

# BLDC Motor

Innova Lee(이상훈)  
gcccompil3r@gmail.com

# Overview

1. BLDC 모터의 구조
2. BLDC 모터의 구동 방식
3. BLDC 모터의 제어 방식
4. 실제 활용 사례 및 구현

# BLDC Motor Structure

BLDC 모터의 구조에 대해 살펴보겠습니다.

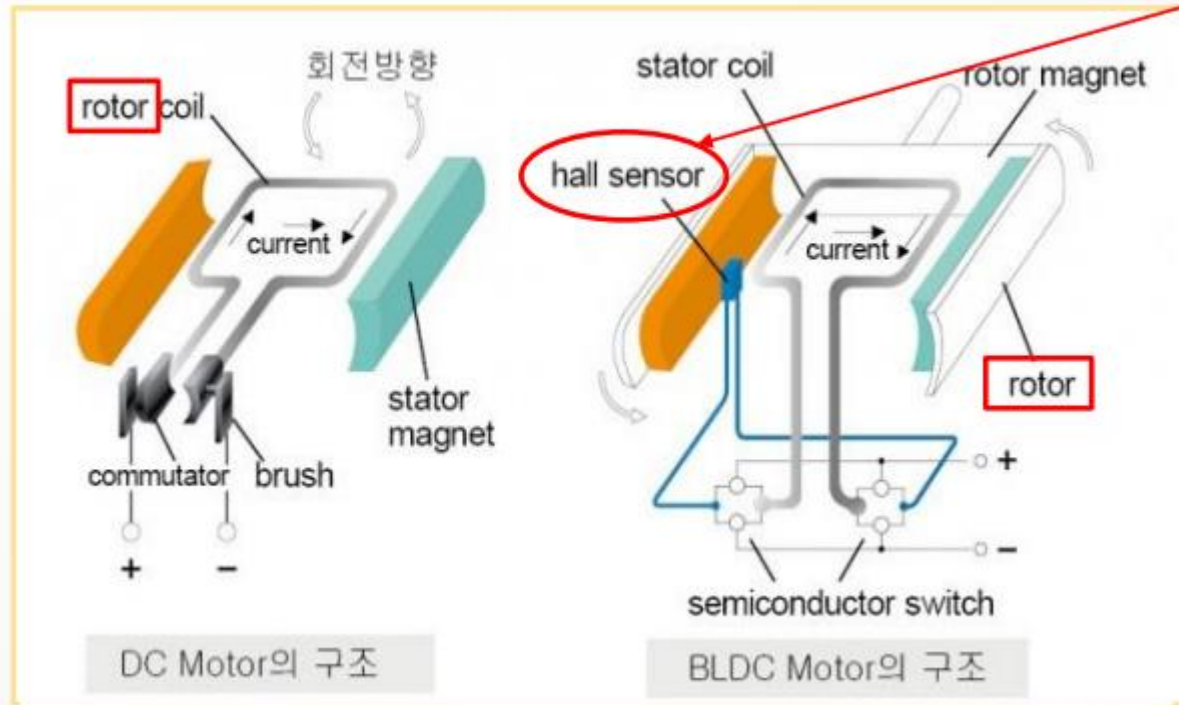
우선 BLDC 모터와 DC 모터는 유사한듯하지만 유사하지 않은 구조를 가지고 있습니다.

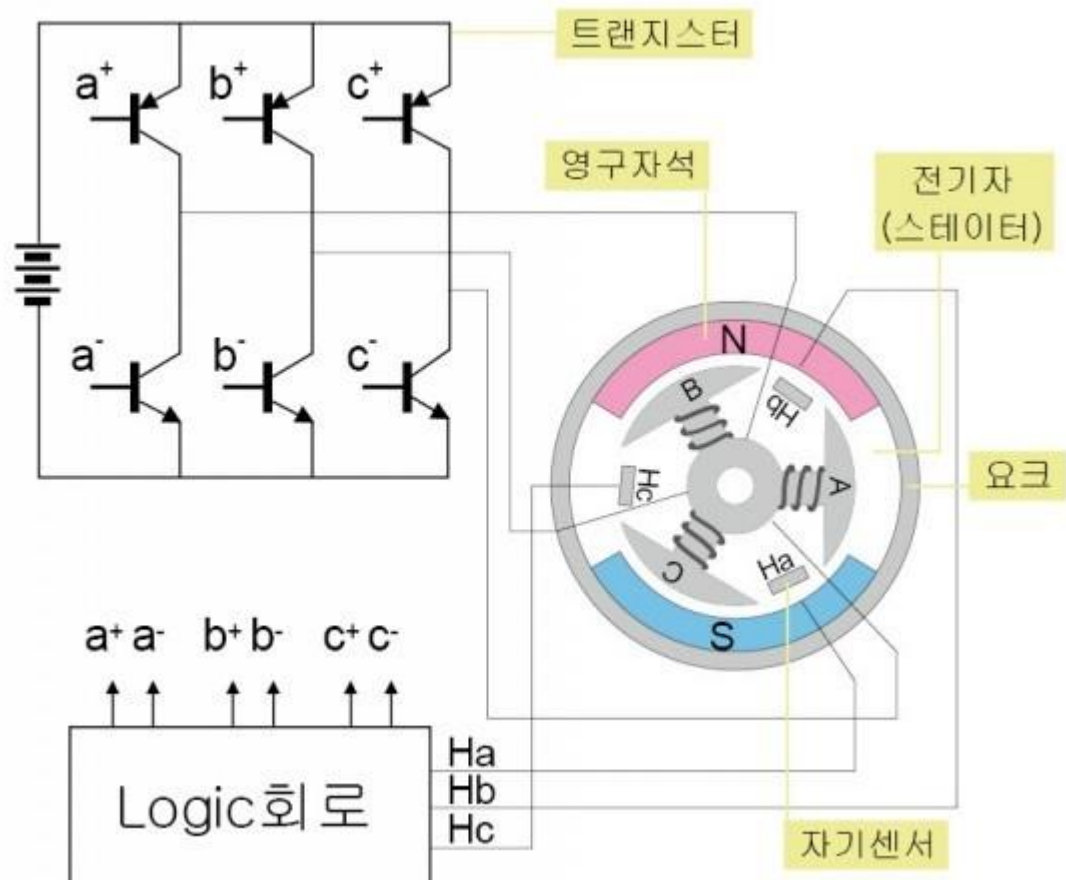
가장 중요한 것이 BLDC 모터는 DC 모터와는 상이하게 Brush 라는 것을 가지고 있지 않습니다.

(DC 모터의 가장 큰 단점인 Brush 가 닳아 성능이 감소되는 것을 보완한 영구적 형태를 갖춘 모터가 BLDC 모터입니다)

그림에서 보면 BLDC 모터에는 DC 모터와는 다르게 Stator Coil 이 고정되어 있고 자석이 움직이는 구조로 되어있습니다.

## ② BLDC 모터와 DC 모터의 차이



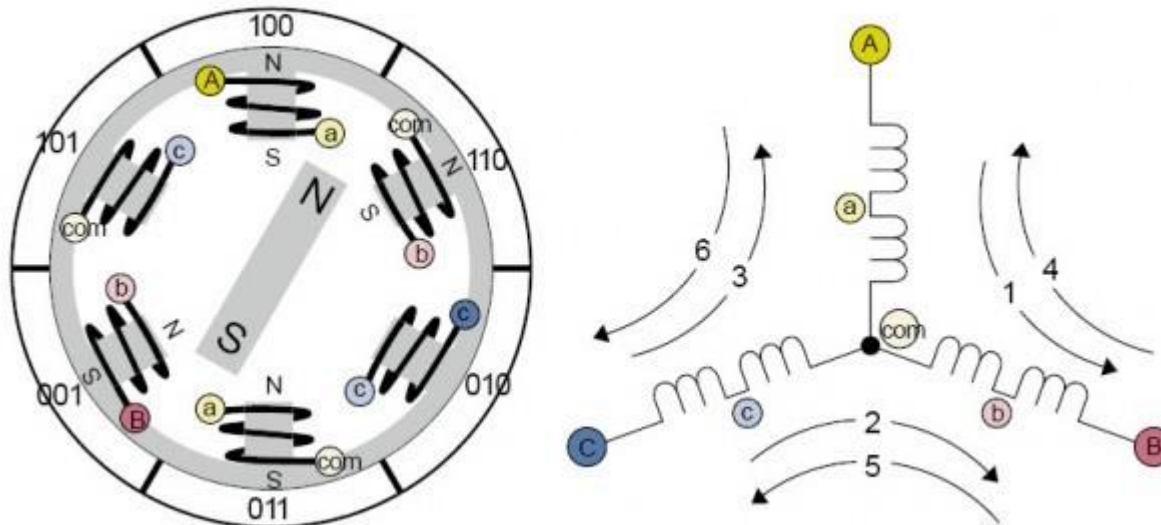


DC Motor 는 Brush 를 이용하여 전원을 인가하는 대신 BLDC Motor 는 FET(TR) 스위치를 이용하여 전원을 인가합니다. FET Switch 를 이용하여 전원인가를 하는 이유는 BLDC Motor 의 동작점을 지속적으로 바꾸기 위해서입니다. 이러한 이유로 Hall Sensor 가 필요합니다.

# BLDC Motor Structure

여기서 스위치를 통해서 어느 구간으로 펄 회로를 만드냐에 따라서 전류가 흘러가는 방향이 달라집니다.  
회로 이론에서는 이 부분을 학습하기 위해 3 상 회로라는 파트가 존재하며  
보다 정교한 해석을 수행하기 위해 Y-Delta Conversion 이라는 기법 또한 가지고 있습니다.

모터를 설계하거나 인버터 회로를 설계하고자 하는 상황이 아니므로 이 부분은 넘어가도록 하겠습니다.



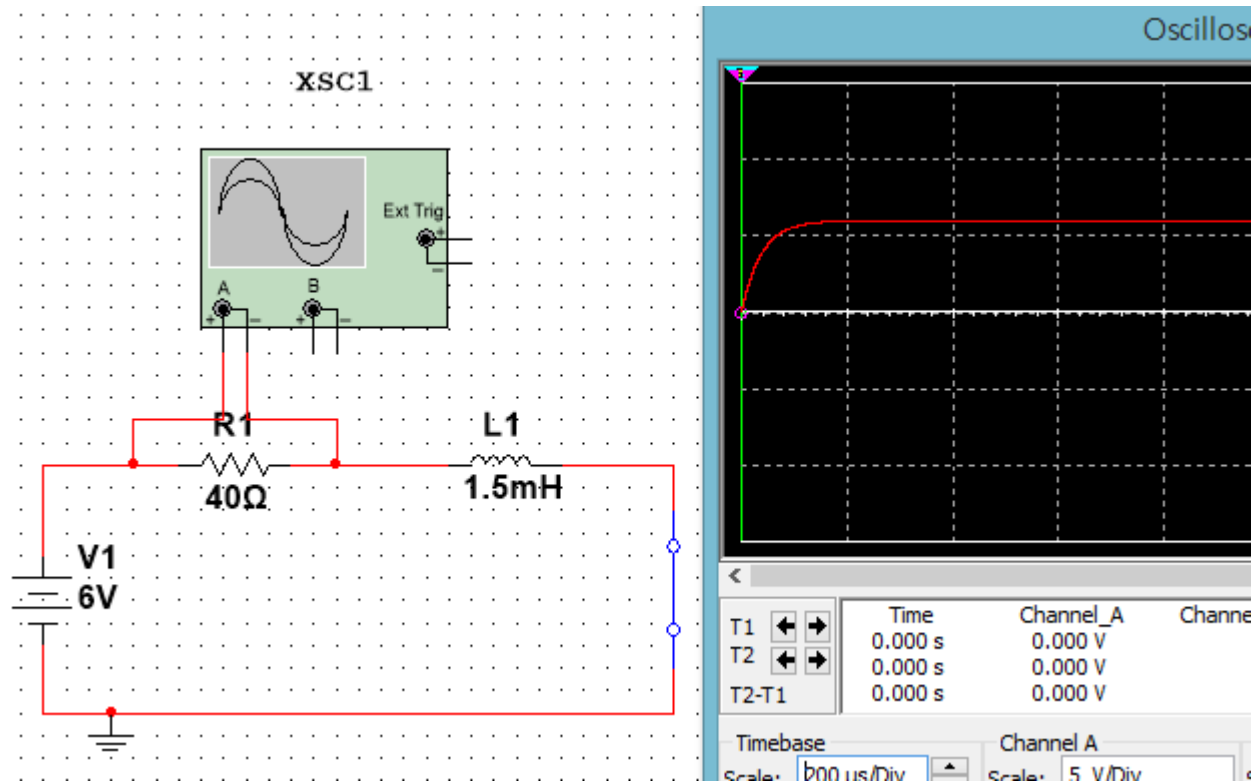
코일을 사용함에 있어서 역기전력을 제어하는 것은 매우 중요한 일입니다.  
그러므로 먼저 역기전력에 대해 알아본 이후  
BLDC 모터의 제어 방식에 대한 부분을 좀 더 살펴보기 위해 아래의 자료를 일부분 활용하도록 하겠습니다.

