

고성능 전동기 구동을 위한 DC Link 가변 전압 인버터 모델링

엄준모, 김태은, 김준형, 이병국  
성균관대학교 정보통신공학부

Modeling of Variable Voltage DC Link Inverter for High Efficient Motor Drives

Jun-Mo Um, Tae-Eun Kim, Jun-Hyung Kim, Byoung-Kuk Lee  
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 Matlab Simulink을 사용하여 고성능 BLDC(Brushless DC) 전동기 드라이브를 위한 DC Link 가변 전압 인버터 모델링을 제안한다. 다른 프로그램을 이용한 BLDC 전동기 시뮬레이션은 하드웨어적인 구현에는 유리하지만 처리속도가 낮고, 계산상의 오차가 크게 발생하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 수식기반인 Matlab Simulink를 활용하여 보다 정확하고 연산 속도가 빠른 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 모델은 승압 및 강압모드가 가능한 2-스위치 buck-boost 컨버터와 6-스위치 인버터 및 BLDC 전동기로 구성되고, 시뮬레이션을 통하여 전동기의 속도에 따른 DC Link 전압의 가변을 확인하였다.

1. 서 론

Matlab은 Matrix Laboratory의 약자로 공학용 프로그램으로서 최적의 기능들을 갖추고 있기 때문에 학계와 산업계에서 널리 사용되고 있고, 해당 어플리케이션에 대한 풀기 힘든 문제들을 손쉽게 모델링하고 해석 할 수 있다 [1]. PSIM, Pspice 등의 시뮬레이션 툴을 활용한 BLDC 전동기 드라이브 시스템은 도식을 기반으로 하여 하드웨어 설계 시 시스템의 이해가 빠르고 구성이 용이한 장점이 있으나 처리속도가 낮고, 그래프나 데이터의 입출력에 오차가 발생하여 시뮬레이션 결과의 신뢰도가 감소한다. Matlab Simulink를 사용한 BLDC 전동기 드라이브 시스템은 수식 기반의 Matlab 특성을 활용하여 처리속도를 향상시켰고, 시뮬레이션 중 데이터의 입출력 처리를 유연하게 할 수 있다. 또한 Simulink의 특성 상 그래픽 적으로 논리 흐름도를 설계하면 바로 코드가 생성되며 디버깅이 편리하기 때문에 실제 시스템 설계 시 시뮬레이션의 오류로 인해 낭비되는 시간을 단축할 수 있다. 본 논문에서는 Matlab Simulink를 사용하여 2-스위치 buck-boost 컨버터와 6-스위치 인버터로 구성된 고성능 전동기 구동을 위한 DC Link 가변 전압 인버터 시스템을 모델링하였다. 제안한 시스템은 BLDC 전동기의 속도에 따라 DC Link 전압을 가변함으로써 전류 및 토크 리플을 감소하여 전동기의 소음을 줄이고, 센서리스로 전동기를 제어할 경우 속도제어가 용이한 장점을 가지고 있다.

2. 본 론

2.1 고성능 전동기 구동을 위한 DC Link 가변 전압 인버터 시스템

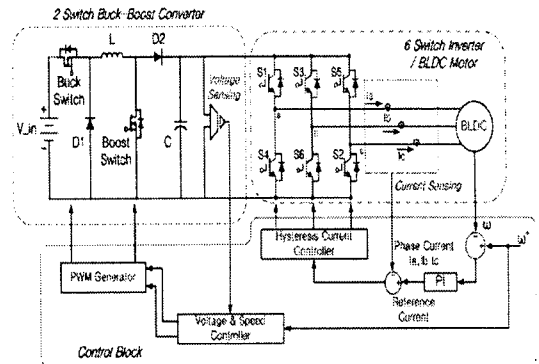


그림 1. DC Link 가변 전압 인버터 시스템

그림 1은 고성능 전동기 구동을 위한 DC Link 가변 전압 인버터 시스템을 나타낸다. 시스템은 2-스위치 buck-boost 컨버터와 6-스위치 인버터, 컨트롤 회로의 3개 블록으로 구성된다. 2-스위치 buck-boost 컨버터에서 발생하는 출력 전압 값을 6-스위치 인버터의 입력전압으로 사용해 BLDC 전동기를 구동하며, Hall 센서, Resolver와 같은 센서를 통해 센싱된 전동기의 속도는 스케일링 되어 DC Link 전압 가변을 위한 reference로 사용된다. 이 reference는 전동기 속도에 따라 가변되기 때문에 속도와 비례하게 컨버터 출력전압을 제어할 수 있다.

