

# PSIM을 이용한 BLDC 전동기 제어 시뮬레이션

## 이 광 운

(목포해양대 해양전자통신공학부 전임강사)

### 1. 서론<sup>(1,2)</sup>

PSIM은 전력전자 분야에 최적화된 시뮬레이션 소프트웨어로 단순하면서도 편리한 사용자 인터페이스를 제공하여 다른 시뮬레이션 툴에 비해 비교적 빠른 시간 내에 사용법을 학습할 수 있으며, DLL 또는 C-Script 블록을 통해 복잡한 알고리즘도 C언어로 용이하게 구현할 수 있다. PSIM의 Motor Drive Module에는 유도 전동기, BLDC 전동기, PMSM 및 Switched Reluctance 전동기 등이 포함되어 있고, 전동기 구동 회로를 모델링하기 위한 스위칭 소자, 전압 및 전류 센서, 전동기 회전자의 위치 및 각속도 측정 센서와 전동기 부하 및 제어 모듈 등이 제공된다. 특히 PSIM 버전 7.0부터는 Thermal Module을 이용하여 전동기 구동 인버터의 손실 분석을 수행할 수 있고, 전자장 해석 프로그램인 JMAG과의 상호 시뮬레이션을 통해 실제 전동기 모델과 유사한 조건에서 시뮬레이션을 진행할 수 있다.

본고에서는 PSIM을 이용하여 BLDC 전동기 제어 시뮬레이션을 구현하는 전반적인 과정에 대해 소개하고자 한다.

### 2. BLDC 전동기 모델 및 구동 회로

그림 1은 PSIM의 Motor Drive Module에서 제공하는 BLDC 전동기 모델 이미지이다. PSIM에서 제공하는 BLDC 전동기 모델은 3상 Y결선 구조로, 전동기의 3상 입력 단자 및 중성점 단자, 기계적인 부하를 연결하기 위한 단자와 3개의 홀센서 출력단자로 구성되어 있다. BLDC 전동기 모델을 더블 클릭하면 그림 2와 같이 전동기의 제정수를 입력할 수 있는 창이 뜨는데, 고정자 권선의 저항과 인덕턴스, 역기전력 상수, 극수 및 관성과 기계적인 시정수 등의 제정수를 입력할

수 있다. PSIM에서 제공하는 BLDC 전동기 모델의 역기전력 파형은 이상적인 사다리꼴 형태를 가진다.

그림 3은 PSIM에서 구현한 BLDC 전동기 구동회로의 예로 홀센서 출력 신호에 따라 6개의 IGBT 소자들이 온-오프 동작을 수행한다. IGBT의 게이트 단자에는 on-off 제어 모듈이 연결되고, 이를 통해 IGBT의 온-오프 제어를 수행할 수 있다.

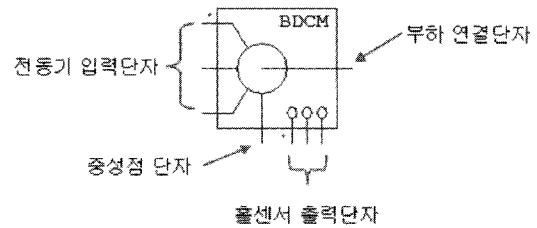


그림 1 PSIM의 BLDC 전동기 모델 이미지

Brushless dc machine (trapezoidal)

Parameter	Value	Display
Name	BDCM1	<input type="checkbox"/>
R (stator resistance)	11.9	<input type="checkbox"/>
L (stator self ind.)	2.07m	<input type="checkbox"/>
M (stator mutual ind.)	-0.69m	<input type="checkbox"/>
Vpk / krpm	32.3	<input type="checkbox"/>
Vrms / krpm	22.9	<input type="checkbox"/>
No. of Poles P	4	<input type="checkbox"/>
Moment of Inertia	7u	<input type="checkbox"/>
Mech. Time Constant	6m	<input type="checkbox"/>
theta_0 (deg.)	0	<input type="checkbox"/>
theta_advance (deg.)	0	<input type="checkbox"/>
Conduction Pulse Width	120	<input type="checkbox"/>