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160b.pdf>

# RL Circuit Response

저항과 인덕터로 구성된 RL 회로의 동작에 대해 살펴보도록 하겠습니다.

역기전력이라는 것에 대해 설명하기 위해 회로 이론 교육에 사용한 RL 회로에 대한 부분을 가져왔습니다. 시뮬레이터는 MultiSim 을 사용하였습디만 OrCAD 등에서 시뮬레이션해도 무방합니다.



위와 같은 결과가 나오는 이유에 대해서 생각을 해보도록 하겠습니다.

먼저 RL Circuit에서  $i_L(t)$ 에 대한 미분방정식을 유도하면  $V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ 를 통해  $i_L(t_0^+)$ 를 계산할 수 있습니다.

$$V_s = i_L(t)R + V_L(t)$$

$$V_s = i_L(t)R + L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} + \frac{R}{L}i_L(t) = \frac{1}{L}V_s$$

$$\frac{dy}{dt} + ky = p$$

$$\mu(t) = e^{\int k dt} = e^{kt}$$

$$e^{kt} \frac{dy}{dt} + e^{kt}ky = \frac{d}{dt}(e^{kt}y) \quad (\text{좌변})$$

$$pe^{kt} \quad (\text{우변})$$

$$\int \frac{d}{dt}(e^{kt}y) dt = e^{kt}y$$

$$\int pe^{kt} dt = \frac{p}{k}e^{kt} + C$$

$$y = \frac{p}{k} + Ce^{-kt}$$

$$i_L(t) = \frac{L}{R} \frac{V_s}{L} + Ce^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R} + Ce^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R} - \frac{V_s}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{V_s}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

이 미분방정식의 계산의 편의를 위해 간단한 치환을 수행합니다.

$$i_L(t) = y, \quad \frac{R}{L} = k, \quad \frac{V_s}{L} = p$$

우리의 예에서 p 값이 0이 아니므로 공업수학에서 배운 1계 미분 방정식에 해당합니다.  
적분 인자  $\mu(x)$ 를 구하도록 하겠습니다

양변을  $\mu(x)$ 인 적분 인자로 나누어 y에 대해 정리하여 일반해를 얻어보겠습니다.

치환했던 식들을 모두 다시 대입해보면 아래와 같이 정리됩니다.

$$t = 0, i_L = 0, t = \infty, i_L = \frac{V_s}{R}$$

$C$ (적분상수)  $= -\frac{V_s}{R}$  이고 만약  $i_L$ 이 0이 아닌 값이 존재한다면 식이 바뀝니다.  
(이 경우에는  $i_L(0) - \frac{V_s}{R} = C$ 가 됩니다)

$$i_L(t) = \frac{V_s}{R} - (i_L(0) - \frac{V_s}{R})e^{-\frac{R}{L}t}$$

## Inductor의 자연 응답에 대해서도 생각해보도록 하겠습니다

아래와 같이 Switch가 열려 있는 상황에서 Inductor가 전류원으로써 동작할 경우를 생각하는 것입니다.

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0$$

$$\frac{di}{dt} + i \frac{R}{L} = 0$$

$$\mu(t) = e^{\int \frac{R}{L} dt} = e^{\frac{R}{L} t}$$

$$e^{\frac{R}{L} t} \frac{di}{dt} + e^{\frac{R}{L} t} \frac{R}{L} i = \frac{d}{dt} (e^{\frac{R}{L} t} i) \quad (\text{좌변})$$

$$0 \quad (\text{우변})$$

$$\int \frac{d}{dt} (e^{\frac{R}{L} t} i) dt = e^{\frac{R}{L} t} i$$

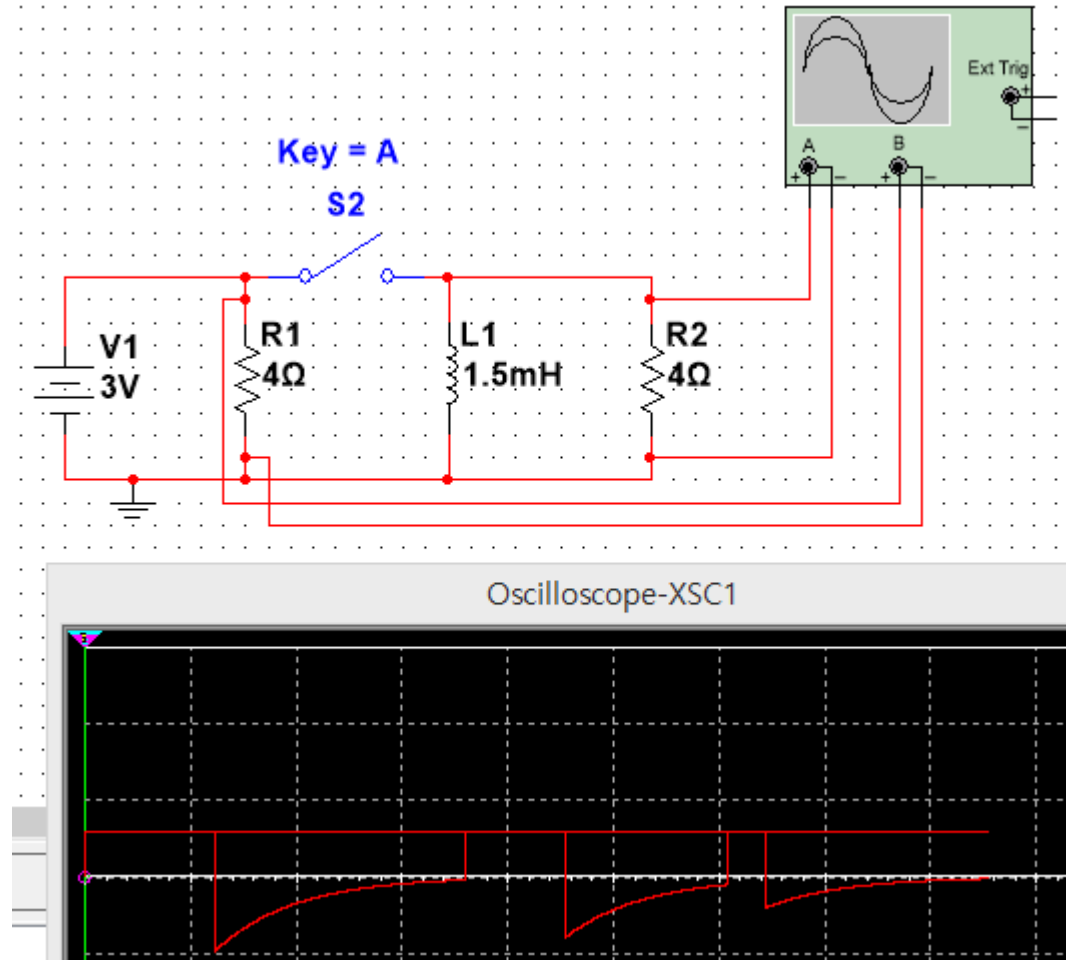
$$\int 0 dt = C$$

$$i = C e^{-\frac{R}{L} t} \quad t = 0, i = i_0, t = \infty, i = 0$$

$$i = i_0 e^{-\frac{R}{L} t}$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} i_0 e^{-\frac{R}{L} t} \quad L \frac{di}{dt} = V_L$$

$$V_L = -R i_0 e^{-\frac{R}{L} t}$$



이 결과는 유도되는 기전력이 원래의 전압보다 높음을 의미합니다(에너지를 만땅으로 충전했을 경우)  
 축적된 에너지가 만땅이 아니라면 오히려 더 낮을 수도 있는데 그림에서 3번째 곡선을 보면  
 에너지를 축적할 시간을 별로 주지 않고 바로 동작시켰을 때 유도 기전력이 원래 전압보다 낮은 것을 볼 수 있습니다.



## Capacitor와 유사하게 Inductor도 전류가 흐르다가 결국에 흐르지 않게 됩니다.

Inductor는 Newton의 제 1 법칙에 해당하는 관성에 따르는데 뭘 따른다는걸까 고민해보겠습니다.

우선 관성이란 무엇일까요 ?

물체가 현재의 상태를 계속 유지하려는 것입니다.

일반적인 역학에서 그렇다면

우리가 살펴보는 회로에서는 어떨까요 ?

Inductor에서의 관성이란 무엇일까요 ?

Switch가 닫혀 있던 상황을 생각해보겠습니다.

Inductor에 특정한 전류가 흐르고 있습니다.

Inductor에는 원래 전류가 흐르지 않았기에

흐르지 않는 상태를 유지하기 위해 반대 방향으로 이를 밀어내고 싶어합니다.

그런데 갑자기 전원 공급이 끊어지면

들어오는 것을 막기 위한 상태를 유지하고 싶어

반대 방향으로 전압이 발생하게 됩니다.

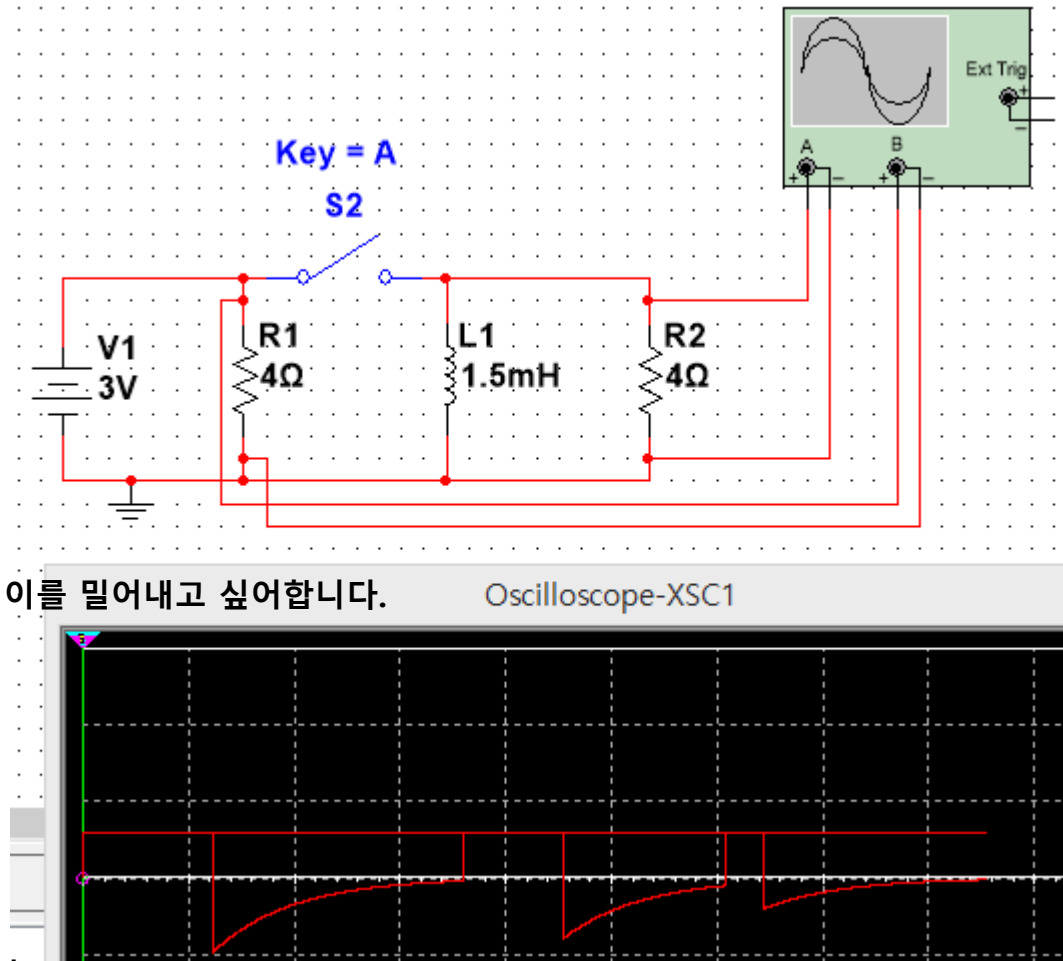
이것을 유도 기전력이라고 부릅니다.

Maxwell Equation에서는 Faraday's Law 라 합니다.

이와 같은 이유로 코일을 사용할 경우에는 역기전력에 대한 제어를 잘 해줘야 합니다.