2.2 6-스위치 인버터와 BLDC 전동기 모델링

6-스위치 인버터는 BLDC 전동기를 일정한 토크로 구동하기 위해 사다리꼴 형태의 역기전력에 동기화할 수 있는 준 구형과 형태의 3상 인버터 전류를 히스테리시스 전류 제어 기법을 사용하여 만들어낸다. 6-스위치 인버터와 BLDC 전동기에 대한 모델링은 기존의 논문에 있는 내용을 바탕으로 구성하였다 [2]. 본 논문에서는 6-스위치 인버터 앞단에 2-스위치 buck-boost 컨버터를 연동함으로써 buck 컨버터와 boost 컨버터 두 가지 기능이 가능하고, 전류 리플을 감소시키기 위해 속도에 따라 DC Link 전압이 가변 되도록 모델링하였다. 또한 BLDC 전동기는 저항, 인덕터 및 역기전력을 포함한 수식으로 모델링하였다.

2.3 DC Link 가변전압을 위한 컨버터 모델링

2-스위치 buck-boost 컨버터는 입력전압이 DC Link 전압 보다 높을 때는 buck 모드, 낮을 때는 boost 모드로 동작한다 [3-5].

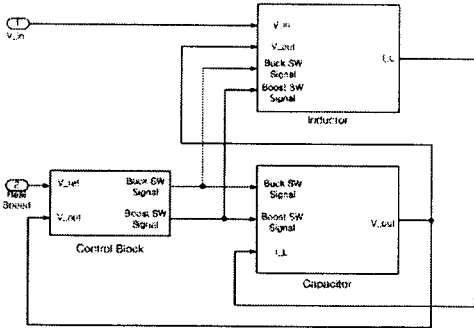


그림 2. 2-스위치 buck-boost 컨버터 시스템 블록도

그림 2는 Matlab Simulink를 이용하여 구현한 2-스위치 buck-boost 컨버터 시스템의 블록도를 나타낸다. 시스템은 컨트롤회로, 인덕터회로, 커패시터회로의 3가지 하드웨어 블록으로 구성된다.

### 2.3.1 하드웨어(Control) 블록

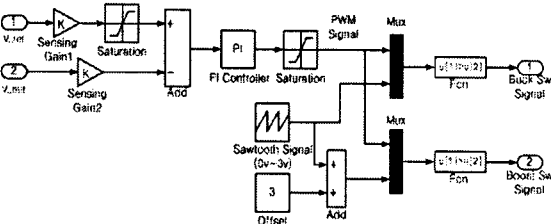


그림 3. 하드웨어(Control) 시스템 알고리즘

그림 3은 하드웨어(Control) 시스템의 알고리즘을 나타낸다.  $v_{ref}$ 는 DC Link의 가변을 위한 reference로 사용되는 전압 값을 나타내고,  $v_{out}$ 은 컨버터의 출력을 나타낸다. Adder에 의해 발생한 전압 error는 pi제어기와 리미터를 통과하면서 DC Link 가변을 위한 buck, boost 모드를 결정하는 제어된 출력 값으로 정해진다. buck-boost 컨버터로 동작하기 위해 2개의 톱니파를 사용하는데 buck 모드를 위한 톱니파에는 0V ~ 3V의 전압을 주고, boost 모드를 위한 톱니파에는 3V의 offset을 인가한 3V ~ 6V의 전압을 준다. 컨버터의 스위칭 주파수, 즉 톱니파의 주파수는 33khz로 선정하였다. 제어된 출력 값이 톱니파와 비교된 후 PWM 파형이 발생되고, MUX를 지나면서 스위칭 함수에 의해 시퀀스가 만들어진다. 이렇게 만들어진 스위칭 시퀀스는 인덕터와 커패시터 블록에 입력으로 사용된다.

### 2.3.2 하드웨어(Inductor) 블록

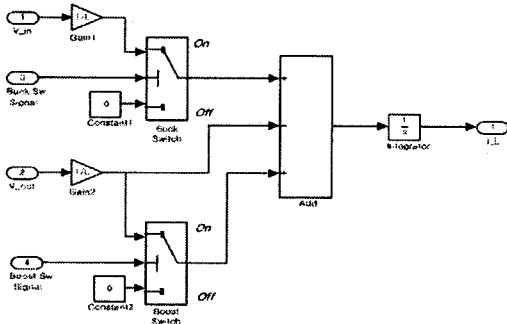


그림 4. 하드웨어(Inductor) 시스템 알고리즘

그림 4는 하드웨어(Inductor) 시스템의 알고리즘을 나타낸다. 컨버터의 입력 전압  $v_{in}$ , buck, boost switch signal, 컨버터의 출력전압  $v_{out}$ 이 입력으로 사용되었고, 출력으로 인덕터 전류  $i_L$ 가 발생한다. 컨버터의 전압 제어기 출력 값이 0V ~ 3V일 때, 스위칭 시퀀스는 표 1과 같다.

