

# BLDC모터 최적 제어를 위한 Lead Angle Auto Tuning 기법

안성국\* · 차한주  
SYSWORK\*, 충남대학교

## Lead Angle Auto Tuning Technique for Optimal Control of BLDC Motor

Sung-Kuk Ahn\* · Hanju Cha  
SYSWORK Co., LTD\*, Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문은 Sensored BLDC 모터의 제어방법을 설명하고, 효율적인 최적 제어를 하기위해 Lead Angle 제어를 하는 방법에 대하여 설명하였다. Lead Angle 값을 실시간 Auto Tuning 하는 기법을 설계 및 구현하였다. 실제 Microchip 사의 DSC를 사용하여 Software로 동작을 구현하였으며, PWM 스위칭 하기 위한 반도체 소자는 IGBT 모듈인 IPM을 사용하여 BLDC 모터의 구동회로인 인버터를 구성하였다. 실제 사용하는 400W급 BLDC 모터를 사용하여 Lead Angle 제어와 Auto Tuning 실험결과를 비교 검증하였다.

### 1. 서론

본 논문에서는 Sensored BLDC 모터의 제어 방법에 대하여 설명한다. BLDC 모터는 DC 모터에 브러시가 없는 구조로써 반영구적으로 사용이 가능하기 때문에 가정용, 산업용 등 많은 분야에서 흔하게 사용이 되고 있으며, 이 논문에서는 산업용에 사용되는 내용에 대하여 설명이 진행된다.

반도체 및 디스플레이 산업 등에 사용되는 모터는 크게 FFU(Fan Filter Unit)와 EFU(Equipment Fan filter Unit)로 나뉜다. 보통 FFU에는 고용량의 모터를 사용하고 EFU에는 FFU보다 더 작은 용량의 모터를 사용하고 있다. 또 EFU에서도 장비에 따라 다양한 임펠라가 사용되기 때문에 여러 가지의 부하를 갖는다. 따라서 장비 또는 여러 가지 요인들의 상황에 따라 Lead Angle 제어 값을 튜닝해야 하기 때문에 관리에 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 이러한 Lead Angle 값을 실시간 튜닝을 하며 제어하는 방법에 대하여 기술하도록 하겠다.

## 2. Sensored BLDC Motor 제어 기법

### 2.1 Sensored BLDC Motor

Sensored BLDC 모터의 구조는 로터, 스테이터 그리고 회전 위치를 감지하는 Hall Sensor로 구성되어 있다. 일반적인 모터의 경우 120도 간격으로 Hall Sensor가 3개 부착되어 있다. Hall Sensor 신호에 따라 로터 위치를 파악하고, 위치에 따라 인버터에 스위칭 신호를 주어 모터를 구동시킨다. 고속 또는 부하가 커지게 되면 지연이 발생하는데 이때 발생하는 지연을 보상하기 위한 제어 방법을 설명하도록 한다.