그래서 모터 제어 회로에는 Flyback Diode 라는 역기전력 방어용 다이오드를 달아주기도 합니다.

다시 본 주제로 넘어가겠습니다.



## Introduction

이 애플리케이션 노트에서는 dsPIC Digital Controller(DSC) 혹은 PIC24 MCU 를 사용하여 구현되는 Sensorless Brushless Direct Current(BLDC) Motor 제어 알고리즘에 대해 설명합니다.  
이 알고리즘은 역기전력(Back-Electromotive Force, BEMF)을 디지털 필터링하기 위한 다수 기능을 활용합니다.  
모터의 각 위상을 필터링하여 모터 드라이브 전압을 정류할 시기를 결정합니다.  
이 제어 기법은 이산형 저역 통과 필터링 HW 및 반도체 칩 외부의 비교기의 필요성을 배제합니다.  
여기서 논의되는 모든 내용과 응용 SW 는 3 상 모터가 사용된다는 가정하에 시작됩니다.  
설명된 모터 제어 알고리즘에는 4 가지 주요한 부분이 있습니다.

- MCU 의 Analog Digital Converter(ADC) 를 사용하여 사다리꼴 BEMF 신호 샘플링
- 노이즈를 줄이고 낮은 Inductance 문제를 해결하기 위한 PWM On-Side ADC 샘플링
- Zero-Crossing 을 검출하기 위해 사다리꼴 BEMF 신호를 VBUS/2 와 비교
- 많은 Function Filter 를 사용한 비교기에서 나오는 신호 필터링
- 3 가지 모드로 모터 구동 전압을 정류함
  - 고전적인 개방형 제어기(Open Controller)
  - 고전적인 폐루프 제어기(Closed-Loop Controller)
  - PI 폐루프 제어기(Proportional-Integral Closed-Loop Controller)

이 제어 방법은 단일 칩 16 비트 PIC MCU 혹은 dsPIC DSC 장치 기반 솔루션입니다.  
필요한 외부 HW 는 BEMF 신호를 소자의 ADC 모듈의 동작 전압 범위로 낮추는데 사용되는 몇 개의 저항입니다.

## Sensored Control vs Sensorless Control

BLDC 모터는 컴팩트한 크기, 제어성 및 고효율로 인해 소비자 및 산업용 응용단에서 사용됩니다.  
점차적으로 자동차 응용에서 벨트 및 유압 시스템을 제거하고 추가 기능을 제공하며  
연비를 향상시키며 유지 보수 비용을 0 으로 줄이는데도 사용됩니다.

전기 여자는 회전자 위치에 동기해야 하므로 BLDC Motor 는 대개 하나 이상의 회전자 위치 센서와 함께 작동합니다.  
비용, 신뢰성, 기계적 패키징, 특히 로터가 유체에 잠겨있는 경우  
일반적으로 Sensorless 구동으로 알려진 경우엔 위치 센서없이 모터를 구동하는 것이 바람직합니다.

구동 단계중 하나의 구동되지 않은 모터 단자에서 BEMF 전압을 감지함으로써  
모터 구동 전압을 정류할 시기를 결정할 수 있습니다.  
그러나 Sensorless Control 에는 몇 가지 단점이 있습니다.

- 감지할 충분한 BEMF 를 생성하려면 모터가 최소 속도로 움직여야 한다.
- 모터 부하가 갑자기 변경되면 BEMF 드라이브 루프가 잠금 상태가 될 수 있다.

저비용을 최우선 과제로하고 저속 모터 작동이 필요하지 않고 모터 부하가 급격히 변하지 않을 것으로 예상되면  
Sensorless Trapezoidal(사다리꼴) 제어가 적용 분야에 더 적합할 가능성이 높습니다.  
그러나 위에 열거한 단점을 모두 극복할 수 있는 특정 알고리즘이 존재합니다.

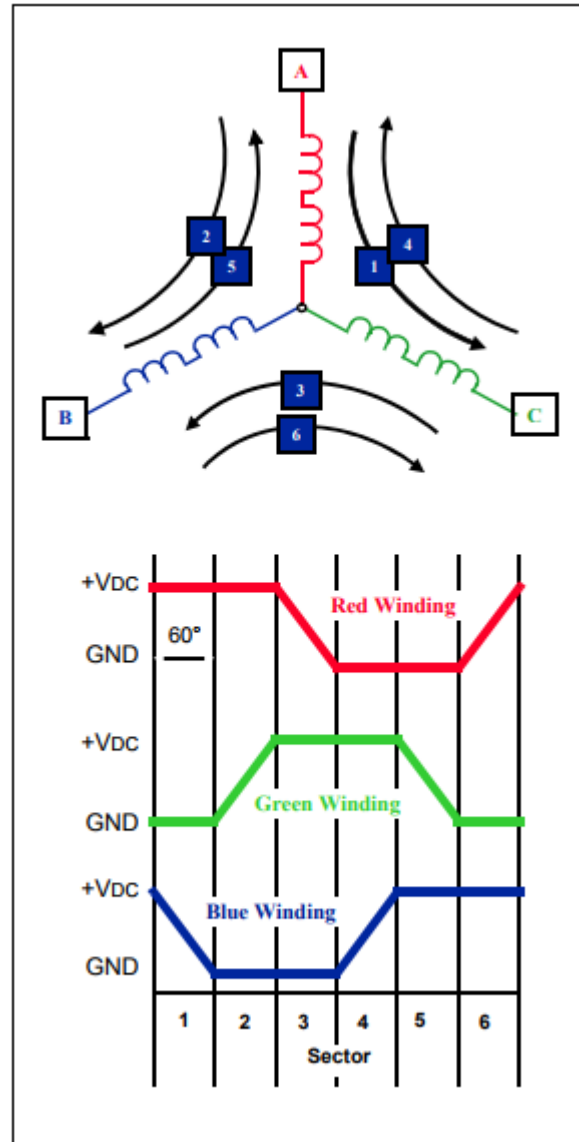
이 자료에서 설명하는 BEMF Zero-Crossing 기술은 여러 가지 이유로 권장됩니다.

- 다양한 모터에 사용하기에 적합합니다.
- 이론상으로는 Y 및 Delta 연결 3 상 모터 모두에서 사용할 수 있습니다.
- 모터 파라미터에 대한 상세한 지식이 필요 없습니다.
- 모터 제조 공차 변화에 상대적으로 둔감합니다(기계 제도에서 이야기하는 공차를 의미함)

## Six-Step(Trapezoidal) Commutation

이 애플리케이션 노트에 설명된 Sensorless 알고리즘에서  
모터 권선에 전원을 공급하는 방법은 6 단계 사다리꼴 또는 120 도 정류에 해당합니다.  
다음 페이지의 그림은 6 단계 정류가 작동하는 방식을 보여줍니다.  
각 단계들은 전기적으로 동등하게 60 도씩 차이를 가지고 있습니다.  
6 개의 섹터가 360 도 혹은 1 개의 전기적인 회전을 구성합니다.

FIGURE 1: SIX-STEP COMMUTATION



권선 다이어그램의 화살표는 6 단계의 각 단계에서 모터 권선을 통해 전류가 흐르는 방향을 나타냅니다. 그래프는 6 단계의 각 단계에서 모터의 각 리드에 적용되는 포텐셜을 보여줍니다. 이러한 단계를 통해 모터가 1 회전을 수행하게 됩니다.

## 정류 단계

### 1 단계

- Red Winding 이 뺄음
- Green Winding 이 주저 았음
- Blue Winding 은 구동되지 았음

### 4 단계

- Red Winding 이 주저 았음
- Green Winding 상승 상태 유지
- Blue Winding 은 구동되지 았음

### 2 단계

- Red Winding 은 상승 상태 유지
- Green Winding 은 구동되지 았음
- Blue Winding 은 주저 았음

### 5 단계

- Red Winding 은 하강 상태 유지
- Green Winding 은 구동되지 았음
- Blue Winding 은 뺄음

### 3 단계

- Red Winding 은 구동되지 았음
- Green Winding 은 뺄음
- Blue Winding 은 하강 상태 유지

### 6 단계

- Red Winding 은 구동되지 았음
- Green Winding 은 하강
- Blue Winding 은 상승 상태 유지

모든 구간에 대해 2 개의 권선에 전원이 공급되고

1 개의 권선에는 전원이 공급되지 았습니다.

각 구간에서 권선 중 하나에 전원이 공급되지 았다는 사실은

Sensorless 제어 알고리즘의 사용을 허용하는 6 단계 제어의 중요한 특징입니다.

## Generating and Sensing BEMF

BLDC 모터가 회전할 때 각 권선은 BEMF 를 발생시키며  
BEMF 는 렌츠의 법칙에 따라 권선에 공급되는 주 전압과 반대입니다.  
이 BEMF 의 극성은 전원 전압의 반대 방향입니다.  
BEMF 는 주로 3 가지 모터 매개 변수에 따라 달라집니다.

- 고정자 권선의 권수(감은 횟수)
- 로터의 각속도
- 회전자 자석에 의해 생성된 자기장

BEMF 는 아래 식을 사용하여 이러한 매개 변수 및 각속도로 계산할 수 있습니다.

$$BEMF = NlrB\omega$$

여기서 N 는 위상당 권선의 숫자를 의미하며, l 은 로터의 길이이고, r 은 로터의 내부 반경을 의미하며,  
B 는 로터의 자기장이고 w 는 각속도를 의미합니다.

고정자의 자기 포화가 방지 되거나 자기장의 온도 의존성이 무시되면(즉 B 가 일정한 경우)  
유일한 가변항은 회전자의 각속도에 해당합니다.  
그러므로 BEMF 는 회전자 속도에 비례하며 속도가 증가함에 따라 BEMF 가 증가합니다.

각 구간이 동작하는 빈도가 모터의 속도를 결정합니다.  
구간이 정류되는 것이 빠를수록 기계적 속도가 빨라집니다.  
BEMF 전압은 로터의 속도에 비례합니다.  
이 때문에 BEMF 를 사용하여 0 과 매우 낮은 속도에서 위치를 감지하는 것은 불가능 합니다.  
그럼에도 불구하고 저속에서 위치 제어 또는 페루프 작동을 필요로하지 않는 많은 응용(팬 및 펌프)이 있습니다.  
이러한 응용단의 경우 BEMF 센싱 방식이 매우 적합합니다.

고정자에 인가된 정류 전압은 또한 모터의 정확한 기능에 직접적인 영향을 미칩니다.  
효율적인 제어를 위해 인가된 전압은 생성된 BEMF 와 일치할만큼  
최소한의 토크로 인한 모터 권선 양단의 전압 강하를 만듭니다.  
이 전압 강하는 권선의 임피던스와 전류를 곱한것과 같습니다.

일반적으로 정류된 전압이 모터의 속도 또는 토크 생산에 관계없이 최대로 설정된 경우 모터는 모터의 권선을 가열하는 낭비된 에너지로 비효율적으로 구동됩니다. 적절한 제어가 필요하다면 PWM(Pulse Width Modulation)을 사용하여 올바른 전압 레벨을 얻어야 합니다. PWM 은 모터를 구동하는 효율적인 방법이지만 제어 Feedback 신호 (즉 BEMF 전압)을 획득하려고 시도할 때 약간의 잡음 문제가 발생합니다.

요약하면 BLDC Motor 및 Sensorless 제어의 중요한 관계는 아래와 같습니다.

- BEMF 신호의 크기는 속도에 비례한다.
- BEMF 신호의 주파수는 (기계적) 회전 속도와 pole(극) 쌍의 수를 곱한 값과 같습니다.
- Motor 토크는 전류에 비례한다(모터 온도가 일정하다고 가정)
- 모터 구동 전압은 BEMF(속도에 비례) + 권선 임피던스 전압 강하(주어진 토크에 대한 전류에 비례)와 같습니다.

## Zero-Crossing Detection

BLDC Motor 제어 이론에서 최대 토크 발생을 위해 고정자의 자속은 회전자 자속보다 90 도 앞서야 합니다. 결과적으로 최대 토크의 경우 전류 위상은 BEMF 전압 위상과 동 위상이 되어야 합니다.

고려된 3 상 BLDC 모터의 경우, 위상이 서로 120 도씩 시프트 되므로 고정자에서 회전하는 Rotor Flux 를 갖는 편리한 방법은 이전에 설명한 6 단계 정류 방식이며 3 상 전압은 전기적으로 60 도씩 위상차를 가지고 있습니다. 최대 토크 및 최대 부하에서 위상 전류는 구동 전압과 동일한 파형을 가져야 하며 유도성 리액턴스를 무시해야 하며 두 신호는 다음 페이지에 보이는 그림(고전류, 부하적용 및 저전류, 무부하)과 같습니다. 그림 6 은 이상적인 BEMF 파형과 위상 전류를 보여줍니다. 특정 부하에서 효율적인 정류를 가정합니다.