표 1. buck 모드일 때의 스위칭 시퀀스

비교기 상태	buck switch	boost switch
제어된 출력 값 > 톱니파	ON	OFF
제어된 출력 값 < 톱니파	OFF	OFF

제어된 출력 값이 3V ~ 6V일 때, 표 2와 같은 스위칭 시퀀스로 동작한다.

표 2. boost 모드일 때의 스위칭 시퀀스

비교기 상태	buck switch	boost switch
제어된 출력 값 > 톱니파	ON	ON
제어된 출력 값 < 톱니파	ON	OFF

buck 모드에서 boost switch는 항상 OFF를 유지하고, buck switch의 ON/OFF에 따라 식 (1), (2)가 성립한다.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int (v_{in} - v_{out}) dt \quad (1)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int (-v_{out}) dt \quad (2)$$

그림 4에서 buck switch가 ON일 때는  $(v_{in} - v_{out})$ 이 Adder에 입력되고, 적분기를 통과함으로써 인덕터 전류가 출력된다. 반면 OFF일 때는 반전된  $v_{out}$ 만이 Adder를 통과하게 된다. boost 모드에서는 buck switch가 계속 ON을 유지하기 때문에  $v_{in}$ 이 항상 Adder로 입력된다. boost switch의 ON/OFF에 따른 인덕터 전류  $i_L$ 은 식 (3), (4)와 같다.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v_{in} dt \quad (3)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int (v_{in} - v_{out}) dt \quad (4)$$

boost 모드일 때  $v_{out}$ 은 boost switch가 ON일 때는 상쇄되고, OFF일 때는 반전되어 Adder로 입력된다. 입력된 값은 적분기를 통과하면서 인덕터 전류  $i_L$ 로 출력된다.

### 2.3.3 하드웨어(Capacitor) 블록

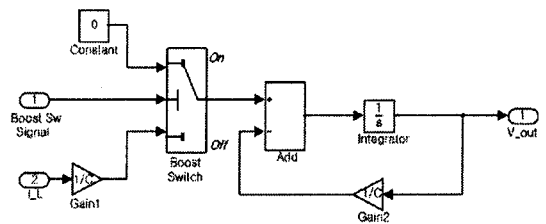


그림 5. 하드웨어(Capacitor) 시스템 알고리즘

그림 5는 하드웨어(Capacitor) 시스템의 알고리즘을 나타낸다. 인덕터 전류  $i_L$ 과 제어회로를 통과한 buck,

boost switch signal이 입력으로 사용되고, 제어회로와 인버터의 입력으로 사용되는  $v_{out}$ 이 출력된다. buck 모드일 때 buck switch의 ON/OFF에 따른 출력 전압  $v_{out}$ 은 식 (5)와 같고, boost switch는 항상 OFF를 유지한다.

$$v_{out}(t) = \frac{1}{C} \int (i_L - v_{out}) dt \quad (5)$$

또한 boost 모드일 때 boost switch가 OFF되면 식 (5)가 성립한다. 결국 커패시터 블록에서는 boost 모드에서 boost switch가 ON/OFF 될 때의 수식만 포함하면 되므로 인버터 블록과는 달리 boost switch 한 개로 구성된다. boost switch가 ON될 때의 식 (6)을 구현하기 위해  $v_{out}$ 을 반전시켜 피드백을 취한다. 이 값은 Adder와 적분기를 통과하면서  $v_{out}$ 으로 출력된다.

$$v_{out}(t) = \frac{1}{C} \int (-v_{out}) dt \quad (6)$$

boost switch가 OFF일 때는 Adder를 통해 계산된  $(i_L - v_{out})$ 이 적분기를 통과하여 전압  $v_{out}$ 이 출력됨으로써 식 (5)를 구현한다.

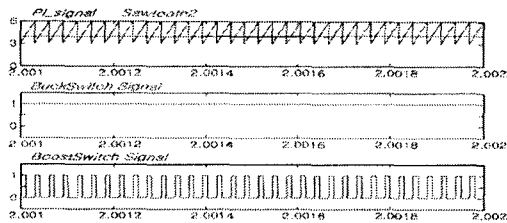
제안한 BLDC 전동기 드라이브 시스템은 2-스위치 buck-boost 컨버터에서 buck, boost 모드로 선택적인 작동이 이루어지며 전동기의 속도에 의해 DC Link가 가변된다.