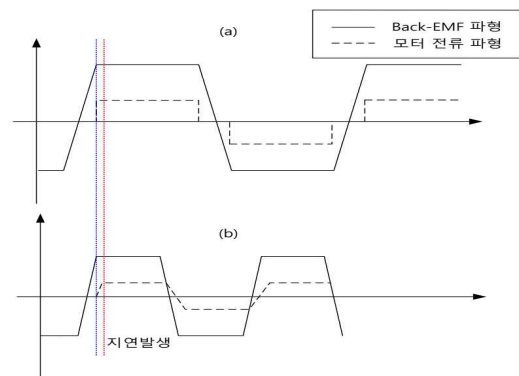


그림 1 다른 상황에서의 모터 역기전력과 전류파형  
(a) 무부하 또는 저속에서의 상태  
(b) 부하 또는 고속에서의 상태

### 2.1.1 Lead Angle 제어 방법

일반적인 Sensored BLDC 모터의 제어 방법으로는 Back-EMF와 전류파형이 동위상이 되도록 제어를 하고 있다. 하지만 제어 중에 CPU 또는 수동소자 등으로 인하여 스위칭 지연이 발생되며, 그림 1과 같이 저속과 고속, 그리고 무부하와 여러 부하 상태에서 제어할 때 지연이 발생하게 된다. 이러한 스위칭이 지연되는 상황을 보상하기 위해 PWM 스위칭 시에 스위칭 Time를 예측하여 좀더 빠른 스위칭을 하도록하여 Back-EMF값과 모터 전류파형이 동위상이 되도록 제어한다. 이러한 제어 방법을 Lead Angle 제어 방법 또는 Advanced Angle 제어 방법이라 한다.

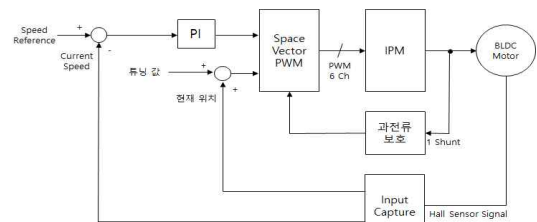


그림 2 Sensored BLDC 모터 Lead Angle 제어의 구성 요소

그림 2는 Lead Angle 제어의 구성요소를 설명한 내용이다. 현재 속도에 맞춰 PI 제어를 하고 SVPWM에 명령을 내린다. SVPWM이 받은 명령과 각도에 맞춰서 IPM에 PWM 신호가 전달되게 된다. 각도는 홀센서 각도를 참고하며, 부하, 속도에

따라 미리 튜닝을 해준 값과 더한 값으로 현재 각도 명령을 내린다. 그럼 현재 각도와 튜닝된 Lead Angle 값과 속도에 맞춰 PWM 신호를 발생시키고 BLDC 모터를 구동하도록 하여 동작시킨다.

### 2.1.2 Lead Angle Auto Tuning 제어

BLDC 모터를 최적제어하기 위해 실시간 전류값을 이용하여 Lead Angle 값을 실시간 튜닝할 수 있다. 본 논문에서는 1-Shunt 방식에 대하여 설명하도록 하겠다. 1-Shunt 전류 측정 기법을 이용한 BLDC 모터 Lead Angle Auto Tuning 방법의 구성요소는 그림 3과 같이 설명할 수 있다. Shunt 저항의 값을 이용하여 각 상에 걸린 전류를 유추해내어 읽고, 각 상 전류를 이용하여 Lead Angle 값을 튜닝하는 방법을 설명하도록 하겠다.

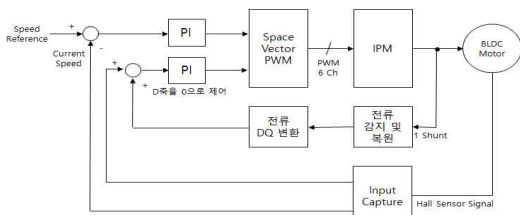


그림 3 BLDC 모터의 Lead Angle Auto Tuning 제어의 구성 요소

1-Shunt 방식의 제어방법은 3상 Leg의 끝에 1개의 Shunt 저항이 부착되어 있다. Shunt 저항을 이용하여 전류를 측정할 때 SVPWM의 스위칭 상태에 따라 각 상의 전류를 알 수 있다. SVPWM에서 0 또는 7의 상태는 무시하고 1에서 6까지의 값만 사용할 수 있으며, 표 (1)을 통하여 모터 출력 전류를 확인할 수 있고, 3상 전류를 모두 구하여 전류값으로 위치를 파악할 수 있다. 그러나 1-Shunt 방식의 SVPWM 기법을 사용하면 빠른 시간 내에 측정해야 되는 어려움이 있기 때문에 그림 4와 같이 빠른 시간 내에 샘플링을 통하여 2개의 전류값을 측정한다. 키르히호프의 법칙을 통해 2개의 전류값을 이용하여 나머지 한 개의 전류값을 유추해 낼 수 있어 3상의 전류를 모두 감지할 수 있다.