그림 2 BLDC 전동기 제정수 입력 창

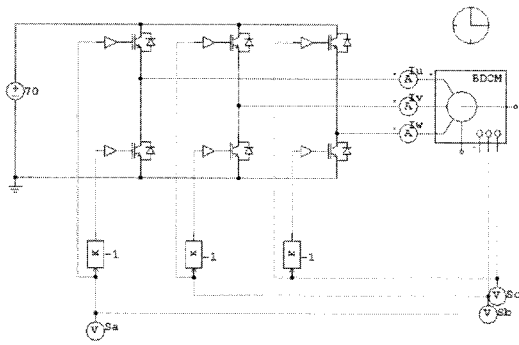


그림 3 BLDC 전동기 구동회로

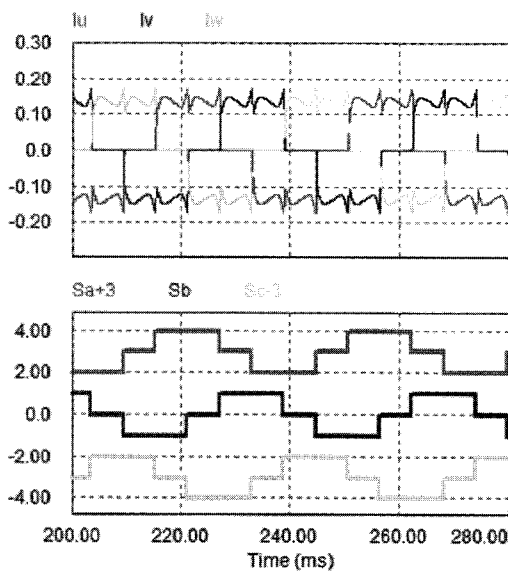


그림 4 BLDC 전동기 상전류(위) 및 홀센서 출력 파형(아래)

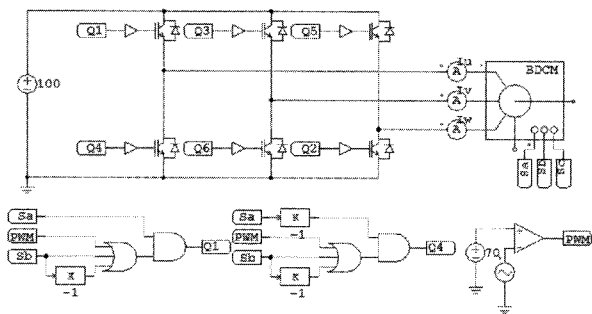


그림 5 Out-going phase unipolar PWM 구현

그림 4는 그림 3의 시뮬레이션 결과로, 3상 전류 및 홀센서 출력 파형을 나타낸 것이다. 홀센서 출력 파형이 실제의 홀센서 출력과는 차이가 있음을 확인할 수 있다. 홀센서 출력이 1

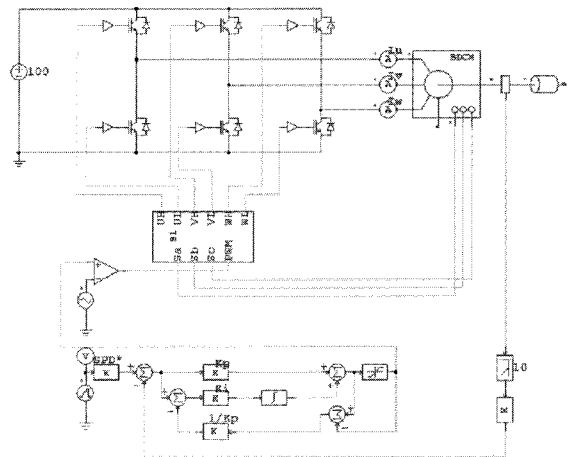


그림 6 BLDC 전동기 속도 제어 구현

일 때 상위 스위치를, -1일 때 하위 스위치를 온 시켜야 한다. 실제와 같은 홀센서 출력이 필요한 경우에는 속도 센서 및 적분기 또는 위치 센서를 이용하여 회전자 위치를 검출하여 C언어로 프로그래밍을 통해 구현이 가능하다.