BEMF 위상 전압은 구동 전압의 절반에 중심에 있습니다. 이는 Zero-Crossing 이벤트가 실제로 BEMF 파형과 공급 전압(VBUS/2)의 절반인 지점을 나타내는 것을 의미합니다. Zero-Crossing 포인트는 마지막 정류 끝에서 30 도 위상에서 발생하며 다음 정류 지점에서 30 도 각도에 위치합니다. 그러므로 모터 속도는 2 개의 Zero-Crossing 이벤트 사이의 시간 간격으로부터 계산할 수 있습니다. 현재 Zero-Crossing 이벤트가 식별되면 향후 정류 단계에 대한 정확한 일정을 얻을 수 있습니다.

FIGURE 2: PHASE VOLTAGE AND PHASE CURRENT WHEN LOAD IS APPLIED

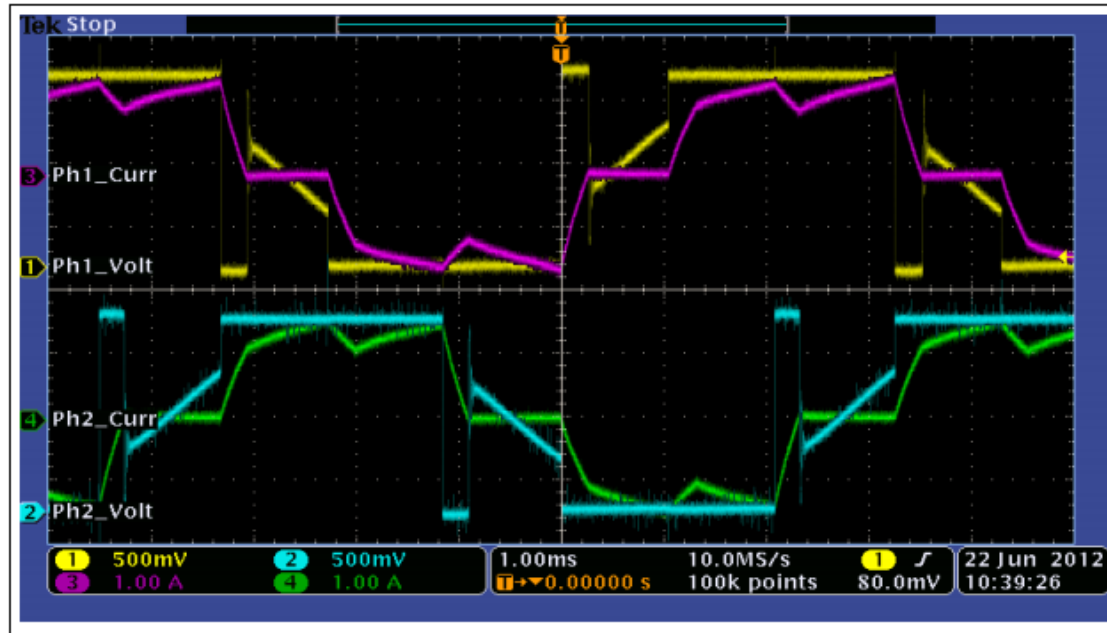


FIGURE 3: ZERO-CROSSING POINT EXACT OCCURRENCE

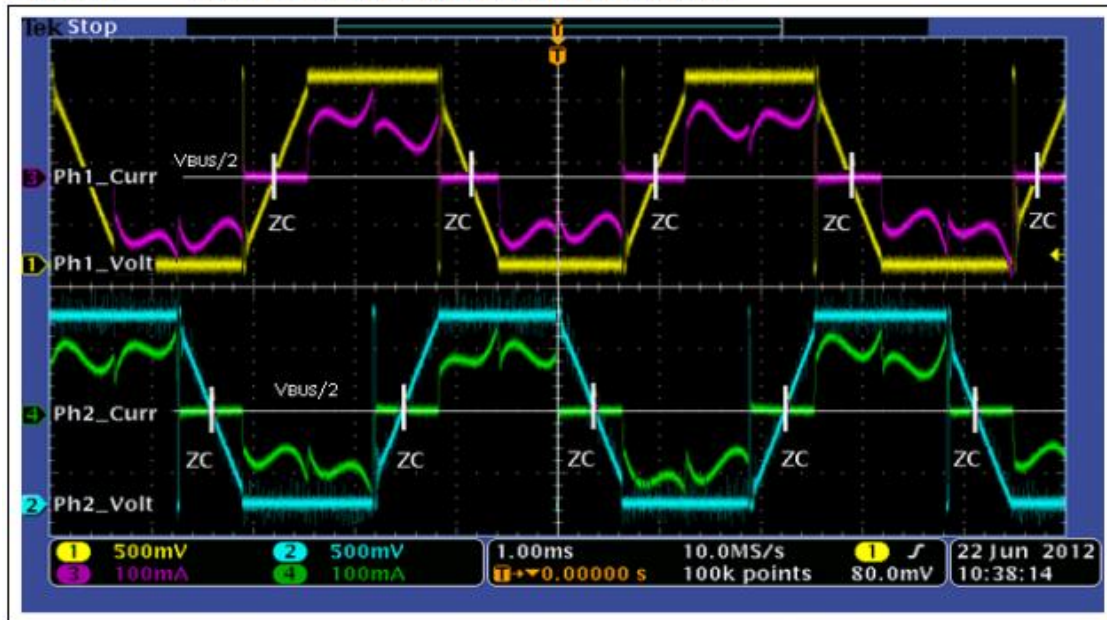
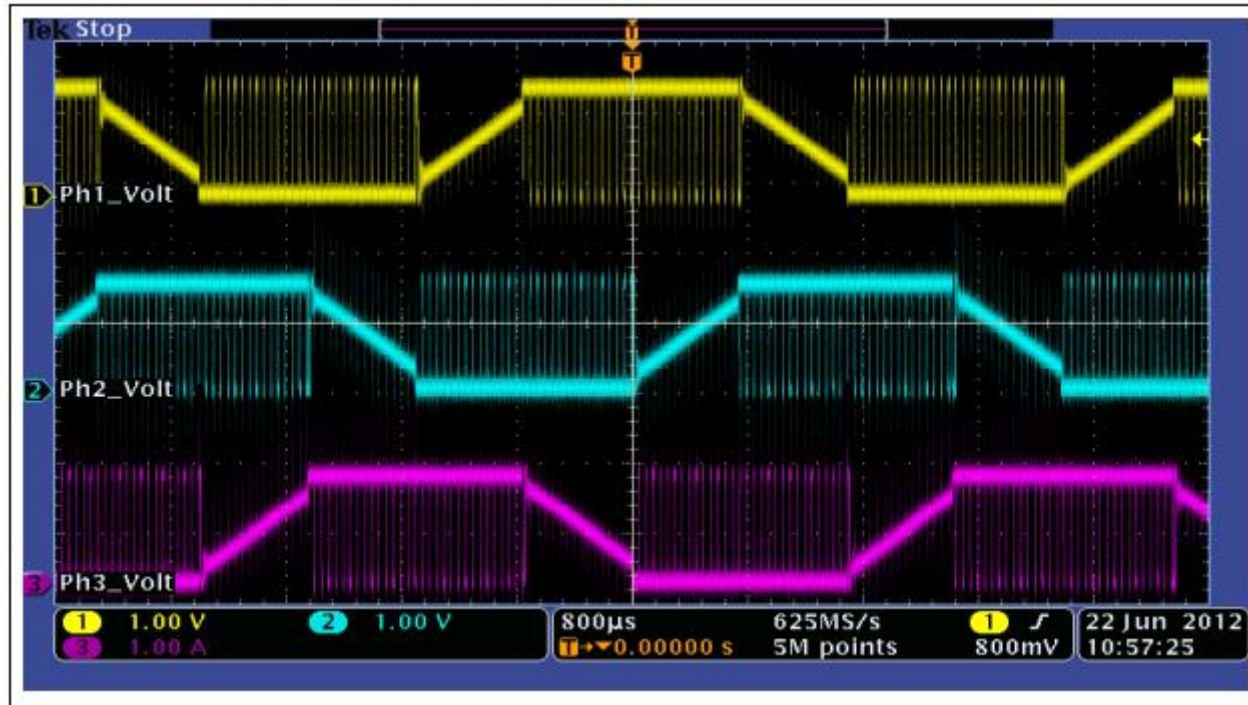


FIGURE 6: BEMF ON ALL 3 PHASES



각 구간은 전기적 주기에서 6 개의 60 도 구간중 하나에 해당합니다(구간 번호는 임의적임)  
정류는 각 구간의 경계에서 발생합니다.  
그러므로 구간의 경계가 감지되어야 합니다.  
BEMF Zero-Crossing 이벤트와 필요한 정류 위치 사이에는 30 도의 Offset 이 존재합니다.

## Detecting BEMF Zero-Crossing Signals

BEMF 전압 Zero-Crossing Signal 을 다른 방법으로 감지할 수 있습니다.  
2 가지 감지 방법에 대해 기술합니다.  
이 방법은 모두 장점과 단점이 있으며 각 경우에 대해 논의할 것입니다.  
각 방법은 유선 중성점이 제공되지 않았거나 고정자가 델타 구성으로 연결되어 있다고 가정합니다.



## BEMF 전압과 DC Bus 전압의 절반을 비교

이 방법은 BEMF 가  $V_{BUS}/2$  와 같을때 Zero-Crossing 이벤트가 발생한다고 가정하고 비교기를 사용하여 BEMF 전압을 DC 버스 전압의 절반( $V_{BUS}/2$ )과 비교하는 것으로 구성됩니다. 아래 그림은 이 방법을 구현하는데 사용되는 회로를 보여줍니다.

모터가 정류 단계 1 에 있다고 가정하고

위상 A 는 전자 스위치를 통해  $+V_{BUS}$  에 연결되고

위상 C 는 전자 스위치를 통해 GND 에 연결되고 위상 B 는 열려있습니다.

위상 B 에서 관찰된 BEMF 신호는 음의 기울기를 가지며

최소값은 정류 단계 2 가 발생하기 직전  $+V_{DC}$  와 거의 동일합니다.

정류 단계 2 가 발생하면 위상 B 는 GND 의 값에 도달합니다.

해당 순간 위상 B 는 전자 스위치를 통해 GND 에 연결되고

위상 C 는 이제 열리고 A 상은  $V_{DC}$  에 연결되어 있습니다.

위상 C 에서 관찰된 BEMF 신호는 양의 기울기를 가지며

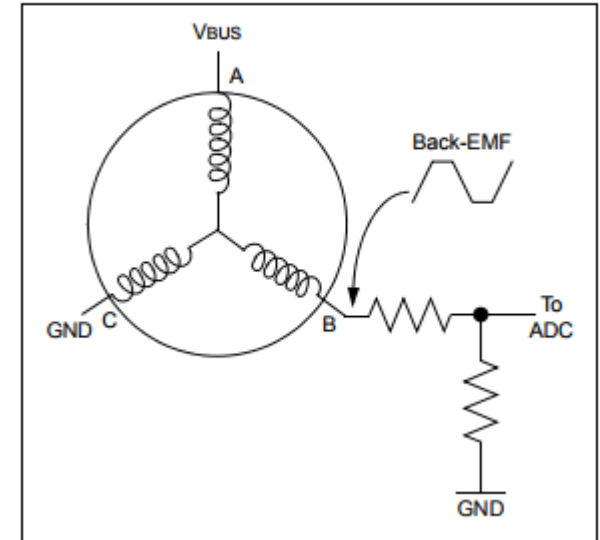
정류 3 단계가 발생하기 전 최대값은 정류 직전에  $V_{DC}$  와 거의 동일합니다.

B 상 및 C 상에 관찰된 두 기울기는

Zero-Crossing Event 를 결정하기 위해  $V_{DC}/2$  와 비교됩니다.

이것은 비교기로 구성된 연산 증폭기로 쉽게 구현됩니다.

FIGURE 4: BEMF VOLTAGE COMPARED TO  $V_{BUS}/2$



## 모터 중립점과 BEMF 전압 비교

앞서 설명한 Zero-Crossing 감지 방법은 가변 임계 전압 지점을 사용하여 Zero-Crossing 이벤트를 감지함으로써 간단해질 수 있습니다.

이 가변 전압은 모터 중성점입니다.

대부분의 BLDC 모터에서는 중성점을 물리적으로 사용할 수 없습니다.

그러나 저항 네트워크를 사용하여 생성할 수 있습니다.

3 개의 저항(RR) 이 모터 권선과 병렬로 연결되고 함께 연결되어 아래 그림과 같이 가상 중성점을 생성합니다.

