정할 수 있으며, 개발된 다이내모미터의 데이터를 비교분석하기 위해 3,600rpm의 유도전동기를 마스터모터로 사용하였다. 사용된 모터의 제원은 Table4와 같다.

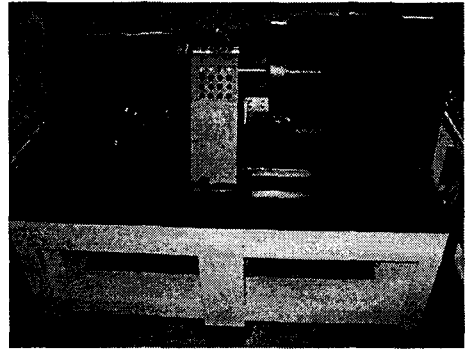


Fig. 4 Dynamometer connect to the induction Motor

Table 4 Characteristics of the test motor(induction motor)

Type	induction motor
Voltage source	220V/380V
Current	37.2A/215A
Frequency	60Hz
Efficiency	88%
rpm	3550 rpm
Insulation level	F
Output	11kW(15hp)
Pole number	2 pole

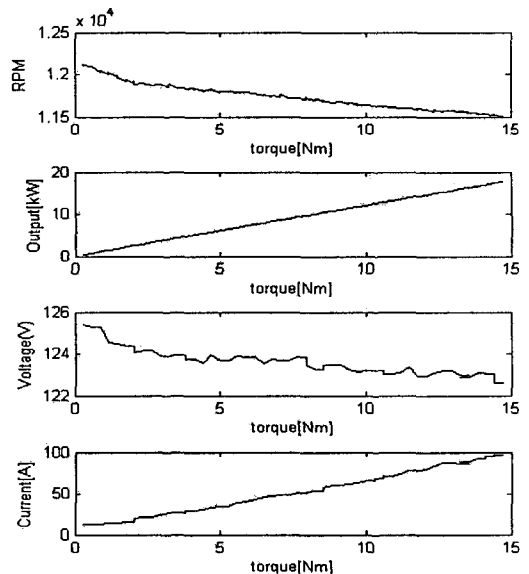


Fig. 5 Results of the test motor(BLDC)

## 5. 시험결과 및 고찰

### 5.1 동기모터 시험결과

35,000rpm의 BLDC 모터를 테스트 결과는 Fig. 5와 같다. 본 실험에서 부하를 증가하여 토크가 증가함에 따른 동기기의 회전속도가 5.34%정도 감소 현상이 나타났고. 시험구간동안 2.34%의 전압변동이 발생하였다. 시험에 사용된 시험모터의 경우 전용 인버터를 사용하였다. 5.2 유도기 비교시험결과

3,600rpm의 유도모터를 경남테크노파크 정밀기기센터에서 실시한 모터특성해석결과와 본 다이내모미터의 출력결과는 Fig. 6으로 나타내었고, 발전기형 다이내모미터의 테스트 결과는 Fig. 7과 같다.

전자의 경우 와류전류로 브레이크를 걸어주어, 최대 토크가 나오는 시점까지 부하를 걸어주었고 그 결과 정속도 운전하는 모터의 특성상 토크가 최

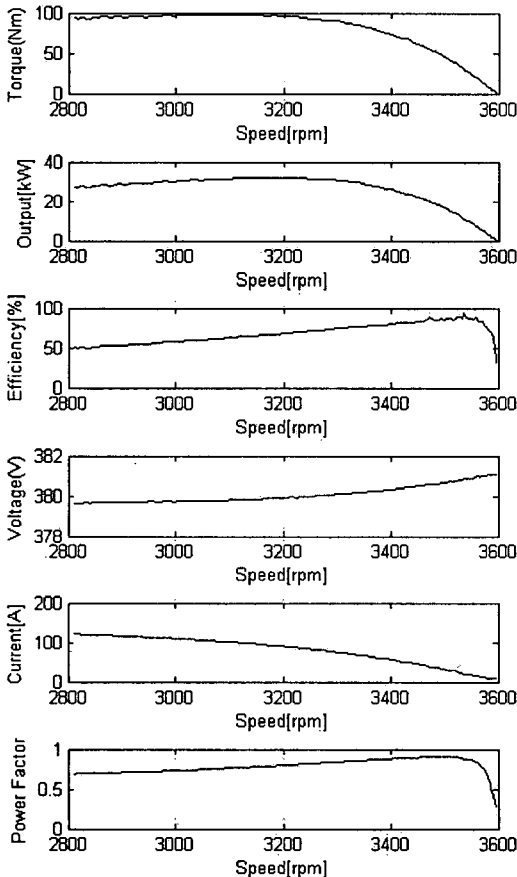


Fig. 6 Results of the testmotor by EC + Powder dynamometer

대 97Nm까지 걸리게 되며, 약 3,550rpm 시점에서 역률과 효율이 최대가 되었다.

발전기형 다이내모미터의 테스트는 정토크모드로서 테스트모터에 일정토크를 가하여 토크변화에 대하여 얻고자 하는 파라미터들을 구할 수 있는 방법이므로, 토크량을 약 10Nm까지 증가시킴에 따라 3660rpm에서 점차감소하면서 3,630rpm까지 변화하게 됨을 알 수 있다.