그림 5는 BLDC 전동기 구동을 위한 인버터의 PWM 방식으로 일반적으로 사용되고 있는 Out-going phase unipolar PWM을 구현한 예로<sup>(3)</sup>, 비교기와 삼각파 전압원을 이용하여 PWM 신호를 생성하고, 홀센서 출력신호와 AND, OR 등의 로직 회로를 이용하여 PWM을 구현하였다. 그림 5에서 제어 신호의 연결을 단순화하기 위해 레이블을 사용하였다.

### 3. BLDC 전동기 제어 시뮬레이션

그림 6은 BLDC 전동기 속도 제어를 PSIM으로 구현한 예이다. 적분기, 비례 블록, 제한 블록 등을 이용하여 PI제어기를 구성하였고, PSIM의 Subcircuit을 활용하여 Out-going phase unipolar PWM 블록을 단순화하였다. 참고로 Subcircuit을 활용하면 PI 제어기, PWM 등 전동기 제어에 일반적으로 사용되는 기능을 표준화할 수 있으며, 그림 7에 나타난 바와 같이 Subcircuit 변수 입력 창을 통해서 내부 변수들의 값을 직접 변경할 수 있기 때문에 동일한 Subcircuit 블록을 여러 개 사용하는 경우에도 각각의 내부 변수들은 다른 값을 가지도록 설정할 수 있다. 또한, 그림 8과 같이 파라미터 파일(PSIM의 Elements 메뉴 → Others에서 Parameter File 선택)을 이용하면 PSIM 시뮬레이션 회로에 포함된 모든 제어 변수들의 값을 직접 수치로 입력하지 않고 변수로 입력할 수 있기 때문에 이를 활용하면 시뮬레이션 조건이 바뀌는 경우 일일이 제어 블록을 선택하여 변수 값을 변경하는 번거로움을 피할 수 있다.