### 3. 시뮬레이션

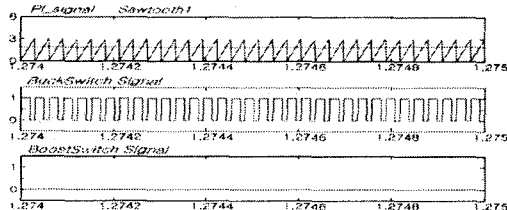
모델링 된 시스템을 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전동기 속도 가변범위는 500rpm ~ 2500rpm 이고, 컨버터의 입력 전압은 140V, 컨버터의 출력 범위는 50V ~ 250V이다. BLDC 전동기의 파라미터는 표 3과 같다 [2].

표 3. BLDC 전동기 파라미터

$K_t$	0.21476 Nm	$R_{LL}$	1.5 $\Omega$
$K_{e\_LL}$	0.21486 V/(rad/sec)	$(L - M)_{LL}$	6.1 mH
$J$	$8.2614e - 5$ kgm <sup>2</sup>	Power	1 HP
$T_L$	0.662 Nm	Rated Speed	2,500 rpm



(a) PWM 파형 (boost 모드)



(b) PWM 파형 (buck 모드)

그림 6. 2-스위치 PWM 파형

그림 6은 pi제어기와 리미터를 통과한 제어된 출력 값이 33khz의 톱니파와 비교되어 만들어지는 PWM 파형을 나타낸다. boost 모드와 buck 모드에서 각각의 스위칭 시퀀스에 따른 PWM 파형이 발생하여 스위치를 ON/OFF하는 것을 확인하였다.

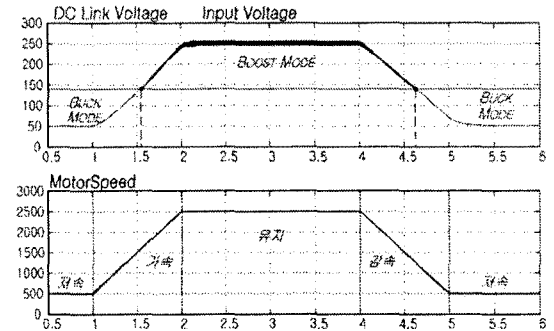


그림 7. 전동기 속도의 증가 및 감속에 따른 DC Link

그림 7은 BLDC 전동기의 속도에 따른 DC Link 전압의 가변을 나타낸다. 저속 구간에서 DC Link 값이 최소값인 50V로 BLDC 전동기를 기동하고, 가속 구간에서는 전동기 속도와 비례하게 DC Link 전압이 증가하면서 buck에서 boost 모드로 전환된다. BLDC 전동기가 정격 속도인 2500rpm에 이르면 일정한 속도가 유지되며, DC Link은 최대값인 250V를 출력한다. 반면에 전동기가 감속할 때에는 DC Link 전압도 강압이 이루어지는 것을 확인하였다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 고성능 BLDC 전동기의 속도에 따른 DC Link 가변 인버터 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 DC Link 전압을 가변 할 수 있는 2-스위치 buck-boost 컨버터와 6-스위치 인버터, BLDC 전동기를 각기 모델링하였다. 시스템의 처리속도를 정확하고 빠르게 하기 위하여 Matlab을 사용하였고, BLDC 전동기의 속도에 따라 DC Link 전압이 가변되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안된 DC Link 가변 전압 인버터는 산업용 BLDC 전동기 드라이브 시스템을 구성할 때 효율적인 데이터 분석과 계산상의 오차를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이진우, "Matlab/Simulink의 소개 및 전력전자 분야 응용", 전력전자학회지, pp.10-14, Jun, 1998
- [2] B. K. Lee, M. Ehsani, "Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives", Electric Power Components and Systems, 31:841-868, 2003
- [3] G. K. Andersen, F. Blaabjerg, "Current programmed control of a single-phase two-switch buck-boost power factor correction circuit," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 53, Issue. 1, pp. 263-271, Feb. 2006.
- [4] G. K. Andersen, F. Blaabjerg, "Designing single phase current-programmed-controlled rectifiers by harmonic currents," IEEE Industry Applications Conference (IAC2002), vol. 3, pp. 2125-2132, Oct 2002
- [5] K. Chomsuwan, P. Prisuwan, V. Monyakul, "Photovoltaic grid-connected inverter using two-switch buck-boost converter," IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PSC2002), vol. 1, pp. 2125-2132, May. 2002