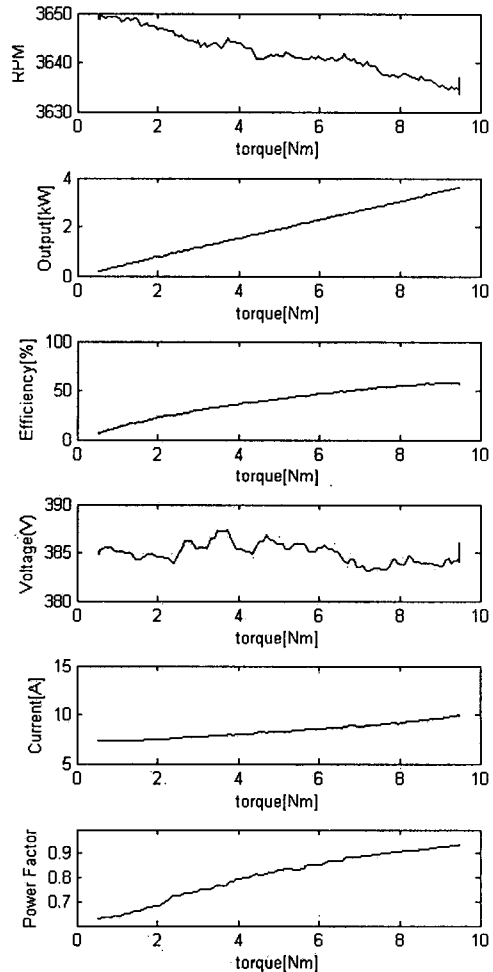


Fig. 7 Results of the testmotor by generator type dynamometer

### 5.2 고찰

시험에 사용된 BLDC모터의 출력결과값만으론 측정된 데이터에 대한 신뢰도를 보장하기 어려워 상용 유도모터를 경남테크노파크 정밀기기센터의

다이나모미터(A)와 발전기형 다이나모미터(B) 두 곳에 데이터 비교를 하였으나 두 기기의 데이터 출력방식의 차이점으로 인하여 데이터 비교를 위해 3Nm의 토크를 기준점을 잡아 그에 해당하는 각 데이터를 비교분석하였으며 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Comparison of the Results

	A	B
Torque(Nm)	3.06	3.08
RPMs	3643	3592
Voltage(V)	385	380
Output(W)	1167	1158.5
Input(W)	3908	1969
Current(A)	7.78	7.54
Efficiency(%)	29.9	58.8
Power Factor	0.75	0.39

Table 5와 같이 출력값(Output)의 결과는 유사한 수치를 나타내었으며 입력값(Input)의 유효전력값의 차이점은 역률(Power Factor)에서 오는 오차로 발생함을 알 수 있다. 즉 입력값에서의 오차는 모터에 인가되는 전력의 양에서부터 두 시험장소간의 선로 역률 등으로 인하여 결과의 차이를 나타나게 되었다.

## 6. 결론

본 논문에서는 고속회전기용 모터개발을 위해서 정확한 모터의 출력 및 토크특성 등을 확인해야 하는데 그러한 특성해석을 용이하게 하기 위한 다이나모미터의 개발 및 구축을 함에 있으며 그에 앞서 다이나모미터의 신뢰성을 향상시키고자 먼저 저속 모터를 실험하였다. 선로 등의 역률상의 문제가 아니라면 거의 유사한 결과치를 나타낼 수 있었으며 타연구기관에 인증된 30,000rpm이상의 초고속 다이나모미터를 구하기 어려워 직접적인 데이터 비교를 불가능하게 하였다.

또한 60,000rpm 50kW급의 다이나모미터의 개발 중에 있으며 이것은 향후 개발되는 초고속 회전기기의 성능 검증실험에 많은 도움이 될 것이므로 대

용량 초고속 다이나모미터의 개발에 많은 기대를 하게 된다. 초고속화에 따라 그것을 실험, 검증해야 할 다이나모미터의 개발에도 필요한 제어기술과 기계적 기술 또한 앞으로 나아가야 할 속제로 남는다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI 04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Hong, Y. K., Jang, J. Y., Cho, S. H., Cho, Y. H. and Kim, H. Y., "C Servo Motor/Driver Dynamometer," Proceedings of the Institute of Electronics Engineering of Korea Conference. pp. 62-65, 1995.
2. Kim, C. S., Yoon, S. H., Lee, C. M., Park, S. K., Ahn, H. K. and Sung, N. J., "Development of Ultra-speed Dynamometer System," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 451-452, 2007.
3. Mun, B. S., Lee, E. S. and Lee, H. S., "A study on the measurement of load torque by the field coil current in an eddy current dynamometer," Journal of the Korean Society of Precision Engineering. Vol. 18, No. 10, pp. 84-92, 2001.
4. Jesus, A. and Greg, M. A., "Control of an AC Dynamometer for Dynamic Emulation of Mechanical Loads With Stiff and Flexible Shafts," pp. 1250-1260, 2006.
5. Paresch, C., "Principles of Electric Machines and Power Electronics," WILEY, pp. 123-208, 1998.
6. Sul, S. K., "Control of Electric Machine," Brain Korea, 2002.