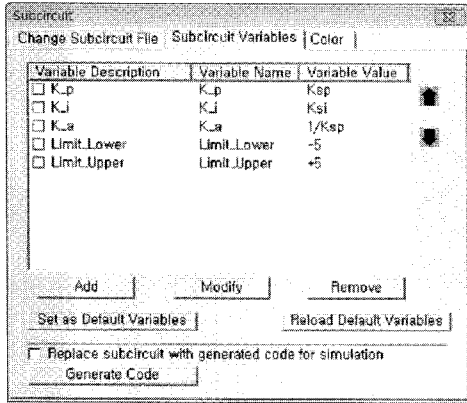


그림 7 Subcircuit 변수 입력 창

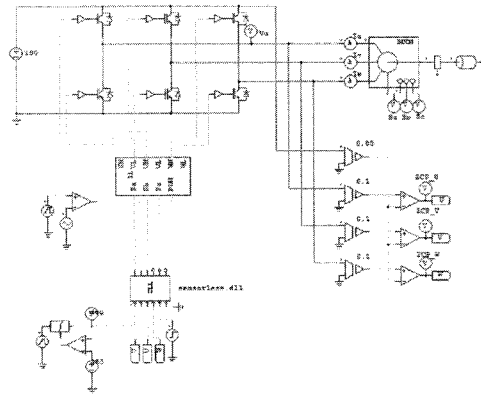


그림 10 BLDC 전동기 센서리스 제어 구현

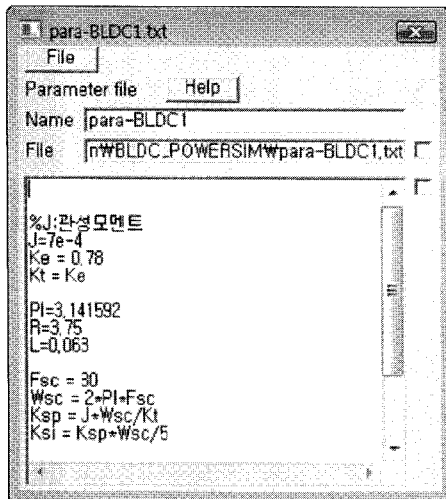


그림 8 파라미터 파일 입력 창

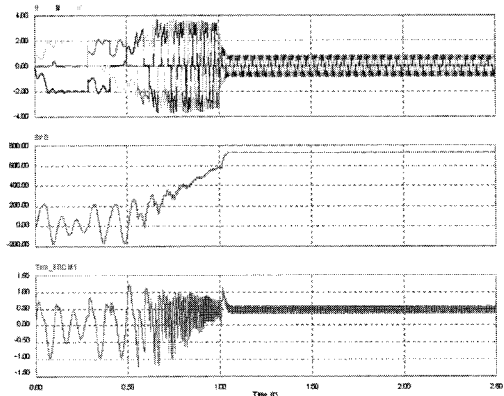


그림 11 BLDC 전동기 센서리스 제어 시뮬레이션 결과 파형 상전류(위), 속도(중간), 토크(아래)

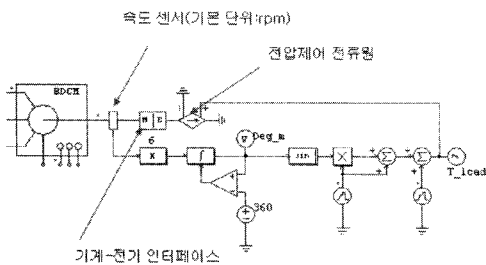


그림 9 기계-전기 인터페이스를 이용한 부하 구현

PSIM에서는 기계적인 부하로 일정 속도 부하, 일정 토크 부하, 일정 파워 부하 등을 제공한다. PSIM 버전 6.0에서는 특정 패턴을 가지는 부하를 구현해야 하는 경우 그림 9와 같이 기계-전기 인터페이스와 전압제어 전류원을 이용해야 했다. 그러나 PSIM 최신 버전에서는 외부 전압 신호에 의해 제

어되는 부하를 제공하므로 쉽게 다양한 부하 패턴을 구현할 수 있다.

그림 10, 11은 PSIM을 이용하여 BLDC 전동기 센서리스 제어를 구현한 예와 시뮬레이션 결과 파형이다. 전압 검출 센서와 비교기를 이용하여 단자 전압과 인버터 직류링크를 비교하여 오픈된 상의 단자 전압으로부터 역기전력의 ZCP(Zero Crossing Point)를 검출하였고<sup>(4)</sup>, ZCP 정보를 이용한 센서리스 제어 알고리즘은 C언어로 직접 프로그래밍하여 구현하였다. 서론에서도 언급한 바와 같이 PSIM의 C언어 인터페이스는 복잡한 알고리즘을 구현하는 데 편리함을 제공한다.

PSIM 버전 7.0부터는 전자장 해석 프로그램인 JMAG 인터페이스가 제공된다. 그림 12는 MagCoupler-RT PMSM 모듈을 이용하여 JMAG으로부터 구한 BLDC 전동기 모델을 PSIM에 인터페이스 한 예이다. MagCoupler-RT 모듈을 이용할 경우 JMAG을 통해 얻어진 BLDC 전동기의 실제 역기전력 파형, 전류에 따른 인덕턴스 변동 및 토크 정보 등이