중성점 신호는 동시에 샘플링된 3 개의 ADC 채널의 값을 평균하여 아래와 같은 식으로 SW 로 재구성할 수도 있습니다.

재구성된 모터 중립 전압은 Zero-Crossing Event 를 결정하기 위해 각 BEMF 신호와 비교됩니다.

BEMF 신호가 모터 중성점과 같을 때 이벤트가 발생합니다.

$$V_n = \frac{BEMF A + BEMF B + BEMF C}{3}$$

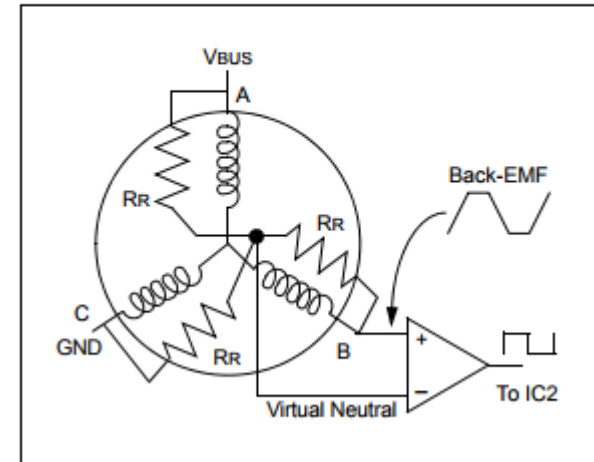
$BEMF A$  는 위상 A 에서 BEMF 전압

$BEMF B$  는 위상 B 에서 BEMF 전압

$BEMF C$  는 위상 C 에서 BEMF 전압

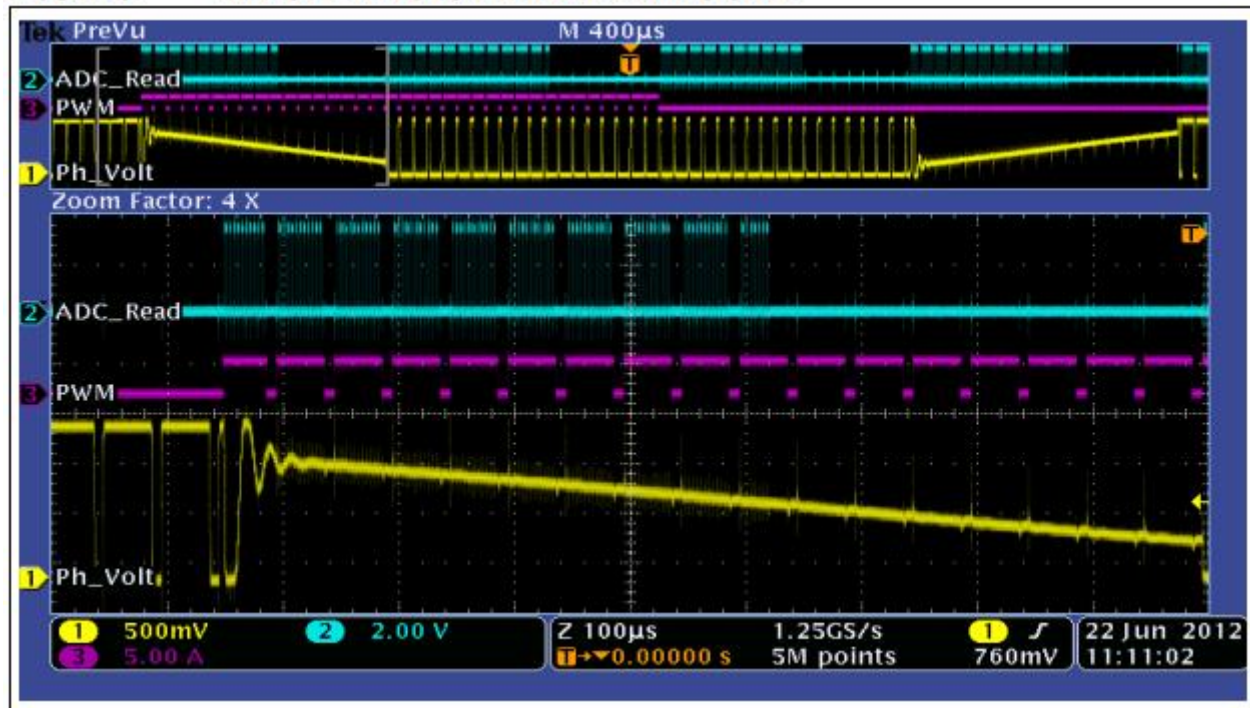
$V_n$  는 Motor 중립 전압입니다.

FIGURE 5: BEMF VOLTAGE COMPARED TO A VIRTUAL NEUTRAL POINT



아래 그림은 섹터(60도) 구간의 샘플링 절차를 보여줍니다.  
아래쪽은 ADC 샘플링이 수행되는 동안 시간축의 향상된 보기를 제공합니다.  
ADC\_Read 신호는 ADC가 BEMF 전압을 샘플링하는 시간을 나타냅니다.  
모든 BEMF 감시 램프를 통해 기간의 전반부만 샘플링 됩니다.  
이는 일단 Zero-Crossing 이벤트가 감지되면 더 이상의 샘플링이 수행되지 않기 때문입니다.  
이를 통해 최상위 레벨 응용단이 다른 중요한 작업을 실행할 수 있는 시간을 더 많이 가질 수 있습니다.

FIGURE 8: ADC SAMPLING vs. PWM AND BEMF SIGNAL

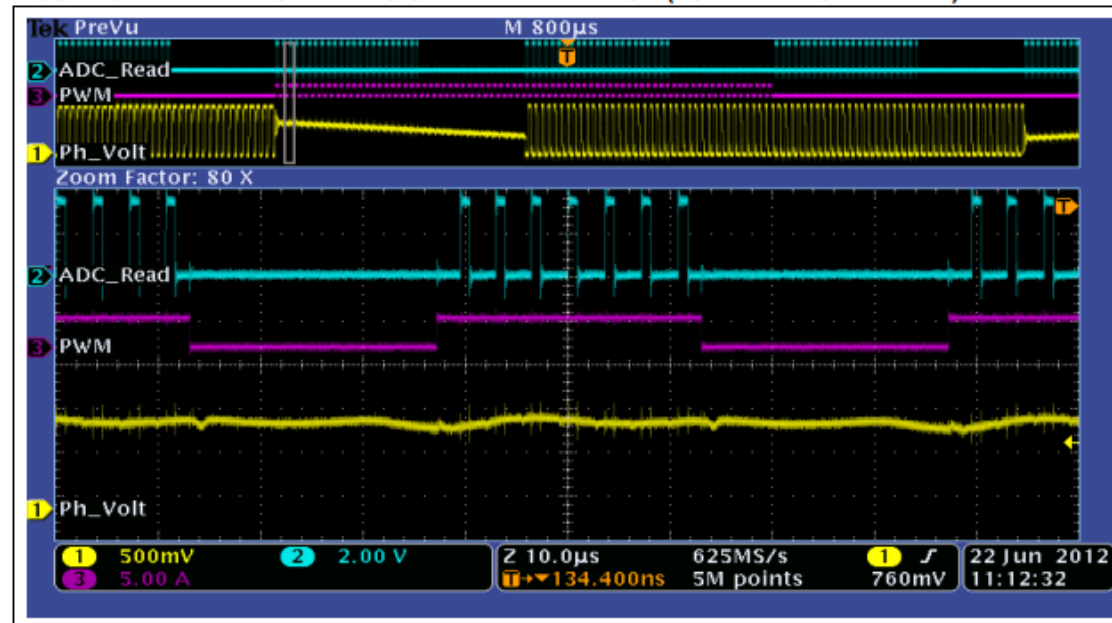


다음 페이지의 그림 9 와 그림 10 은 ADC 샘플링의 차이점을 PWM Duty Cycle 과 비교합니다.  
샘플링 및 변환은 ADC 와 Controller 가 허용하는 한 빨리 발생하도록 구성됩니다.  
동시에 BEMF 전압의 샘플링은 PWM 신호의 High Side 에서만 획득되므로 샘플링 속도와 PWM 주파수는 정비례합니다.  
그림 9 와 그림 10 에서 볼 수 있듯이 샘플 갯수는 Duty Cycle 에 따라 달라집니다.  
Duty Cycle 의 값(PWM High ON State 에 해당)은 모터 권선에 적용되는 전압에 비례합니다.  
동시에 높은 모터 속도는 더 높은 전압을 필요로 합니다.  
BEMF 신호는 PWM High ON 상태에서 샘플링 되므로 더 높은 Duty Cycle(및 더 빠른 속도)이 더 많은 ADC 샘플을 가져오는 결과를 낼 수 있음을 알 수 있습니다.  
샘플을 더 많이 사용하면 Zero-Crossing 이벤트를 보다 빠르고 정확하게 감지할 수 있으며 구간 전환을 훨씬 빠르게 스케줄 할 수 있습니다.

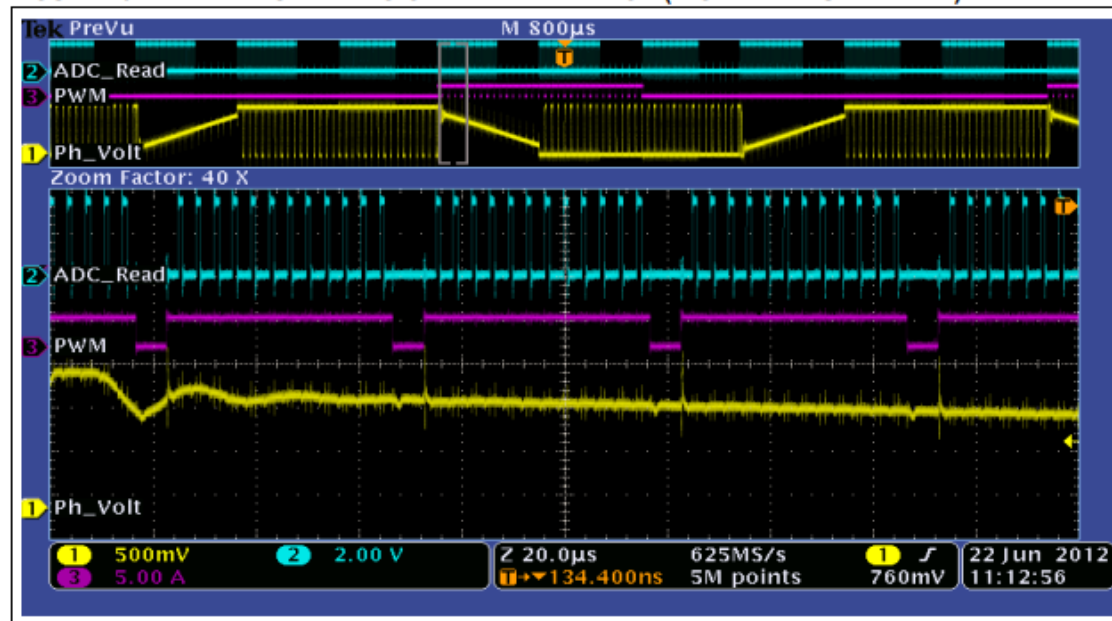
VBUS/2 방법을 사용할 때의 이점은 중립 재구성 방법에 필요한 3 개의 채널을 동시에 샘플링하는 것과는 대조적으로 하나의 ADC 채널만 샘플링 해야 한다는 것입니다.

이 방법의 문제점은 BEMF 신호를 샘플링하는 정확한 시간을 결정하는 것입니다.  
ADC 에 의해 수집된 샘플은 PWM Switching 주파수로 인해 발생하는 공진 전이 전압의 영향을 받을 수 있기 때문입니다.  
ADC Module 은 전자 스위치 및 기타 잡음(예: 모터 권선이 꺼질 때 발생하는 고전압 스파이크)로 인해 생성되는 울림 잡음을 피하기 위해 PWM ON 시간에 샘플을 취하도록 구성됩니다.  
이러한 소음은 잘못된 Zero-Crossing 이벤트를 만들 수 있습니다.