이제 모든 전류 측정이 완료되었으므로, 측정된 전류를 통하여 위치를 파악하여 Lead Angle 값을 계산하여야 한다. 우선 3상 전류를 이용하여 D,Q 변환을 하고 D축의 위치를 파악한다. 여기서 D축이 0이 되도록 PI 제어기를 통하여 Lead Angle 값을 조정하고 Hall Sensor 신호를 통하여 파악된 위치에 Lead Angle 값을 반영하여 최적 제어를 하도록 한다.

표 1 홀센서 출력에 따른 모터 출력 전류 값

Status	Uh	Vh	Wh	Output
0	0	0	0	X
1	1	0	0	Ia
2	1	1	0	-Ic
3	0	1	0	Ib
4	0	1	1	-Ia
5	0	0	1	Ic
6	1	0	1	-Ib
7	1	1	1	X

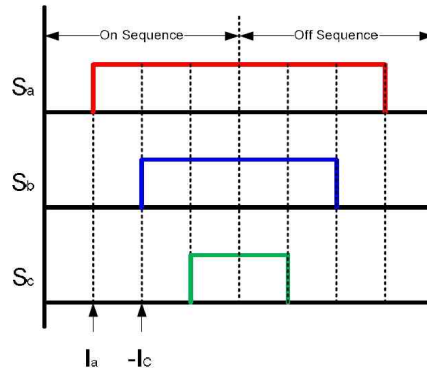


그림 4 SVPWM 측정 타이밍도

## 3. 실험 결과

제안된 Lead Angle 값을 자동적으로 튜닝하는 제어 기법을 검증하기 위하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 제어기는 Syswork 사의 제품을 사용하였고, 모터 또한 Syswork 사의 Outer형 BLDC 모터를 사용하였다. 모터 기동 시 전류파형을 그림 5에 표기하였다. 실험 결과 그림 5 (a)와 같이 초기 기동 시 Angle 값을 찾아가는 과정에서 전류파형이 불안정하게 측정되었으나, 그림 5 (b)처럼 일정 시간이 지난 후에는 전류파형이 안정되고, 모터가 정상적으로 구동하는 것을 확인할 수 있다.

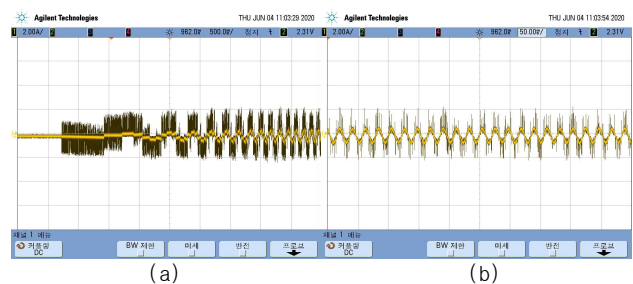


그림 5 BLDC 모터 U상 전류 파형

(a) 초기 기동 전류 파형 (b) 정상 기동 중 전류 파형

## 4. 결론

본 논문에서는 BLDC 모터를 최적으로 제어할 수 있도록 자동적으로 튜닝하여 제어하는 기법을 제안하였다. 실제 3-, 2- 그리고 1-Shunt 방식에서 모두 사용이 가능하며, 3-, 2- 션트 방식에서 더 정확하게 측정될 수 있지만, 1-Shunt 방식에서도 정확도가 보장되어 제어하는 것을 확인할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] 구분관, "BLDC 모터를 위한 최적 Lead Angle 제어 기법 연구", 전력전자학회 학술대회 논문집, 59 - 60 page, 2010, July.
- [2] TIDUCY7 "Current Sensing With <1-us Settling for 1-, 2-, and 3-Shunt FOC Inverter Reference Design." Texas Instruments, 2017, March