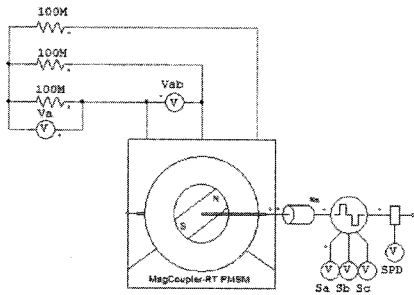


그림 12 BLDC 전동기 JMAG-RT 모델 인터페이스

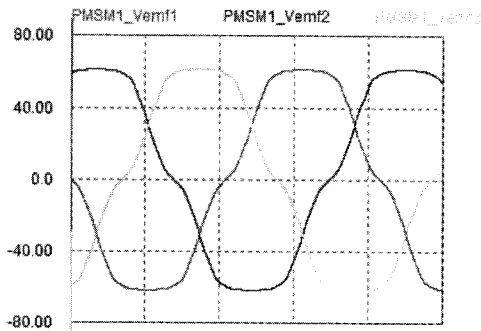


그림 13 BLDC 전동기 JMAG-RT 모델의 역기전력 파형

Lookup 테이블 형태로 저장되어 시뮬레이션에 이용되므로 비교적 빠른 시간에 실제 전동기에 가까운 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다. 그림 13은 그림 12의 일정 속도 부하를 이용한 BLDC 전동기 역기전력 측정 시뮬레이션 결과로, 역기전력 파형이 이상적인 사다리꼴 파형이 아닌 실제 전동기의 역기전력 파형을 보여주고 있다.

그림 14는 BLDC 전동기 JMAG-RT 모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과이고, 그림 15는 JMAG-RT 모델의 대상이 된 실제 BLDC 전동기를 구동한 결과 파형이다. 그림 14, 15를 비교해 보면으로써 JMAG-RT 모델을 이용하면 비교적 실제 전동기에 가까운 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본고에서는 PSIM을 이용하여 BLDC 전동기 제어 시뮬레이션을 구현하는 전반적인 과정에 대해 소개하였다. PSIM에서는 C언어 인터페이스를 제공하므로 복잡한 알고리즘도 시뮬레이션 과정에서 쉽게 구현할 수 있으며, 수렴(Convergence) 오류가 거의 발생하지 않고 사용자에게 친숙한 인터페이스를 제공한다. 또한 전동기 제어 시뮬레이션 구현을 위한 다양한 전동기 및 부하 모델이 제공되고 있으며, JMAG

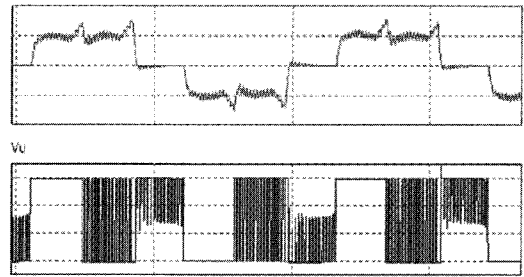


그림 14 BLDC 전동기 JMAG-RT 모델을 이용한 시뮬레이션 (위) 상전류, (아래) 단자전압

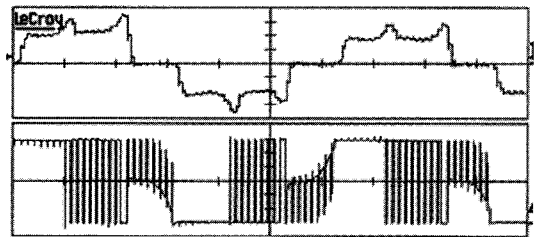


그림 15 BLDC 전동기 구동 실험 (위) 상전류, (아래) 단자전압

인터페이스를 통해 실제 전동기 모델에 가까운 시뮬레이션을 구현할 수 있다. 향후 전력전자 시뮬레이션 분야에서 PSIM의 사용 증가가 기대된다.

#### 참고 문헌

- (1) Proceeding of PSIM User Conference, 2008
- (2) PSIM User's Guide, 2008
- (3) 이광운, "구형파 전류여자 브러시리스 직류전동기의 토크맥동 저감에 관한 연구", 고려대학교 대학원 박사학위 논문, 1999.
- (4) 여형기, "브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구", 고려대학교 대학원 박사학위 논문, 1998.

#### < 필자 소개 >



#### 이광운(李光雲)

1971년 1월 16일생. 1993년 고려대 공과대학 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2000년~2007년 삼성전자 생활가전총괄 책임연구원. 2007년~2008년 고려대 BK21정보기술사업단 연구교수. 2008년~현재

목포해양대 해양전자통신공학부 전임강사.