**FIGURE 9: BEMF SAMPLING OVER A PWM PERIOD (LOW PWM DUTY CYCLE)**



**FIGURE 10: BEMF SAMPLING OVER A PWM PERIOD (HIGH PWM DUTY CYCLE)**



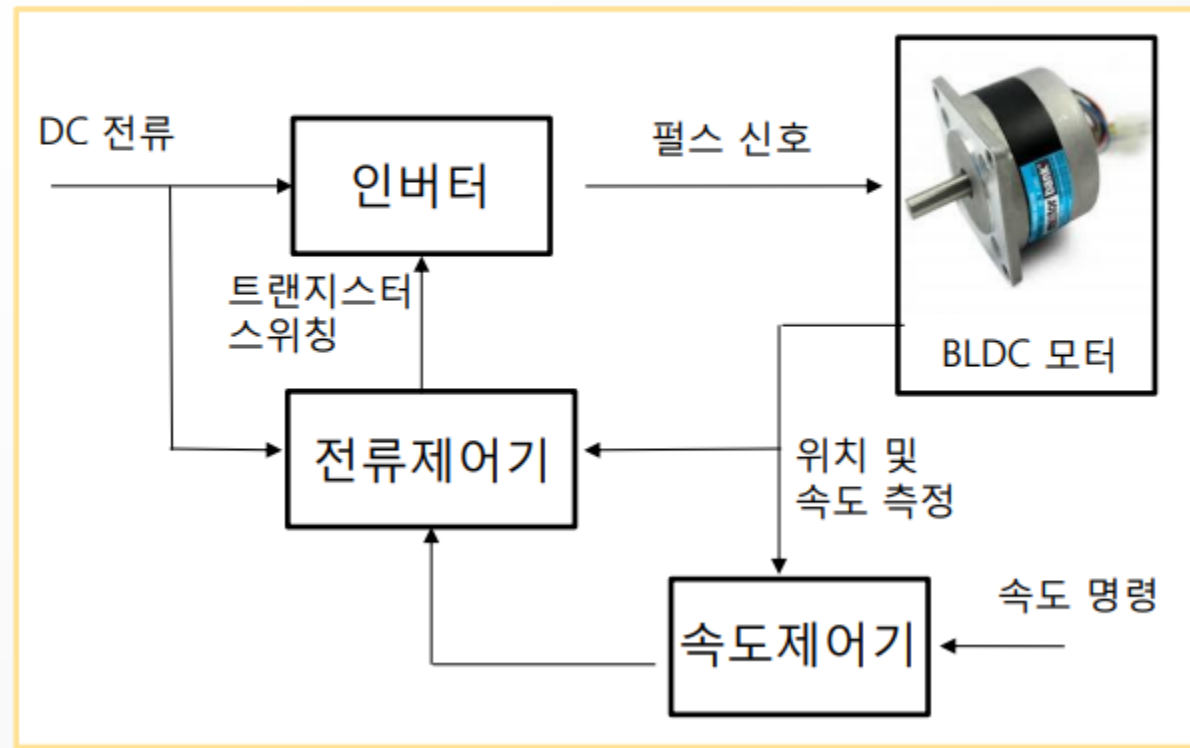
# How to Control Speed ?

속도 제어기는 가장 대표적인 것이 PI 제어기입니다.

쿼드콥터는 적분 오차가 크게 발생할 수 있어 I 제어를 배제하고 PD 제어기로 설계하는 반면  
지상에서의 속도를 제어하는데는 PI 제어기를 주로 사용하고 있습니다.

여기서 인버터(모터 드라이브)와 전류 제어기는 사실상 ESC 라는 Electric Speed Controller 에 해당합니다.  
그리고 속도 제어기는 저희가 MCU 등에 SW 로 구현하여 사용하는 PI 제어기 등등을 의미합니다.

## ④ BLDC 모터의 속도 제어





# Real Application

실제 BLDC 모터를 활용하여 속도를 제어해본 사례를 소개합니다.

저번 엔코더 파트에서 사용했던 내용을 일부 다시 재활용해보도록 하겠습니다.

먼저 사용하는 모터가 사용하는 프레임의 중량을 충분히 커버할 수 있는지 여부를 판정해야 합니다.



즉 중량이 얼마나 되는지 파악할 필요가 있습니다.

중량에 대해 파악을 해보니 차체는 18 kg 이며 최대 허용 적재량은 30 kg 입니다.  
 유아도 태우고 여러 장비도 실장해야 하니 MAX 치인 30 kg 을 커버할 수 있도록 설계해야 합니다.

사용연령	만3~8세	최대적재량	30kg
배터리사양	12V 7.0 Ah	차체중량	18kg
충전시간	8시간	적용모터	12V 듀얼모터
사용시간	약 1시간 30분	속도	2.5~5km
제품크기	118*69.5*52cm	충전기전원	AC 240V 60Hz / 15V 1A

 어린이안전확인인증번호: CB064R1079-7001

그래서 저번에 아래와 같이 기어비를 계산했었습니다.



기어비만큼 토크가 증폭되는데 기어비가 65.2433 으로 대략 65 배 증폭됩니다.  
 실제로는 모터를 먼저 선정하고 기어를 조율하는 것이 맞습니다만 엔코더 과제가 먼저였기에 이와 같이 구성합니다.  
 아무튼 지금부터 실제 응용에 사용한 모터를 살펴보도록 하겠습니다.



# BLDC Motor Specification

우선 실제 응용에 사용한 모터 스펙은 아래와 같습니다.

우선 모터는 아래 스펙을 사용하였습니다.

[http://www.rcmart.com/xerun-120a-brushless-sensored-wtenshock-2450kv-pole-p-68290.html?cPath=1100\\_1252](http://www.rcmart.com/xerun-120a-brushless-sensored-wtenshock-2450kv-pole-p-68290.html?cPath=1100_1252)

친절하게 몇 셀의 어떤 용량을 가진 배터리를 사용해야 한가와 출력 전류등의 정보를 제공하고 있습니다.



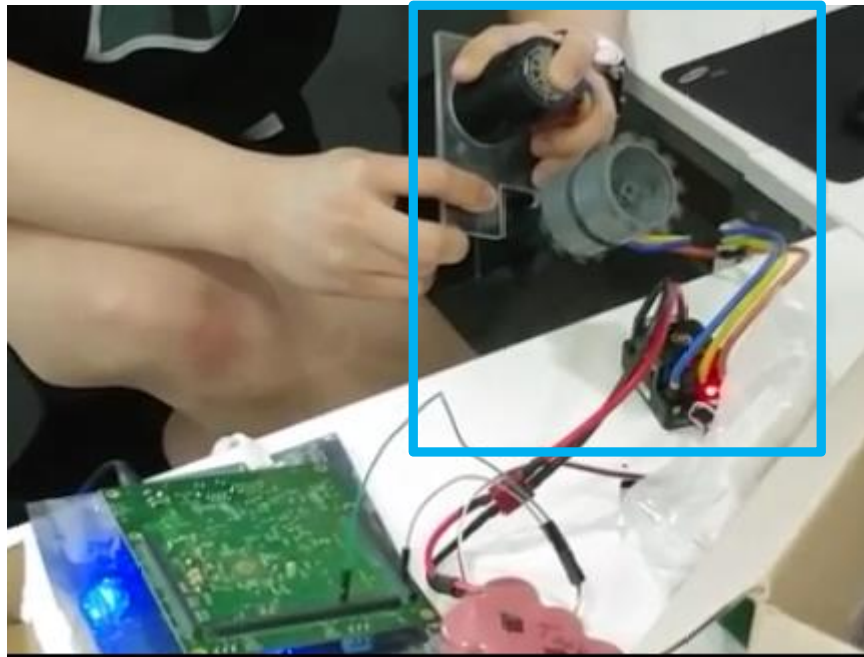
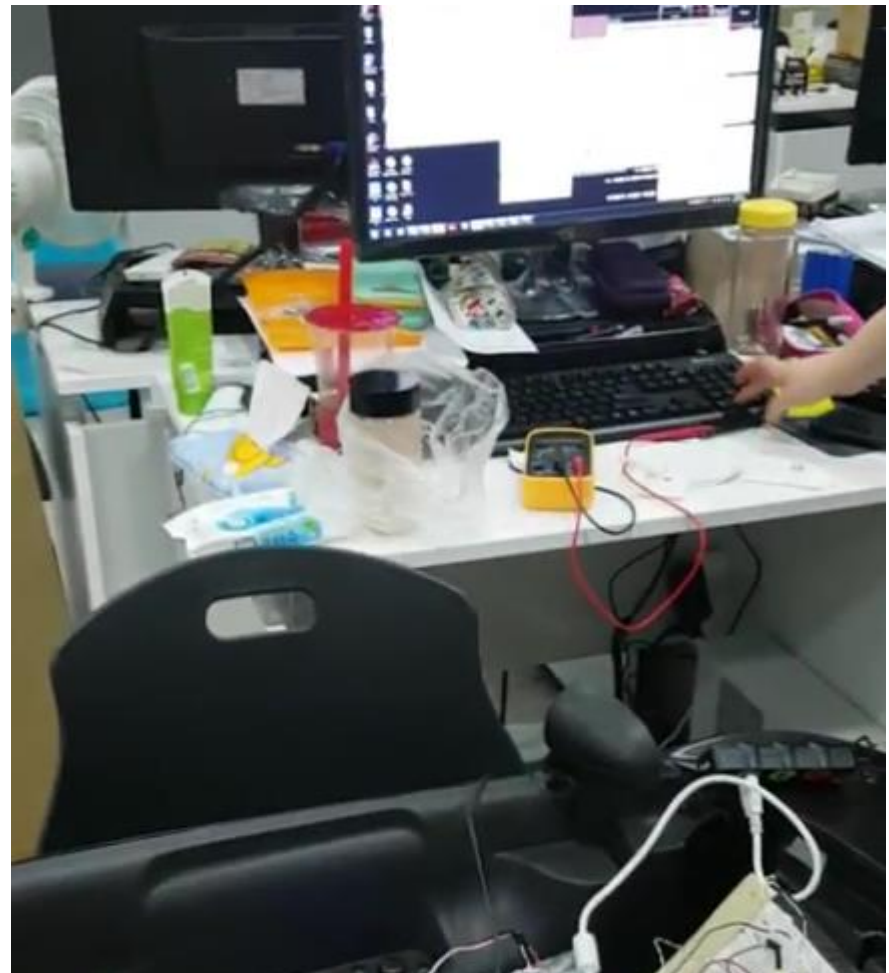
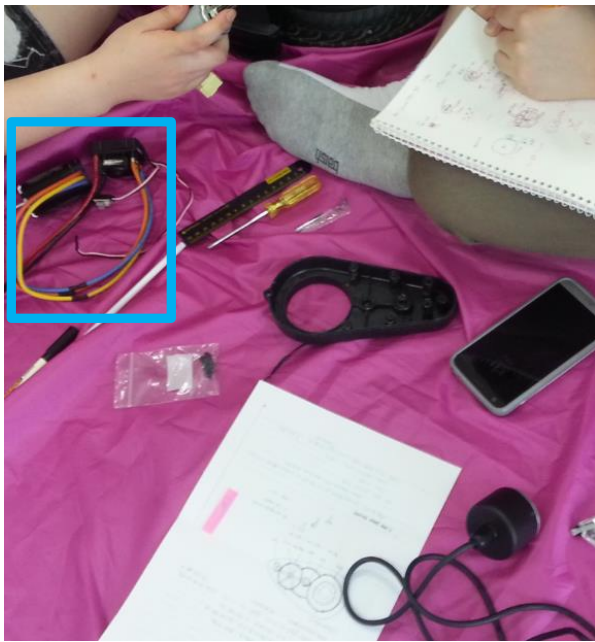
## Specification:

- Suitable Car: 1/10 and 1/8 scale short course truck / buggy / truggy
- Cooling fan: 5-6V; \* Note #1
- Size: 53.5mm(L) \* 36mm(W) \* 36mm(H)
- Output: Continuous 120A, burst 760A
- Input: 6-12 cells NiMH/NiCd or 2-4S Lipo
- BEC: 6V/3A (Switching mode)
- Resistance: 0.0004 Ohm
- Motor Supported: Sensored and sensorless brushless motor
- Suitable Motor:

With 6 cells NiMH/NiCd or 2S Lipo: KV≤6000

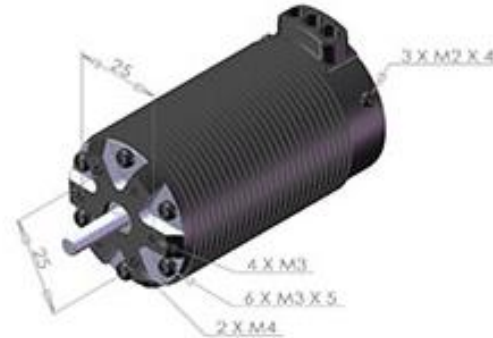
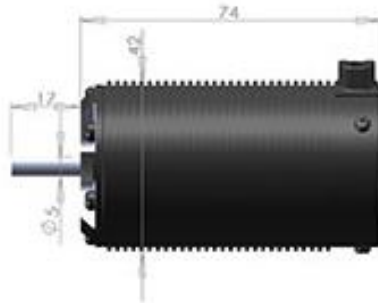
With 7-9 cells NiMH/NiCd or 3S Lipo: KV≤4000

With 10-12 cells NiMH/NiCd or 4S Lipo: KV≤3000



문제는 바로 이 다음인데 해당 사이트에서 좀 더 아래쪽을 살펴보면 아래와 같은 사진이 보일 것입니다.

# TENSHOCK X812L 6-POLE Sensor BL MOTOR



Specifications	Weight (g)	RPM/V [Kv]	Idle Current [IO] 10v (A)	Resistance [Ri]	Max Voltage (v)	Max Amps (A)	Max Power (W)
X812L/3.5Y	390	2450	4.0	3.3	21	190	3500
X812L/4Y	390	2150	3.5	4.2	25	160	3500
X812L/4.5Y	390	1900	3.2	5.4	28	140	3500
X812L/5Y	390	1700	3.0	6.6	32	120	3500

우선 Max Power 가 3500 으로 1 마력이 745.7 W 임을 고려하면 대략 4.7 마력임을 알 수 있습니다. 여기서 RPM/V 는 볼트당 RPM 으로 제공되는 전압이 높으면 높을수록 RPM 을 높일수 있음을 의미합니다. 즉 속도는 2450 \* 21 로 51450 RPM 이 도출이 됩니다.

여기서 모터의 스펙을 기반으로 토크값을 산출해보도록 하겠습니다.

<http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=k5808151&logNo=50104410736>

해당 사이트의 정보를 기반으로 계산을 수행하면 아래와 같습니다.

$$9549.3 \times \frac{3.5}{51450} = 0.6496122448979591836734693877551 \text{ N.m}$$

그리고 단위 변환을 수행해야 합니다.

[http://blog.daum.net/\\_blog/BlogTypeView.do?blogid=0FvYS&artid=8125878](http://blog.daum.net/_blog/BlogTypeView.do?blogid=0FvYS&artid=8125878)

위를 참고하자면 단위는 아래와 같습니다(물론 이것은 근사식이며 엄밀하게 1 N.m 는 10.197 kgf.cm 로 환산된다)

$$1 \text{ kgf.cm} = 100 \text{ kgf.cm}$$

$$1 \text{ N.m} = 10 \text{ kgf.cm}$$

그러므로 토크를 다시 환산해보자면 아래와 같이 적을 수 있습니다.

$$0.6496122448979591836734693877551 \text{ N.m} = 6.5 \text{ kgf.cm}$$

즉 이 모터는 1 cm 떨어진 6.5 kg 의 물체를 회전시킬 수 있음을 의미합니다.

그렇다면 문제는 이 모터가 실제 구동시킬 프레임이 정말 6.5 kg 인지  
혹은 이것보다 더 작은지 혹은 이것보다 더 큰지가 문제가 됩니다.

앞서 살펴보았듯이 저희는 30 kg 을 이동시켜야 합니다.

현재 우리 시스템의 파워를 고려해보면 증폭피가 65 배이므로 422.5 kgf.cm 이 나옵니다.

이것은 41.4331 N.m 에 해당합니다(0.0980664999999998 을 곱하면 단위 변환이 됨)

즉 1 m 떨어진곳에서 41 N 의 힘이라는 강력한 힘을 발생시킬 수 있음을 의미합니다.

혹은 원래 단위로 해석해도 1 cm 떨어진 부분에서 442.5 kg 의 물체를 회전시킬 수 있음을 의미합니다.

그러므로 자체를 구동시키기에는 충분하다는 판정을 할 수 있습니다만 아직 끝이 아닙니다.

차량은 가속을 하고 등속 운동을 수행할 수 있는데 이것에 대한 성능을 설계해놓아야 합니다.

가속 및 등속 운동에 대한 값을 설계하기 위해서는 가속 토크와 등속 토크를 설계할 필요가 있습니다.  
다음 링크를 통해서 가속 토크와 등속 토크를 설계하도록 합니다.

<http://anisyw.tistory.com/entry/%EC%A0%95%EB%B3%B4%EB%AA%A8%ED%84%B0-%EC%84%A0%EC%A0%95%EC%97%90-%EC%9E%88%EC%96%B4-%ED%86%A0%ED%81%AC-%EA%B3%A0%EB%A0%A4-%EB%B0%A9%EB%B2%95>

단위 환산의 착오를 없애기 위해 아래 링크를 추가적으로 첨부합니다.

<http://tip.daum.net/question/56996336>

이 정보에 입각하여 값들을 설계해본다면 아래와 같이 요약됩니다.

여기서 W 는 중량, D 는 바퀴의 지름, turn 은 rev/s, t 는 가속 시간,  $\mu_k$  는 운동 마찰 계수입니다.

$$1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N} = 1 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ kg} * 980 \text{ cm/s}^2$$
$$f = 980 \text{ cm/s}^2$$

$$J(\text{kg} \cdot \text{cm}^2) = \frac{W(\text{kg}) * D^2(\text{cm})}{8}$$

$$T_a(\text{kgf} \cdot \text{cm}) = \frac{J(\text{kg} \cdot \text{cm}^2)}{g(980\text{cm/s}^2)} * 2\pi * \frac{\text{turn}(\text{rev/s})}{t(\text{s})}$$

$$T_m(\text{kgf} \cdot \text{cm}) = \mu_k * \frac{W(\text{kg}) * D(\text{cm})}{4}$$

문제는 이 정보를 기반으로 차원 해석을 수행하면 우측항과 좌측항이 일치하지 않는다는 것입니다(특히 가속 토크)

$$J(\text{kg} \cdot \text{cm}^2) = \frac{30(\text{kg}) * 25^2(\text{cm})}{8} = 2343.75 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$T_a(\text{kgf} \cdot \text{cm}) = \frac{2343.75(\text{kg} \cdot \text{cm}^2)}{g(980\text{cm/s}^2)} * 6.28 * \frac{3(\text{rev/s})}{2(\text{s})} = 22.528 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$T_m(\text{kgf} \cdot \text{cm}) = 0.09 * \frac{30(\text{kg}) * 25(\text{cm})}{4} = 16.875 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$



문제는 여기서 차원 해석을 하다보니 이상한 부분을 발견하게 되었습니다.  
그래서 아래의 링크를 찾아 다시 계산해보게 되었습니다.

<http://nepsi.com/resources/calculators/motor-torque.htm>

그러나 단위가 맞지 않아 환산하는 작업을 추가하였습니다.  
제일 욕 나오는 단위중 하나가 lb 와 lbs 라는 단위인데 복수일 경우  
s 가 붙으므로 lb 와 lbs 를 동일하게 취급해도 무방합니다.

<http://m.blog.daum.net/saric/7362804>

lb-ft 단위를 kg-cm 로 변환하기 위해 아래 링크를 사용합니다.

<https://www.convertunits.com/from/ft+lb/to/kg+cm>

아래는 해외 단위로 단위 변환을 거쳐 재 환산한 모터의 토크값입니다(약간의 오차가 존재하는군요)

$$1 \text{ lbs. ft} = 13.82549596447 \text{ kg. cm} = 0.1382549596447 \text{ kg. m} \quad \text{hp} = \text{마력}(745.7\text{W}), \text{ N} = \text{모터 rpm}$$

$$1 \text{ kg. cm} = 0.072330138512099 \text{ lbs. ft}$$

$$1 \text{ kg. m}^2 = 23.73036040423 \text{ lbs. ft}^2 = 10000 \text{ kg. cm}^2$$

$$1 \text{ lbs. ft}^2 = 421.401100938 \text{ kg. cm}^2 = 0.0421401100938 \text{ kg. m}^2$$

$$T = \frac{\text{hp} * 5252}{N} [\text{lbs. ft}] = \frac{4.7 * 5252}{51450} = 0.48 \text{ lbs. ft} = 6.636237792 \text{ kg. cm} = 0.06636237792 \text{ kg. m}$$

다음으로 일정한 속도로 부하를 구동하는데 필요한 토크외에 부하를 가속하기 위한 토크를 계산한 값입니다.

$$1 \text{ ft} = 30.48 \text{ cm}, \quad 1 \text{ cm} = 0.0328084 \text{ ft}, \quad 25 \text{ cm} = 0.82021 \text{ ft}, \quad 625 \text{ cm} = 20.5052 \text{ ft}$$

$$1 \text{ lbs} = 0.453592, \quad 30 \text{ kg} = 66.1387 \text{ lbs}$$

$$J = \frac{W[\text{lbs}] * d^2[\text{ft}]}{8} = \frac{66.1387 * 0.6727444441}{8} = 5.56180537062 [\text{lbs. ft}^2] = 2343.75090638 \text{ kg. cm}^2$$

아직까지는 위에서 계산한 결과와 동일함을 알 수 있습니다.

남은 가속 토크를 구할 때 계산기 공식을 활용할 수 있는 사이트를 활용해보겠습니다.

Known variables: Weight (lbs), Diameter (ft), Change in Speed (RPM), and Time to accelerate Total System (sec)

In addition to the torque required to drive the load at a steady speed, torque is required to accelerate the load.

$$T = \frac{WK^2 \times dN}{308 \times t} \qquad WK^2 = \frac{w \times d^2}{8}$$

#### Accelerating Torque for Solid Cylinders

Input Weight, w (lbs) :	66.14
Input Diameter, d (ft):	0.82
Input Change in Speed Required, dN (RPM) :	51450.00
Input Time to Accelerate Total System, t (Sec) :	2.00
Accelerating Torque, T (lbs-ft) :	464.31

이 숫자를 kgf.cm 으로 변환해보도록 하겠습니다.

$$464.31 \text{ lbf.ft} = 6419.31 \text{ kg.cm}$$

뭔가 한참 말도 안되는 수치가 나왔다고 생각을 할 수 있는데 여기에는 우리의 실수가 있습니다.

우선 기어비 때문에 모터는 절대로 최고 속도인 51450 RPM 을 낼 수 없습니다.

속도를 희생하는 조건으로 얻은것이 토크입니다.

반면 토크를 희생하면 또 속도를 얻을 수 있습니다.

이 문제를 해결하기 위해 다음 페이지를 살펴보겠습니다.

해당 문제를 해결하기 위해 RPM 을 m/s 로 변환해보도록 하겠습니다.  
바퀴의 직경이 25 cm 임을 고려하여 반지름은 12.5 cm 가 됩니다.

$$51450 \text{ rad/min} = \frac{51450}{60} \text{ rad/s} = 857.5 \text{ rad/s}$$

$$v = r\omega = 0.125 \text{ m} * 857.5 \text{ rad/s} = 107.1875 \text{ m/s}$$

즉 51450 RPM 으로 모터가 구동되면 바퀴의 끝 부분의 선속도가 107 m/s 라는 엄청나게 빠른 속도를 낸다는 것입니다.  
여기서 중요한 것은 우선 기어비가 있어 토크가 증가하였기 때문에 최대 속도인 51450 rpm 을 낼 수 없다는 것입니다.  
또한 이 속도를 낼려면 모터 스펙이 훨씬 압도적으로 뛰어나야 한다는 것입니다.

그렇다면 이 정보를 기반으로 오히려 아래와 같이 한계 속도를 정하고 RPM 을 지정할 수 있습니다.

$$v = r\omega = 0.125 \text{ m} * \text{variable rad/s} = 5 \text{ m/s}$$

$$\frac{5}{\text{variable}} = \frac{1}{8} \Rightarrow \text{variable} = 40 \Rightarrow 40 * 60 = 2400 \text{ RPM}$$

이와 같이 지정한다면 앞서 계산했던 식을 아래와 같이 다시 적을 수 있습니다.

$$1 \text{ lbs.ft} = 13.82549596447 \text{ kg.cm} = 0.1382549596447 \text{ kg.m}$$

$$J = \frac{W[\text{lbs}] * d^2[\text{ft}]}{8} = \frac{66.1387 * 0.6727444441}{8} = 5.56180537062 [\text{lbs.ft}^2] = 2343.75090638 \text{ kg.cm}^2$$

$$T = \frac{J * N}{308 * t} [\text{lb.ft}] = \frac{5.56180537062 * 2400}{308 * 2} = 21.6693715738 [\text{lbs.ft}] = 299.589809246 \text{ kgf.cm}$$

기어비에 의해 증폭된 최대 토크는 422.5 kgf.cm 였으므로 해당 가속 토크를 충분히 상회하고도 남습니다.

$$1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad}, \quad 6.3662 \text{ rev} = 40 \text{ rad}$$

$$T_a(\text{kgf.cm}) = \frac{2343.75(\text{kg.cm}^2)}{g(980\text{cm/s}^2)} * 6.28 * \frac{6.3662(\text{rev/s})}{2(s)} = 47.807401148 \text{ kgf.cm}$$

즉 국내 블로그에서 제공되는 토크 계산식은 차원 해석이 이상하듯이 결과적으로도 잘못되었음을 확인할 수 있습니다.



물론 지금 계산한 결과는 완전한 Cylinder 에 대해 수행한것이므로  
 그 아래쪽에 있는 Hollow Cylinder 로 작업해야 합니다.  
 단위 계산이 너무 머리가 아파므로 사이트 내에서 제공하는 계산기를 활용하도록 하겠습니다.

Known variables: Weight (lbs), Outer Diameter (ft), Inner Diameter (ft), Change in Speed (RPM), and Time to accelerate Total System (sec)

In addition to the torque required to drive the load at a steady speed, torque is required to accelerate the load.

$$WK^2 = \frac{w \times (od - id)^2}{8} \qquad WK^2 = \frac{w \times (od - id)^2}{8}$$

#### Accelerating Torque for Hollow Cylinders

Input Weight, w (lbs) :	66.14
Input Outer Diameter, od (ft):	0.82
Input Inner Diameter, id (ft):	0.66
Input Change in Speed Required, dN (RPM) :	2400.00
Input Time to Accelerate Total System, t (Sec) :	2.00
Accelerating Torque, T (lbs-ft) :	0.82

위 결과를 kg.cm 으로 변경해보면 아래와 같이 계산됩니다.

$$0.82 \text{ lbf.ft} = 11.3369066909 \text{ kg.cm}$$

오히려 국내 블로그에서 제공하는 것보다 더 적은 결과임을 보여줍니다.

모터 축의 경우에도 국내 자료와는 일치하지 않는 상이한 결과를 보여줬습니다.

Known variables: Speed of Moving Parts (RPM), Speed of Driving Motor (RPM), Change in Speed (RPM), Time to Accelerate System (sec)

In addition to the torque required to drive the load at a steady speed, torque is required to accelerate the load.

$$T = \frac{WK^2 \times dN}{308 \times t} \quad WK^2 = \left[ \frac{N}{N_M} \right]^2$$

#### Accelerating Torque for Motor Shafts

Input Speed of Moving Part, N (RPM) :	2400.00
Input Speed of Driving Motor, N <sub>M</sub> (RPM) :	2400.00
Input Change in Speed Required, dN (RPM) :	2400.00
Input Time to Accelerate Total System, t (Sec) :	2.00
Accelerating Torque, T (lbs-ft) :	3.90

$$3.9 \text{ lbf.ft} = 53.9194342614 \text{ kg.cm}$$

어찌 되었든 결국 현재 기어비를 통해 증폭시킨 토크로 충분히 5 m/s 의 출력을 낼 수 있고 2 초 내로 가속할 수 있음이 입증되었습니다. 실제로 토크가 남기 때문에 보다 빠른 가속 및 더 빠른 주행도 불가능하지 않을 것입니다. 마찰등을 고려할때 충분하다고 판정할 수 있습니다.

향후 이 부분은 차량 동역학을 공부하여 보다 명확하게 하고자 하는 계획을 가지고 있습니다.

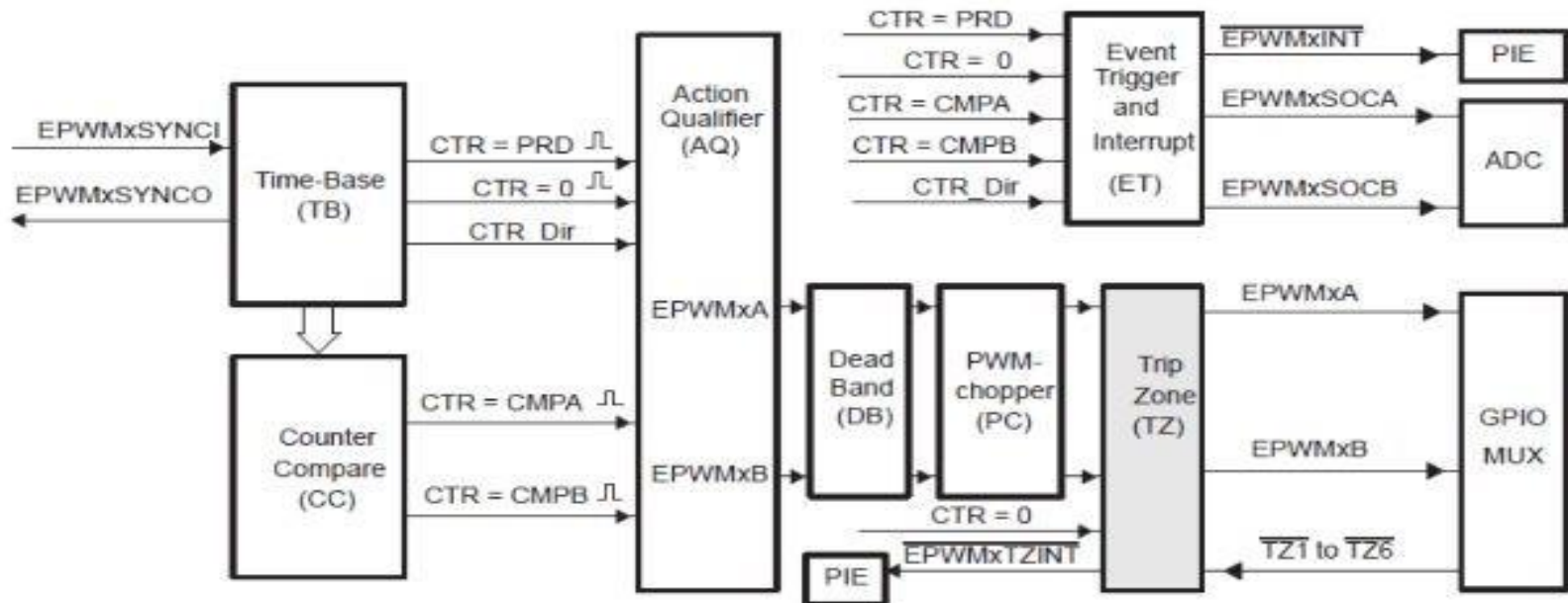
# TI Cortex-R5F Based ePWM Control

이제 보드에서 실제로 ePWM 제어를 수행해보도록 합니다.

데이터 시트상에서 Time Base(TB) 레지스터와 Counter Compare(CC) 레지스터를 사용합니다.

- TB
  1. System Clock 과 관련하여 TBCLK 를 생성합니다.
  2. PWM Time Base 카운터(TBCTR)로 주기와 주파수를 생성합니다.
- CC
  1. EPWMxA 와 EPWMxB 출력의 PWM Duty Cycle 을 명시합니다.

Figure 38. Trip-Zone Submodule



작업 태스크가 많고 모터 제어가 중요하므로 Lock 을 걸어놓을 수 있도록 Semaphore 를 걸고 있습니다.  
현재는 UART 를 통해서 수신된 문자값에 따라 PWM Duty 를 조절하여 속도를 제어하는 코드입니다.

```
void BLDCMOTOR(void *pvParameters)
{
    vSemaphoreCreateBinary( xSemaphore );

    while(1)
    {
        squire = 3;          // 10 의 제곱
        receiveData = 0;

        while(1)
        {
            vTaskDelay (pdMS_TO_TICKS (500));
            temp = sciReceiveByte(UART);
            sciDisplayText(UART, &temp, TSIZE1);

            temp = temp-48;
            if(temp > 9 || temp < 0)
                break;
            receiveData += temp * pow(ten, squire);
            sciDisplayText(UART, &receiveData, TSIZE1);
            squire--;
        }

        for(count=1;count<=5;count++)
        {
            if(receiveData > 0)
            {
                if( xSemaphore != NULL )
                {

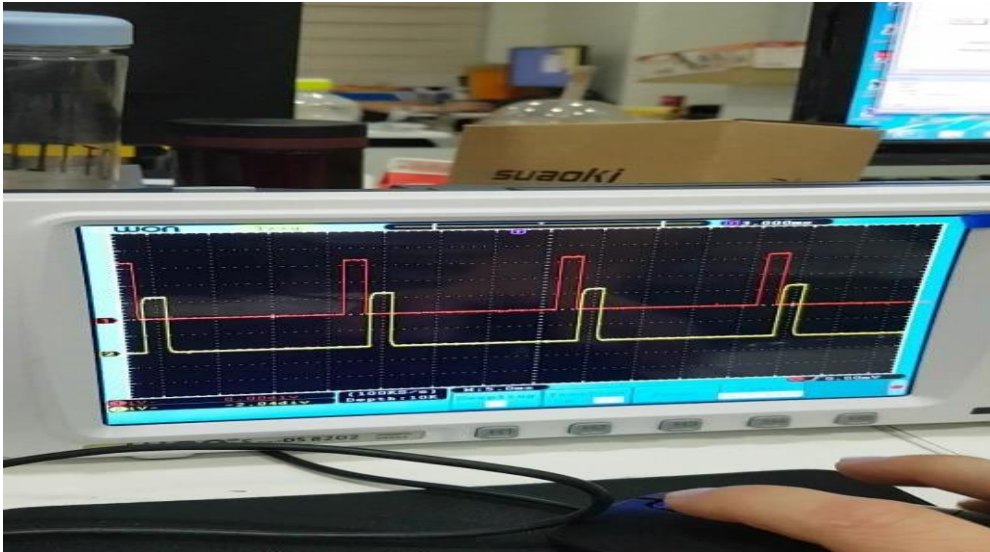
                    ePWM1A = receiveData;
                    ePWM1B = receiveData;

                    etpwmSetCmpA(etpwmREG1, ePWM1A);
                    etpwmSetCmpB(etpwmREG1, ePWM1B);
                    sciDisplayText(UART, &ePWM1A, TSIZE1);
                    sciDisplayText(UART, &ePWM1B, TSIZE1);
                }
            }
        }
    }
}
```

# Test Program Results

아래와 같이 테스트 프로그램의 결과를 오실로스코프를 통해 측정한 모습입니다.  
또한 UART 가 연결되어 있으므로 시리얼을 통해 현재의 Duty 도 살펴볼 수 있습니다.  
(결과의 구현이 % 로 구현한 형태가 아님)

저희는 ESC 를 사용하므로 파형이 3 상이 나올 필요가 없으며 ESC 가 인식하는 주기가 20 ms 였습니다.  
기존에 이 주기를 맞추지 않고 코드를 작성하였을때 동작하지 않아 상당히 애를 먹었던 기억을 가지고 있습니다.



- 주기 : 20ms
- 입력전압 : 3 ~ 5V
- Min(optional) : 544
- Max(optional) : 2400

```
receiveData = 1500  
receiveData = 1500  
receiveData = 1500  
11 ePWM1B = 1500  
receiveData = 1000  
receiveData = 1600  
receiveData = 1600  
11 ePWM1B = 1600  
receiveData = 1000  
receiveData = 1400  
receiveData = 1400  
receiveData = 1400  
11 ePWM1B = 1400
```

# References

1. BLDC 모터의 기본 구조  
<http://openstory.tistory.com/108>
2. MicroChip - Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160b.pdf>
3. 인버터와 ESC  
<http://teamgds.tistory.com/49>
4. TI - Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors  
<http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>
5. STM – Sensorless BLDC Motor Control and BEMF Sampling Methods with ST7MC  
[http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/aa/b4/69/3f/75/58/4a/a1/CD00020086.pdf/files/CD00020086.pdf/jcr:content/translations/en.CD00020086.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/aa/b4/69/3f/75/58/4a/a1/CD00020086.pdf/files/CD00020086.pdf/jcr:content/translations/en.CD00020086.pdf)
6. Simplified Sensorless Control for BLDC Motor, Using DSP Technology  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.465.2228&rep=rep1&type=pdf>
7. 토크를 고려한 모터 선정법  
<http://anisyw.tistory.com/entry/%EC%A0%95%EB%B3%B4%EB%AA%A8%ED%84%B0-%EC%84%A0%EC%A0%95%EC%97%90-%EC%9E%88%EC%96%B4-%ED%86%A0%ED%81%AC-%EA%B3%A0%EB%A0%A4-%EB%B0%A9%EB%B2%95>
8. A Study of Control Systems for Brushless DC Motors  
[https://etd.ohiolink.edu/!etd.send\\_file?accession=toledo1399046747&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=toledo1399046747&disposition=inline)
9. NXP – 3-phase Sensorless BLDC Motor Control Kit with the S12 MagniVMC9S12ZVM  
<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4704.pdf>
10. Infineon – Drone Electronic Speed Controller(ESC) with XMC, Gate Driver, OptiMOS  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application-Motor\\_Control-Drone\\_Electronic\\_Speed\\_Controller\\_ESC-TR-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462580663ef015843a229fe54ea](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application-Motor_Control-Drone_Electronic_Speed_Controller_ESC-TR-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462580663ef015843a229fe54ea)